

39º ANPET

Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes

Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANAIS

Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes

Anais do 39º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (39º ANPET)

Goiânia, GO
2025

Copyright © 2025 para os autores

Conteúdo, revisão textual e gramatical: Resposanbilidade dos respectivos autores.

Todos os direitos reservados 2025
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação de direitos autorais (Lei 9.610/98).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
(39. : 2025 : Goiânia, GO)
Anais do 39° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (39° ANPET) [livro eletrônico] / organização Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. -- Goiânia, GO : Aptor Software, 2025.
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-85-63273-83-3

1. Engenharia de transportes 2. Pesquisas 3. Transporte de passageiros 4. Transportes - Planejamento I. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. II. Título.

25-326424.0 CDD-629.04

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia de transportes 629.04

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Realização

anpet

UFG

PUC GOIÁS

Apoio

CNPq

FUNAPE
Fundação de Apoio à Pesquisa

GOIÂNIA
CONVENTION & VISITORS BUREAU

Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte

SGG
Secretaria-Geral de Governo

GOVERNO DE GOIÁS
O ESTADO QUE DÁ CERTO

Patrocinadores

deepvision technologies

disbral asfalto

Dynatest

infraTest TESTING SYSTEMS

GARCIA MONTEIRO

pavesys ENGENHARIA DE PAVIMENTOS

PTV GROUP
part of Umovity

ingevity

McTrans

SIGVIAS

chairs abertis
international innovation network
sustainability · mobility · technology

39º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
10 a 14 de Novembro de 2025
ANPET 2025 - Goiânia, Goiás

COMITÊ LOCAL

Cintia Isabel de Campos Roque Guerrero (FCT/UFG) - **Coordenadora**
George Wilton Albuquerque Rangel (FCT/UFG)
Lara Batista Ferreira de Lima (EECA/FCT/UFG)
Lilian Ribeiro de Rezende (EECA/UFG)
Marta Pereira da Luz (PUC Goiás)

Colaboradores
João Paulo Silva Lima (FCT/UFG)
Marcelo Barbosa César (FCT/UFG)
Marcos Paulino Roriz Junior (FCT/UFG)
Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira (FCT/UFG)
Rodrigo Pinheiro Toffano Pereira (FCT/UFG)
Ronny Marcelo Aliaga Medrano (FCT/UFG)
Walter Manoel Mendes Filho (FCT/UFG)

Discentes apoiadores
Ana Paula Ferreira da Silva (FCT/UFG)
Eric Rosa Santana (FCT/UFG)
Identidade Visual e Comunicação
João Vitor Lima Sousa

COMITÊ PREMIAÇÃO

Área temática: Modelos e Técnicas de Planejamento de Transportes
Alan Ricardo Da Silva (UnB)
Glaydston Mattos Ribeiro (UFRJ)
Josiane Palma Lima (UNIFEI)

Área temática: Planejamento Territorial do Transporte
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro (UFC)
José Aparecido Sorratini (UFU)

Área temática: Transporte Urbano e Rodoviário
Christine Tessele Nodari (UFRGS)
Jorge Ubirajara Pedreira Junior (UFBA)

Área temática: Logística e Gestão do Transporte de Carga
José Eugênio Leal (PUC-Rio)
Rodrigo de Alvarenga Rosa (UFES)

Área temática: Aspectos Econômicos, Sociais, Políticos e Ambientais do Transporte
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro (UFC)
Leise Kelli Oliveira (UFRGS)

Área temática: Infraestrutura de Transportes
Fernando Silva Albuquerque (UFS)
Luciano Pivoto Specht (UFSM)

Área temática: Ensino em Transportes
Andréa Holz Pfützenreuter (UFSC)
Érica Aparecida Kawakami (USP)
Leticia Dexheimer (UFPel)

Área temática: Pesquisa em Desenvolvimento
André Luiz Cunha (USP)
Janaina Antonino Pinto (Unicamp)

COMITÊ CIENTÍFICO

Rodrigo Castelan Carlson (UFSC) - **Diretor Científico**
Silvia Nella Istre (ANPET) - **Secretária Científica**

Área temática: Aspectos Econômicos, Sociais, Políticos e Ambientais do Transporte
Coordenador Temático: Leonardo Herszon Meira (UFPE)
Coordenadora Adjunta: Lílian dos Santos Fontes Pereira Bracarense (UFT)
Coordenador Adjunto: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nobrega (UFMG)

Área temática: Logística e Gestão do Transporte de Carga
Coordenadora Temática: Leise Kelli de Oliveira (UFRGS)
Coordenadora Adjunto: Gisele de Lorena Diniz Chaves (UFSC)

Área temática: Modelos e Técnicas de Planejamento de Transportes
Coordenadora Temática: Ana Margarita Larrañaga Uriarte (UFRGS)
Coordenador Adjunto: Cassiano Augusto Isler (USP)

Área temática: Planejamento Territorial do Transporte
Coordenador Temático: Gustavo Garcia Manzato (UNESP)
Coordenador Adjunto: André Soares Lopes (UNIFOR)

Área temática: Tráfego Urbano e Rodoviário
Coordenador Temático: José Elievam Bessa Júnior (UFMG)
Coordenador Adjunto: Jorge Tiago Bastos (UFPR)

Área temática: Infraestrutura de Transportes
Coordenador Temático: Francisco Thiago Sacramento Aragão (UFRJ)
Coordenadora Adjunta: Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena (UFCG)
Coordenador Adjunto: Luis Alberto Herrmann do Nascimento (Petrobras)

Área temática: Ensino em Transportes
Coordenador Temático: Antônio Nelson Rodrigues da Silva (USP São Carlos)
Coordenadora Adjunta: Christine Tessele Nodari (UFRGS)

DIRETORIA DA ANPET

Flávio José Craveiro Cunto (UFC) - **Presidente**
Leise de Oliveira (UFRGS) - **Diretora Executiva**
Rodrigo Castelan Carlson (UFSC) - **Diretor Científico**
Cira Souza Pitombo (USP - São Carlos) - **Diretora de Diversidade, Equidade e Inclusão**
Ana Margarita Larranaga (UFRGS) - **Diretora de Inovação**
Lilian Ribeiro de Rezende (UFG) - **Diretora de Integridade Acadêmica**
Cassiano Augusto Isler (USP – Poli) - **Diretor de Comunicação**
Orivalde Soares da Silva Júnior (IME) - **Diretor de Relações Institucionais**

Cíntia Machado de Oliveira (CEFET/RJ) - **Secretaria Executiva**

Sumário

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Carga - Artigos científicos	**1**
MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA APOIO À ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE FISCALIZAÇÃO EM RODOVIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	2
OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE SUBSTITUIÇÃO DE TRILHO EM FERROVIAS: UM MODELO BASEADO EM TEMPOS OBSERVADOS E EFICIÊNCIA OPERACIONAL	7
UM RELATO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À LOCALIZAÇÃO DE POSTOS DE PESAGEM – SIALOC NA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL DE SANTA CATARINA	12
Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Carga - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**17**
ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO DE DANOS EM TRECHOS FERROVIÁRIOS AFETADOS POR QUEDA DE BLOCOS DE TALUDES	18
ESTUDO DE CUSTOS DE COMBUSTÍVEL PARA TRANSPORTE DE COMMODITIES AGRÍCOLAS NO MATO GROSSO	21
Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Passageiros - Artigos científicos	**24**
ACESSO AO EMPREGO EM CIDADE TIRADENTES: ESTIMATIVAS DE IMPACTOS DA LINHA 16-VIOLETA E ESTUDO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS DE ESTAÇÕES	25
ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE DADOS MÓVEIS NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES NA EUROPA	30
ANÁLISE DE RELAÇÕES ENTRE OCUPAÇÕES MAIS PROPENSAS AO TELETRABALHO E COMPORTAMENTO DE VIAGENS	35
APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRENDIZADO SUPERVISIONADO DE MÁQUINA NA PREVISÃO DO USO DO TRANSPORTE PÚBLICO DE FORTALEZA	40
CONSTRUÇÃO DE ARQUIVO GTFS COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA OPLANEJAMENTO DA MOBILIDADE URBANA	45
DETERMINANTES DA ESCOLHA DO MODO DE TRANSPORTE PARA VIAGENS ATÉ UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO: APLICAÇÃO DE MODELOS LOGIT MULTINOMIAIS	50
HÁ METADADOS NA MALHA VIÁRIA DO OPENSTREETMAP? UM ESTUDO DA COMPLETUDE E DISPONIBILIDADE DE TAGS DAS ROTAS RURAIS BRASILEIRAS	55
IMPACTO DA IRREGULARIDADE DA OPERAÇÃO NO NÍVEL DE SERVIÇO DE UMA ESTAÇÃO DE BRT: UMA ANÁLISE BASEADA EM MICROSSIMULAÇÃO	60
INCORPORATING EQUITY PRINCIPLES IN THE FORMULATION OF TRANSIT PROJECTS	65
INDICADOR DE SUSCETIBILIDADE A ALAGAMENTOS NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS	70
INFERÊNCIA DA OCUPAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS COM BASE EM PADRÕES COMPORTAMENTAIS E OPERACIONAIS	75
MODELAGEM DE TENDÊNCIAS E EMISSÕES EVITADAS POR SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS NO BRASIL	80
MODELOS COMPUTACIONAIS DE APOIO À DECISÃO NO ATENDIMENTO PRÉ-HOSPITALAR	85
SUBSTITUIÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO PELO RIDESOURCING: UMA ANÁLISE SOBRE A MOBILIDADE URBANA DE JOÃO PESSOA	90
Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Passageiros - Comunicações técnicas	**96**
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO TRANSPORTE PÚBLICO NA REGIÃO DO ITAQUI-BACANGA EM SÃO LUIS-MA ATRAVÉS DO MÉTODO LITA	97
CAMINHOS E DESAFIOS PARA A MOBILIDADE NO ITAQUI-BACANGA: UMA AVALIAÇÃO COM O MÉTODO LITA	102
HOW TO USE THE GTFSWIZARD R PACKAGE TO ASSESS TRANSIT PROJECTS: FORTALEZA'S BR-116 BUS RAPID TRANSIT SYSTEM PROPOSAL	107
IMPACTO DA PANDEMIA DE COVID-19 NA DEMANDA POR TRANSPORTE COLETIVO NA RMSP: UMA ANÁLISE COM MODELOS BINOMIAIS NEGATIVOS E INTERAÇÕES TEMPORAIS	111
MOBDATA: SISTEMA DE MONITORAMENTO DO TRANSPORTE PÚBLICO EM TEMPO REAL	116
TECNOLOGIA A SERVIÇO DA MOBILIDADE A CONTAGEM DE PASSAGEIROS EM TEMPO REAL COMO PILAR DO PLANEJAMENTO	120

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Passageiros - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**124**
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA E QUALIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO NA CIDADE DE RIO VERDE - GO	125
CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS EM FORTALEZA: ANÁLISE BASEADA EM INDICADORES OPERACIONAIS	128
INCORPORAÇÃO DE DADOS DE POSICIONAMENTO MÓVEL NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE URBANO E REGIONAL	131
Modelagem Aplicada ao Transporte não Motorizado - Artigos científicos	**134**
ANÁLISE SISTÊMICA DA CAMINHABILIDADE: UMA ABORDAGEM INTEGRADA	135
APLICAÇÃO DE MÉTODO DE SELEÇÃO DE VARIÁVEIS BASEADO EM FLORESTA ALEATÓRIA PARA ANÁLISE DO TRANSPORTE ATIVO PÓS PANDEMIA DA COVID-19	140
MODELAGEM DA CAMINHABILIDADE EM AMBIENTE UNIVERSITÁRIO: ESTUDO DE CASO DO CAMPUS SANTA MÔNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	145
Modelagem Aplicada ao Transporte não Motorizado - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**151**
ABORDAGEM BASEADA EM AGENTES PARA O PLANEJAMENTO DE RUAS COMPLETAS, SEGURAS E INCLUSIVAS	152
MOBILIDADE A PÉ E BRT: ESTRATÉGIAS PARA SISTEMATIZAR E PRIORIZAR ELEMENTOS URBANOS	155
Mobilidade e Acessibilidade - Artigos científicos	**158**
A BICICLETA COMO ALTERNATIVA DE MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES	159
ACEITABILIDADE E FATORES ASSOCIADOS AO USO DE PATINETES ELÉTRICOS COMPARTILHADOS NO DISTRITO FEDERAL	165
ACESSIBILIDADE PEDESTRE EM REDES URBANAS: ANÁLISE DA COMPLEXIDADE BASEADA EM DIFUSÃO ANÔMALA E CAMINHADAS ALEATÓRIAS	170
A CIDADE DE 15 MINUTOS E HABITAÇÃO SOCIAL EM FORTALEZA - O CASO DO BAIRRO PASSARÉ	175
ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DE PROCEDIMENTOS DE MODERAÇÃO DE TRÁFEGO: TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS	181
ANÁLISE COMPARATIVA DAS PERCEPÇÕES NOS DESLOCAMENTOS DA COMUNIDADE ACADÊMICA UTILIZANDO ABORDAGENS DE ENTROPIA E ANÁLISE FATORIAL	186
ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE LOCAL A EQUIPAMENTOS PÚBLICOS URBANOS DE EDUCAÇÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO ENTRE 2010 E 2022	191
ANÁLISE DA CAMINHABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO DA ÁREA HOSPITALAR DE BELO HORIZONTE (MINAS GERAIS, BRASIL)	196
ANÁLISE DA MATURIDADE DE INICIATIVAS PARA A INTEGRAÇÃO DA MOBILIDADE COMO UM SERVIÇO (MAAS)	201
ANÁLISE ESPACIAL DOS DESERTOS ALIMENTARES EM BELO HORIZONTE	206
ASSESSING AGE-BASED INEQUITIES IN HEALTH CARE ACCESSIBILITY USING THE G2SFCA METHOD: A CASE STUDY FOR THE IMMEDIATE REGION OF GOIÂNIA, BRAZIL	211
ATRIBUTOS DO AMBIENTE URBANO E ESCOLHA DAS ROTAS DE PEDESTRES: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	216
AVALIAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DAS DIRETRIZES DO TRANSPORTE POR BICICLETAS PROPOSTAS NO PLANO DE MOBILIDADE DO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS	221
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SERVIÇO NA CAMINHADA À ESCOLA SOB A PERCEPÇÃO DOS ALUNOS: ESTUDO DE CASO EM MAGÉ (RJ)	226
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS ESPAÇOS PÚBLICOS PARA PEDESTRES SEGUNDO A PERCEPÇÃO DO USUÁRIO: ESTUDO DE CASO NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	231
AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CAMINHABILIDADE EM PORTO ALEGRE/RS SEGUNDO A PERCEPÇÃO DE SEUS CIDADÃOS E OS MODOS COMO SE DESLOCAM	236
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INFRAESTRUTURAS CICLOVIÁRIAS EM MANAUS: ESTUDO DE CASO DE CICLOFAIXA E CICLORROTA	241
AVANÇOS E TENDÊNCIAS NA APLICAÇÃO DE SIG A SISTEMAS DE BICICLETAS COMPARTILHADAS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E EXPLORATÓRIA (2014–2024)	246

BENCHMARKING THE X-MINUTE CITY: A MULTI-CITY ASSESSMENT OF PRIMARY HEALTH CARE ACCESSIBILITY FROM A SOCIO-SPATIAL INEQUALITY PERSPECTIVE	251
BIKEABILITY INDEX IN CYCLING INFRASTRUCTURE PLANNING: MEASUREMENT IN DOWNTOWN PORTO ALEGRE, RS, BRAZIL	256
BOAS PRÁTICAS DAS UNIVERSIDADES FEDERAIS DE MINAS GERAIS: CONSTRUÇÃO DE UM CAMPUS VIVO E PARTICIPATIVO	261
CAMINHABILIDADE E DESAFIOS URBANOS NO BAIRRO LAGOINHA - BELO HORIZONTE	266
CAMINHABILIDADE EM ITABUNA/BA: LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES DO iCam 2.0 A PARTIR DE APLICAÇÃO NO BAIRRO JARDIM VITÓRIA	271
CAMINHABILIDADE NO CENTRO DE CURITIBA: APLICAÇÃO DO ICAM 2.0 COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA MOBILIDADE ATIVA URBANA	276
CAMINHAR E OBSERVAR: O CENTRO HISTÓRICO DE SÃO JOÃO DEL-REI (MG) ATRAVÉS DAS PESSOAS IDOSAS	281
CÁLCULO DO NÍVEL DE SERVIÇO DE CALÇADAS NO SETOR CYLLENEO FRANÇA EM JATAÍ-GO	286
CARACTERIZAÇÃO DO USO CICLOVIÁRIO DA CIDADE DE MARINGÁ/PR	291
CLASSIFICAÇÃO DE HIERARQUIAS VIÁRIAS METROPOLITANAS: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA	296
COMPLEXIDADE DA ACESSIBILIDADE URBANA UTILIZANDO DIMENSÃO FRACTAL SOBRE ISÓCRONAS	302
CYCLING UNDER PRESSURE: THE ROLE OF TRAFFIC STRESS IN LIMITING URBAN JOB ACCESSIBILITY BY BICYCLE	307
DATASET DE LINHAS E VIAGENS DO TRANSPORTE PÚBLICO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO	312
DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO UAM-ATM NO PLANEJAMENTO DE MOBILIDADE URBANA NO BRASIL: O CASO DO DISTRITO FEDERAL	317
DESAFIOS DA MOBILIDADE EM CIDADES HISTÓRICAS: APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CAMINHABILIDADE DE CENTROS URBANOS HISTÓRICOS (ICCH) EM CONGONHAS (MG)	322
DISPARIDADES NA CAMINHABILIDADE DA POPULAÇÃO IDOSA DE SÃO PAULO, SP	327
EFEITO BARREIRA DE RODOVIA URBANA NOS PADRÕES DE VIAGEM DE COMUNIDADES LINDEIRAS: O CASO DO CONTORNO NORTE DE MARINGÁ-PR	332
EFICIÊNCIA DE ALTERNATIVA EM CIDADES BRASILEIRAS: COMO OS PADRÕES DE COLAPSO POR ALAGAMENTO DIFEREM DE BLOQUEIOS ALEATÓRIOS	337
ESTUDO SOBRE A BARREIRA CAUSADA PELA RODOVIA DOS INCONFIDENTES NA MOBILIDADE DOS PEDESTRES	342
EXPANSÃO DO MONOTRILHO NA RMSP: ANÁLISE COMPARATIVA DE VIAGENS ENTRE AS PESQUISAS ORIGEM-DESTINO DE 2017 E 2023	347
HUB DE MOBILIDADE EM ÁREA INDUSTRIAL: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO INDUSTRIAL DE GRAVATAÍ	352
IDENTIFICAÇÃO DEHOTSPOTSDE CRIMES E SINISTROS DE TRÂNSITO NO ENTORNO DE PONTOS DE ÔNIBUS	358
IMPACTOS DE UMA RODOVIA URBANA NOS PADRÕES DE MOBILIDADE E CONDIÇÕES SOCIOECONÔMICAS DE COMUNIDADES LINDEIRAS: O CASO DA BR-376, MARINGÁ-PR	363
JOB ACCESSIBILITY IN THE 15-MINUTE CITY: A COMPARATIVE ANALYSIS OF WALKING, CYCLING, AND E-BIKES IN FOUR BRAZILIAN CITIES	368
MOBILIDADE AÉREA URBANA E GÊMEOS ESPACIAIS:BRASÍLIA COMO ESTRUTURA PILOTO PARA IMPLANTAÇÃO DE REDES UAM-UTM	373
MOBILIDADE E ACESSIBILIDADE UNIVERSAL NAS CAPITAIS BRASILEIRAS: UMA ANÁLISE DOS DADOS DO CENSO DEMOGRÁFICO 2022	378
MOBILIDADE E JUSTIÇA TERRITORIAL: AVALIAÇÃO ESPACIAL DA COBERTURA DO TRANSPORTE PÚBLICO EM ÁREAS PERIFÉRICAS	383
MOBILIDADE NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA: PROPOSTA CONCEITUAL PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO	388
MONITORAMENTO REMOTO DA INFRAESTRUTURA DE ACESSIBILIDADE:CONTRIBUIÇÕES METODOLÓGICAS	393
O QUE SAIU DO PAPEL? UMA ANÁLISE DO PLANO DIRETOR CICLOVIÁRIO DO RECIFE	398

PAPEL DA BICICLETA NA PROMOÇÃO DA MICROACESSIBILIDADE DO CAMPUS USP CAPITAL BUTANTÃ	403
PARA ALÉM DA SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE DO IMUS COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA NA MOBILIDADE URBANA	408
PARQUE LINEAR, RUA COMPLETA? O CASO DAS “TRÊS RUAS” EM JOÃO PESSOA - PB	413
PERCEPÇÃO POPULAR DIANTE DA POSSIBILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE PEDÁGIO URBANO NA REGIÃO CENTRAL DE BRASÍLIA	418
PESSOAS IDOSAS E ACESSO AO TRANSPORTE COLETIVO: UMA REFLEXÃO SOBRE DISTÂNCIAS E VELOCIDADES DE CAMINHADA	423
PLANEJAMENTO URBANO E MOBILIDADE ATIVA: AVALIAÇÃO DA CAMINHABILIDADE NA AV. CÂNDIDO HARTMANN (CURITIBA) COM O ICAM 2.0	428
PLANNING CYCLING INFRASTRUCTURE BASED ON THE 15-MINUTE CITY CONCEPT: AN IFCA APPROACH	433
PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA ASSERTIVIDADE DE SISTEMAS DE TEMPO REAL NO TRANSPORTE PÚBLICO: ESTUDO DE CASO EM PORTO ALEGRE/RS	438
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA INTELIGENTE: ANÁLISE COM MÉTODO CONVENCIONAL E BASEADO EM IA NO CONTEXTO DOS PLANOS DE MOBILIDADE URBANA	443
STREET NETWORK SUSCEPTIBILITY TO FLOODING BASED ON THE HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND) MODEL: A CASE STUDY IN SALVADOR, BRAZIL	448
TRACK ELEVATION: UM PROCESSO ESCALÁVEL PARA OBTENÇÃO DE PERFIS ALTIMÉTRICOS UTILIZANDO MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO OPEN SOURCE	453
USO DE DADOS DE TELEFONIA MÓVEL APLICADOS À MOBILIDADE URBANA E A OBTENÇÃO DE MATRIZES ORIGEM-DESTINO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	458
USO DO SOFTGIS NA AVALIAÇÃO DA CAMINHABILIDADE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	463
Mobilidade e Acessibilidade - Comunicações técnicas	**468**
LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES: ANÁLISE MULTICRITÉRIO DA POSIÇÃO IDEAL DE INSTALAÇÕES TEMPORÁRIAS DE SAÚDE NAS CIDADES DA BAIXADA SANTISTA - SP	469
PERCEPÇÕES E RISCOS À CIRCULAÇÃO DE PATINETES ELÉTRICOS EM UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO	473
PLANEJAMENTO CICLOVIÁRIO COM BASE NA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS: UM OLHAR PARA FORTALEZA	477
PLANEJAMENTO DE MOBILIDADE URBANA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NO MUNICÍPIO DE RONDON DO PARÁ-PA	481
Mobilidade e Acessibilidade - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**485**
ANÁLISE E DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA EM SÃO CRISTÓVÃO/SE	486
CARACTERIZAÇÃO DAS DESIGUALDADES NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO TRABALHO DOS RESIDENTES NA PERIFERIA DE FORTALEZA E CAUCAIA	488
OS DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA EM ARACAJU/SE	491
OS DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA EM NOSSA SENHORA DO SOCORRO E BARRA DOS COQUEIROS/SE	493
Mobilidade e Acessibilidade - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**495**
ACESSIBILIDADE URBANA E SAÚDE PÚBLICA: UM ESTUDO GEOESPACIAL SOBRE O ACESSO AOS CENTROS DE SAÚDE EM BELO HORIZONTE	496
A INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA DE ACESSO NA UTILIZAÇÃO DE PARQUES URBANOS: UM ESTUDO DE CASO EMRIO VERDE - GO	499
ANÁLISE DAS ROTAS DE PEDESTRES E A INFLUÊNCIA DO AMBIENTE URBANO NA ESCOLHA DE CAMINHOS	503
DIAGNÓSTICO DA MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL EM FEIRA DE SANTANA, BAHIA	506
DIAGNÓSTICO DE DESIGUALDADES NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO TRABALHO DOS RESIDENTES NA PERIFERIA DE FORTALEZA E SUA REGIÃO METROPOLITANA	509
MOBILIDADE ATIVA DE CRIANÇAS NO DESLOCAMENTO PARA A ESCOLA	513
MOBILIDADE URBANA PARA IDOSOS NO CONTEXTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS BRASILEIRAS: ABORDAGEM POR MODELOS ECOLÓGICOS	516
Polos Geradores de Viagens - Artigos científicos	**519**

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA MOBILIDADE URBANA NO CAMPUS BACANGA-UFMA UTILIZANDO O IMSCAMP	520
ESTUDO SOBRE OS PADRÕES DE DESLOCAMENTO NO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO (UFOP), EM OURO PRETO (MG)	525
Uso do Solo e Transportes - Artigos científicos	**530**
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RODOVIA CUIABÁ-SANTARÉM (BR-163) NA TRANSFORMAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO NA AMAZÔNIA DE 1985 A 2023	531
AVALIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS FUTURAS DO MODELO MARS PORTO ALEGRE COM BASE NOS DADOS DO IBGE 2022	537
BAYESIAN MODELING OF AIRCRAFT NOISE COMPLAINTS AROUND CONGONHAS AIRPORT	542
CRITÉRIOS DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS DE MOBILIDADE COMPARTILHADA: UMA REVISÃO CRÍTICA DO ESTADO DA ARTE	547
DESAFIOS URBANOS E ODS: ESTUDO DE CASO DO COMPLEXO DA LAGOINHA EM BELO HORIZONTE	552
DESENHO DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO VARIÁVEIS DE USO DO SOLO - UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	557
ESTUDO EXPLORATÓRIO DA MATRIZ ORIGEM-DESTINO DA RMBH COM DADOS DE TELEFONIA MÓVEL: A QUESTÃO DA REPRESENTATIVIDADE ESTATÍSTICA DOS DADOS	562
EXISTE ASSIMETRIA NA PERCEPÇÃO DA CAMINHABILIDADE? UM ESTUDO A PARTIR DE VÍDEOS 2D E REALIDADE VIRTUAL IMERSIVA	567
EXPLORANDO A DINÂMICA ESPACIAL DOS ESTABELECIMENTOS COMERCIAIS EM BELO HORIZONTE PRÉ E PÓS-PANDEMIA	572
INFLUÊNCIA DO PERFIL FAMILIAR E DO AMBIENTE CONSTRUÍDO NA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL: UMA ABORDAGEM MULTINÍVEL	578
MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE RODOVIAS E VICINAIS PARA O ESTADO DO AMAZONAS COM BASE EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO	583
O TRANSPORTE CICLOVIÁRIO EM FORTALEZA E O CRESCIMENTO DO PROJETO BICICLETAR – UM ESTUDO DE CASO DA ESTAÇÃO 74	589
Uso do Solo e Transportes - Comunicações técnicas	**594**
JUSTIFICATIVA DA EQUIVALÊNCIA FUNCIONAL ENTRE ZONAS URBANAS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO	595
MAPEAMENTO DAS OCUPAÇÕES NO ENTORNO DAS FERROVIAS: ESTUDO DE CASO NA ÁREA URBANA DE SANTA MARIA - RS	599
Uso do Solo e Transportes - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**604**
ANÁLISE DE EMISSÕES DO TRANSPORTE E ZONEAMENTO URBANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS UTILIZANDO SENSORES DE BAIXO CUSTO	605
ANÁLISE MULTICRITÉRIO DOS IMPACTOS DO TRÁFEGO DE CARGAS EM VIAS URBANAS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-101 NO CONTORNO DO RECIFE	608
Modelagem do tráfego - Artigos científicos	**611**
AVALIAÇÃO DA PERCEPÇÃO DE CONDUTORES EM UM SIMULADOR DE DIREÇÃO VEICULAR EM CENÁRIOS COM DIFERENTES CONDIÇÕES AMBIENTAIS	612
AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO E OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA EM ROTATÓRIAS URBANAS: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE UNIVERSITÁRIA	617
CAPACITY DROP EXTENSION FOR THE CELL TRANSMISSION MODEL DEPENDENT ON UPSTREAM CONGESTION AND ON-RAMP FLOW	622
ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE CAR-FOLLOWING DO VISSIM APLICADOS À SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM REDES URBANAS	627
IMPACTO DA CONFIGURAÇÃO 2+1 EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES SOB CONDIÇÕES DE TRÁFEGO BRASILEIRAS	632
Modelagem do tráfego - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**637**
DESMISTIFCANDO O IMPACTO VIÁRIO DA CICLOFAIXA: UM ESTUDO COM PTV VISSIM NA AV. JOVITA FEITOSA - FORTALEZA/CE	638
Modelagem do tráfego - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**640**
AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SERVIÇO DE INFRAESTRUTURAS CICLOVIÁRIAS LOCALIZADAS EM RODOVIAS URBANIZADAS	641

CIDADES COMPLEXAS: APLICAÇÃO DA TEORIA DAS REDES COMPLEXAS NA ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES ENTRE TRÁFEGO E FORMA URBANA NA CIDADE DE ARACAJU/SE	644
CONFIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES RURAIS A PARTIR DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO	647
Análise e controle de tráfego - Artigos científicos	**650**
ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTIMATIVAS DE VELOCIDADE MÉDIA EM FORTALEZA: DADOS DE RADARES DE FISCALIZAÇÃO E API DISTANCE MATRIX DO GOOGLE	651
MODELAGEM ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE VIAGEM EM CONTEXTOS URBANOS: IMPACTOS NAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM	656
SWITCHING CONTROL LOGIC FOR DYNAMIC LANE CONFIGURATION ON FREEWAYS	661
Análise e controle de tráfego - Comunicações técnicas	**666**
COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE NÍVEIS DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES OBTIDOS POR MEIO DAS METODOLOGIAS DO HCM-6 E DO HCM-7	667
Análise e controle de tráfego - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**671**
ESTIMAÇÃO DE FATORES DE EQUIVALÊNCIA VEICULAR PARA MOTOCICLETAS EM INTERSEÇÕES SEMAFÓRICAS DE FORTALEZA	672
Fatores de risco associados à Segurança Viária - Artigos científicos	**675**
ACIDENTALIDADE FERROVIÁRIA NO BRASIL (2014–2024): UMA ANÁLISE HISTÓRICA E ESPACIAL	676
¿CÓMO INFLUYEN LOS FACTORES SOCIALES EN EL RIESGO DE ACCIDENTES URBANOS? EVIDENCIA EXPLORATORIA DE MUNICIPIOS COLOMBIANOS	681
ANÁLISE DOS EFEITOS DA PRECIPITAÇÃO NO COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DE CONDUTORES: UM ESTUDO NATURALÍSTICO DE DIREÇÃO	687
AVALIAÇÃO DAS ZONAS LIVRES DE OBSTÁCULOS EM RODOVIAS: SEGURANÇA VIÁRIA E DIRETRIZES NORMATIVAS	692
AVALIAÇÃO DE RISCOS ASSOCIADOS ÀS OCUPAÇÕES NO ENTORNO FERROVIÁRIO: ESTUDO DE CASO EM SANTA MARIA (RS)	697
COLETA DE DADOS SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NO BRASIL: IMPLICAÇÕES DA AUSÊNCIA DE PADRÕES PARA A CONSOLIDAÇÃO DO RENAEST	703
DIFERENÇAS NA PERCEPÇÃO DE RISCO EM PASSAGENS RODOFERROVIÁRIAS: IMPLICAÇÕES PARA A SEGURANÇA E GESTÃO DE RISCO	708
DISPOSITIVOS DE DRENAGEM RODOVIÁRIA COMO FATORES DE RISCO EM SAÍDA DE PISTA: TRANSPONIBILIDADE E SEGURANÇA LATERAL	714
EFEITOS DA IMPLANTAÇÃO DE FAIXA DEDICADA NA VELOCIDADE DE MOTOCICLISTAS EM VIA URBANA	719
FADIGA OCUPACIONAL E SEGURANÇA OPERACIONAL NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO URBANO: UMA REVISÃO APLICADA	724
FATORES INTERVENIENTES NA INTENÇÃO DE MOTOCICLISTAS RESPEITAREM A VELOCIDADE COM BASE NA TEORIA DO COMPORTAMENTO PLANEJADO ESTENDIDA	729
FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DE PARADA EM PONTOS DE DESCANSO: PERCEPÇÕES DE CAMINHONEIROS NO DISTRITO FEDERAL	734
IMPACTO DA PRECIPITAÇÃO NO COMPORTAMENTO DE CONDUTORES: UMA ABORDAGEM BASEADA EM ESTUDO NATURALÍSTICO DE DIREÇÃO	739
IMPACTO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E DE VISIBILIDADE NA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES EM RODOVIA	744
INFLUÊNCIA DO AMBIENTE URBANO SOBRE VELOCIDADES INSEGURAS: ANÁLISE ESPACIAL COM DADOS NATURALÍSTICOS DE DIREÇÃO E INDEXAÇÃO H3	749
INTERVENÇÕES EM INTERSEÇÕES DE VIA COLETORA COM CANTEIRO CENTRAL NA CIDADE DE MARINGÁ-PR	754
MODELO DE PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL PARA RODOVIAS DE PISTA SIMPLES A PARTIR DA CURVACIDADE ANTERIOR E POSTERIOR	759
OPERAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS EM DECLIVES LONGOS E ÍNGREMES: SIMULAÇÃO TÉRMICA DE FREIOS COM BASE NA NBR 10966-2	764
PERCEPÇÃO DE SEGURANÇA VIÁRIA NO ENTORNO ESCOLAR EM ÁGUAS LINDAS-GO: UMA ANÁLISE FATORIAL EXPLORATÓRIA	769
TRATAMENTO DE DEGRAU ENTRE A FAIXA DE TRÁFEGO E O ACOSTAMENTO EM LATERAL	774

ADJACENTE: SOLUÇÕES GEOMÉTRICAS E MATERIAIS EMPREGADOS	
Fatores de risco associados à Segurança Viária - Comunicações técnicas	**779**
ANÁLISE DE CONFLITO DE TRÁFEGO EM ROTATÓRIA URBANA: UM ESTUDO DE CASO	780
MONITORAMENTO DO EXCESSO DE VELOCIDADE EM VIAS DE SALVADOR E RECIFE NO ÂMBITO DA INICIATIVA BLOOMBERG PARA A SEGURANÇA VIÁRIA GLOBAL	784
Fatores de risco associados à Segurança Viária - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**788**
ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM INSTRUMENTO PSICOMÉTRICO PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MOTOCICLISTA EM RELAÇÃO AO RESPEITO À VELOCIDADE	789
Fatores de risco associados à Segurança Viária - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**791**
ESTUDO NATURALÍSTICO DO PERFIL DE CONDUÇÃO MOTOCICLISTAS POR APLICATIVO EM FORTALEZA	792
MODELAGEM E MICROSSIMULAÇÃO ESPACIAL HÍBRIDA NA AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA USUÁRIOS VULNERÁVEIS (VRUS) DE VIAS URBANAS	795
QUEIMADAS E INCÊNDIOS FLORESTAIS COMO FATORES TELEACOPLADOS DE RISCO CLIMÁTICO NA SEGURANÇA VIÁRIA	798
Gestão e modelagem da Segurança Viária - Artigos científicos	**801**
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO HIGHWAY SAFETY MANUAL E APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA ESTIMATIVA DE FREQUÊNCIA DE SINISTROS	802
ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE DE RADARES DE VELOCIDADE EM VIAS URBANAS DO RIO DE JANEIRO	807
ANÁLISIS GEOGRÁFICO DEL IMPACTO DE LA PANDEMIA POR COVID-19 EN LA MORTALIDAD POR SINIESTROS VIALES URBANOS	812
DESAFIOS DO USO DA REALIDADE VIRTUAL EM INSPEÇÕES DE SEGURANÇA VIÁRIA	818
EDUCAÇÃO E FISCALIZAÇÃO NA SEGURANÇA VIÁRIA: UMA ANÁLISE DE INDICADORES PARA UM TRÂNSITO SEGURO	823
ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO PARA MODELAGEM DA VELOCIDADE MÉDIA COM BASE EM CARACTERÍSTICAS DO MOTORISTA	828
VALIDAÇÃO DE CENÁRIO VIRTUAL A PARTIR DE SINALIZAÇÃO VERTICAL VIÁRIA	833
VISÃO E ANTECIPAÇÃO DE RISCO EM TRECHO CRÍTICO: AVALIAÇÃO DE SINALIZAÇÃO COMPLEMENTAR DE ADVERTÊNCIA ATRAVÉS DE MÉTRICAS PSICOFISIOLÓGICAS	838
Gestão e modelagem da Segurança Viária - Comunicações técnicas	**843**
ANÁLISE DE TENDÊNCIA DA SINISTRALIDADE VIÁRIA EM MUNICÍPIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO	844
CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA VIABILIDADE DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA BR-050/MG: TRECHO ARAGUARI – UBERLÂNDIA	848
GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DE MINAS GERAIS: RESULTADOS E LIÇÕES APRENDIDAS APÓS O PRIMEIRO ANO DE IMPLEMENTAÇÃO	852
INTEGRAÇÃO DO WAZE NA GESTÃO DA MALHA VIÁRIA DE MINAS GERAIS	856
Gestão e modelagem da Segurança Viária - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**861**
DESENVOLVIMENTO DE UM FRAMEWORK PARA PONDERAÇÃO DAS METODOLOGIAS IRAP, HSM E DENATRAN NA IDENTIFICAÇÃO DE LOCAIS CRÍTICOS	862
DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO AUTOMATIZADO PARA ANÁLISE DE CONFLITOS DE TRÁFEGO: APLICAÇÃO EM ROTATÓRIA URBANA DE RIO VERDE – GO	865
Gerenciamento da cadeia de suprimentos - Artigos científicos	**868**
ANÁLISE COMPARATIVA DAS ROTAS HEFA, ATJ E FT PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF) NO BRASIL	869
AVALIAÇÃO DO USO COMPARTILHADO DE DOCAS NA REDUÇÃO DO TEMPO DE PERMANÊNCIA DE CAMINHÕES EM CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO	875
DESPERDÍCIO DE FRUTAS E VEGETAIS NAS CEASAS BRASILEIRAS: PERCEPÇÕES DOS ATACADISTAS E SUAS PRÁTICAS LOGÍSTICAS	880
ESTRATÉGIAS PARA A MITIGAÇÃO DO DESPERDÍCIO DE FRUTAS E VEGETAIS: UMA CONTRIBUIÇÃO DE INDICADORES ASSOCIADOS À CADEIA DE SUPRIMENTOS	885
LOCALIZAÇÃO DE UM CLUSTER DE TRANSPORTES: O CASO DA RM DE GOIÂNIA	890

LOGÍSTICA AGROINDUSTRIAL E GÊMEOS DIGITAIS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	895
PROPOSTA DE MODELO HÍBRIDO PARA DIMENSIONAMENTO DE TECA: ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS FAA E MCKINSEY APLICADA AO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS	900
Transporte de carga e intermodalidade - Artigos científicos	**905**
ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS NA MOVIMENTAÇÃO INTERMODAL DE CARGAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL	906
AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PLANEJAMENTO DE ROTAS DE UMA EMPRESA DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS: ROTAS FIXAS X ROTAS FLEXÍVEIS POR DEMANDA	912
CONSOLIDAÇÃO DE CARGAS PARA OTIMIZAÇÃO DE TRANSFERÊNCIAS LOGÍSTICAS: UM ESTUDO SOBRE REDUÇÃO DE CUSTOS E EFICIÊNCIA OPERACIONAL	917
EXCESSO DE PESO EM RODOVIAS: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA SEGURANÇA E INFRAESTRUTURA	922
MODELAGEM DAS Q MELHORES SOLUÇÕES DE LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE TRANSBORDO PARA O TRANSPORTE DE REJEITOS DE MINERAÇÃO	927
MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA SELEÇÃO DE MODAIS, PORTOS E NAVIOS PARA A EXPORTAÇÃO DE SOJA BRASILEIRA	932
Transporte de carga e intermodalidade - Comunicações técnicas	**937**
ESTUDO DE VIABILIDADE DO MODAL FERROVIÁRIO COMO UMA OPÇÃO NO TRANSPORTE DE BENS DE CONSUMO PARA O ESTADO DO MATO GROSSO.	938
Transporte de carga e intermodalidade - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**942**
APLICAÇÃO DE DEEP LEARNING NA PREVISÃO DE DEMANDA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS	943
ROTEIRIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE RECARGA PARA FROTAS MISTAS: UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO MULTI-PERÍODO	946
Distribuição urbana de mercadorias - Artigos científicos	**949**
ANÁLISE DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS POR MOTOCICLISTAS QUE PRESTAM SERVIÇOS DE ENTREGA E TRANSPORTE INDIVIDUAL DE PESSOAS EM FORTALEZA	950
AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CONTEXTO OPERACIONAL NA AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS À BATERIA UTILIZANDO MODELOS HIERÁRQUICOS LINEARES (HLM2)	955
EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA ACESSIBILIDADE A ARMAZÉNS LOGÍSTICOS EM FORTALEZA	961
FALHAS DE ENTREGA NO COMÉRCIO ELETRÔNICO: EXPLORANDO PADRÕES OPERACIONAIS E DE USO DO SOLO	966
LOCALIZAÇÃO DE DOMICÍLIOS E ESTABELECIMENTOS NA REDE VIÁRIA DE FAVELAS BRASILEIRAS: IMPLICAÇÕES PRÁTICAS PARA A LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA	971
MODOS ATIVOS DE TRANSPORTE NA ÚLTIMA MILHA DO COMÉRCIO ELETRÔNICO: AVALIANDO O ACESSO DOS CONSUMIDORES AOS DELIVERY LOCKERS	976
OTIMIZAÇÃO DA CADEIA LOGÍSTICA DA BANANA-DA-TERRA EM PALMIRA, COLÔMBIA	981
OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE ROTEAMENTO SUSTENTÁVEL DO TRANSPORTE DE CARGAS COM APLICAÇÃO DE SIG E NSGA-III NA MALHA VIÁRIA DO RIO DE JANEIRO	986
Distribuição urbana de mercadorias - Comunicações técnicas	**991**
LOGÍSTICA DA ÚLTIMA MILHA: PERSPECTIVAS PARA MELHORAR AS ENTREGAS EM ÁREAS URBANAS QUANDO O DESTINATÁRIO ESTÁ AUSENTE	992
PLANEJAMENTO DA ÚLTIMA MILHA: ESTUDO DE DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS EM ENTREGAS DOE-COMMERCE	996
Distribuição urbana de mercadorias - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**1000**
ENTREGAS NOTURNAS NA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA DO E-COMMERCE BRASILEIRO: UM ESTUDO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES	1001
Distribuição urbana de mercadorias - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1003**
LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA: ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS COM ÊNFASE EM ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE	1004
OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO PARA A EQUIDADE DAS ENTREGAS DE ÚLTIMA MILHA DOE-COMMERCEEM ASSENTAMENTOS URBANOS INFORMAIS	1007
Logística humanitária - Artigos científicos	**1010**

APLICACIÓN DE TEORÍA DE COLAS PARA OPTIMIZAR EL SISTEMA DE ATENCIÓN PREHOSPITALARIA DE BOGOTA D.C.	1011
GESTÃO LOGÍSTICA NA RESPOSTA A DESASTRES: DESENVOLVIMENTO DE UM FRAMEWORK PARA A LOGÍSTICA HUMANITÁRIA NO BRASIL	1017
IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO NO MÉTODO ε-CONSTRAINTPARA RESOLVER DOIS PROBLEMAS BIOBJETIVOS DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS DURANTE A COVID-19	1022
MODELO MATEMÁTICO PARA UM PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO DE REPATRIAÇÃO APLICADO EM CENÁRIO DE DESASTRE DE INÍCIO SÚBITO	1027
Logística reversa - Artigos científicos	**1033**
APLICAÇÕES DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO EM CIDADES INTELIGENTES	1034
LOGÍSTICA REVERSA E ASPECTOS SUSTENTÁVEIS NA GESTÃO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE: OTIMIZAÇÃO DE ROTAS E CARBONO EVITADO	1039
O PROBLEMA DOS CARTEIROS GÊMEOS: RESULTADO DA APLICAÇÃO NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DE ANDRADINA E JALES	1044
Avaliação Econômica, Regulação e Financiamento de Transportes - Artigos científicos	**1049**
A INFLUÊNCIA DA DENSIDADE RODOVIÁRIA NA COMPLETUDE DAS CADEIAS DE SOJA E MILHO E NO DESEMPENHO ECONÔMICO MUNICIPAL	1050
ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS CONTRATUAIS NA GESTÃO DE RODOVIAS	1055
ANÁLISE DO IMPACTO DOS INCENTIVOS MUNICIPAIS FINANCEIROS NA DEMANDA POR TRANSPORTE COLETIVO EM FLORIANÓPOLIS/SC	1060
A RETOMADA DOS AEROPORTOS NO CONTEXTO PÓS-COVID-19: UMA REVISÃO COM ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	1065
AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE PROJETO NA ACCV DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DA REABILITAÇÃO POR SELAGEM DE TRINCAS	1070
COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DO TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS NOS MÉTODOS ANTP, GEIPOT E NEC	1075
CONCESSÃO E RELICITAÇÃO DE AEROPORTOS BRASILEIROS: UM OLHAR SOBRE NATAL E VIRACOPOS	1080
CONCESSÕES AEROPORTUÁRIAS EM FORTALEZA, RECIFE E SÃO GONÇALO DO AMARANTE: ESTRUTURA CONTRATUAL E IMPLICAÇÕES REGULATÓRIAS	1086
CUSTO DE CAPITAL REGULATÓRIO EM CONCESSÕES DE INFRAESTRUTURA: REVISÃO CRÍTICA E PERSPECTIVAS PARA O SETOR METROVIÁRIO	1092
DESAFIOS REGULATÓRIOS E CONCORRENCIAIS NOS TRANSPORTES DIGITAIS NO BRASIL: IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS NAS DECISÕES DO CADE	1097
ELASTICIDADE DEMANDA-TARIFA NO TRANSPORTE PÚBLICO: ESTUDO DE CASO DOS MUNICÍPIOS DE BELO HORIZONTE, BETIM E CONTAGEM (MG)	1103
FINANCIAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO POR MEIO DE AGREGAÇÃO DE VALOR: O CASO DA BR 430	1108
FINANCIAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE PASSAGEIROS: RECEITAS NÃO-TARIFÁRIAS E BOAS PRÁTICAS INTERNACIONAIS	1113
TRABALHO RETIRADO DA PUBLICAÇÃO	1118
IMPACTO DAS EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO DE SISTEMA BRT SOB O SISTEMA DE SAÚDE	1123
MAIS DÍVIDA, MAIS RETORNO? A RELAÇÃO ENTRE CAPITAL DE TERCEIROS E RENTABILIDADE NAS CONCESSÕES FERROVIÁRIAS BRASILEIRAS	1129
METODOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES POLUENTES POR VEÍCULOS RODOVIÁRIOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	1134
MODELOS DE CONTRATAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO: UMA REFLEXÃO SOBRE PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E PRAZOS	1139
O REGIME JURÍDICO DAS DEBÊNTURES INCENTIVADAS DE INFRAESTRUTURA E SEUS EFEITOS NOS CONTRATOS DE CONCESSÃO FERROVIÁRIA	1144
PONTOS DE PARADA E DESCANSO PARA CAMINHONEIROS EM RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ANÁLISE DA ATUAÇÃO REGULATÓRIA DA ANTT	1149
POTENCIAIS DE PECUÁRIA E SEU PAPEL NA ESTRATÉGIA DE FINANCIAMENTO DE	1154

INFRAESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-020	
SOLUÇÕES DE PAVIMENTAÇÃO PARA ESTRADAS RURAIS DE BAIXO VOLUME: COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA EM ESTRADA DO MUNICÍPIO DE MISSAL-PR	1159
VIABILIZANDO O INVESTIMENTO VIÁRIO POR MEIO DO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL: ESTUDO DO CASO DA BR-020	1164
Avaliação Econômica, Regulação e Financiamento de Transportes - Comunicações técnicas	**1169**
A CONTABILIDADE GERENCIAL COMO APOIO ESTRATÉGICO À GESTÃO NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO	1170
SISTEMA DE TRANSPORTE SUPLEMENTAR DE BELO HORIZONTE: ANÁLISE DA OFERTA, DEMANDA E DESEMPENHO OPERACIONAL	1174
Avaliação Econômica, Regulação e Financiamento de Transportes - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1178**
ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DA MANUTENÇÃO DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO EM TRECHOS CONCEDIDOS DA BR-116	1179
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE AEROPORTOS SOB A ÓTICA DAS COMPANHIAS AÉREAS	1182
DEBÊNTURES, GOVERNANÇA E CONCENTRAÇÃO NO SETOR FERROVIÁRIO: BARREIRAS ESTRUTURAIS AO FINANCIAMENTO DE LONGO PRAZO NO BRASIL	1185
MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS DE RANSOMWARE NO SETOR DE TRANSPORTES	1188
UMA ANÁLISE COMPARATIVA DAS POLÍTICAS DE PRICING NOS PORTOS ORGANIZADOS BRASILEIROS	1191
Políticas Públicas de Transportes - Artigos científicos	**1194**
ANÁLISE COMPARATIVA DO PROCESSO DE CÁLCULO PARA O REPASSE DO PNATE	1195
ANÁLISE DA DINÂMICA DE DESLOCAMENTOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE COM BASE NA REGIC E DADOS SOCIECONÔMICOS	1199
ANÁLISE DA REDUÇÃO DA ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS FEDERAIS BRASILEIRAS USANDO SÉRIES TEMPORAIS INTERROMPIDAS	1204
ATITUDE DA POPULAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL EM RELAÇÃO À TARIFA ZERO NO TRANSPORTE PÚBLICO	1209
AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA NO RECIFE: UMA ANÁLISE BASEADA EM INDICADORES	1214
BICYCLE ROBBERY TARGETING CYCLISTS DURING THEIR TRIP: STREET-LEVEL ANALYSIS OF SPATIAL PATTERNS AND RISK FACTORS	1219
CICLO DE VIDA DO TRANSPORTE FLUVIAL DE PASSAGEIROS NA AMAZÔNIA: PROPOSTA DE POLÍTICA PÚBLICA PARA UMA MATRIZ ENERGÉTICA LIMPA	1225
CONFIABILIDADE DOS DADOS DE SINISTROS E ESTRATÉGIAS PARA ANÁLISE ESPACIAL: APLICAÇÕES NO PROJETO DE AVALIAÇÃO DA FAIXA AZUL EM SÃO PAULO	1230
CRITÉRIOS PARA A CRIAÇÃO DE PONTOS DE PARADA E DESCANSO PARA CAMINHONEIROS EM RODOVIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	1235
DESAFIOS DA MOBILIDADE ESTUDANTIL NO SUL DA BAHIA: UM DIAGNÓSTICO PARTICIPATIVO ENTRE ITABUNA E ILHÉUS	1240
DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES PARA O TRANSPORTE ESCOLAR NO BRASIL: FUNDAMENTOS TEÓRICOS, METODOLOGIA E APLICAÇÕES INICIAIS	1245
DIAGNÓSTICO DA MOBILIDADE DE ITAPORANGA-PB A PARTIR DA APLICAÇÃO DOÍNDICE DE MOBILIDADE URBANA PARA CIDADES DE PEQUENO PORTE	1250
FAIXA AZUL E SEGURANÇA VIÁRIA: ESTIMANDO EFEITOS CAUSAIS SOBRE SINISTROS VIÁRIOS	1255
FATORES DETERMINANTES DA DEMANDA POR TRANSPORTE FERROVIÁRIO URBANO: EVIDÊNCIAS DO METROREC NO CONTEXTO PRÉ E PÓS-PANDEMIA	1260
GOVERNANÇA METROPOLITANA E GESTÃO INTEGRADA DO TRANSPORTE: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E REVISÃO SISTEMÁTICA	1266
ILHAS CICLÁVEIS: ANÁLISE DO ISOLAMENTO E DA BAIXA INTEGRAÇÃO DO SISTEMA BIKE-PE NO CAMPUS DA UFPE	1271
IMPACTOS DA TARIFA ZERO NA MOTORIZAÇÃO URBANA: ANÁLISE MULTIVARIADA DE 44 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS	1276
MAPEAMENTO DA VINCULAÇÃO ENTRE POLÍTICAS DE MOBILIDADE E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 2030	1282

MARCO CONCEITUAL PARA ATUALIZAÇÃO HIDROVIÁRIA DO SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO: RESOLVENDO UMA LACUNA DE QUARENTA ANOS	1287
METODOLOGIA DE REPASSE DOS RECURSOS DO PNATE: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO ATUAL E O SEU ANTECESSOR	1292
MOBILIDADE ATIVA EM PORTO ALEGRE: PADRÕES DE USO DA BICICLETA EM DESLOCAMENTOS PARA INSTITUIÇÕES DE ENSINO E SAÚDE	1297
MOBILIDADE E MILITÂNCIA: A ATUAÇÃO DE GRUPOS ATIVISTAS EM BELO HORIZONTE E REGIÃO METROPOLITANA	1302
MOBILIDADE URBANA NO RECIFE - PE: DESAFIOS DA TRANSIÇÃO MODAL E DA PRIORIDADE AO TRANSPORTE COLETIVO	1307
O IMPACTO DA EXPANSÃO DA INFRAESTRUTURA NA DEMANDA DE SISTEMAS DE BICICLETAS COMPARTILHADAS: UM ESTUDO DE CASO PREDITIVO EM FORTALEZA	1312
O PARADIGMA DAS CIDADES LENTAS PERANTE A MOBILIDADE E A ACESSIBILIDADE URBANAS SUSTENTÁVEIS: O CASO DO MUNICÍPIO DE SOCORRO, SP	1318
O TRATAMENTO DOS CENTROS HISTÓRICOS NOS PLANOS DE MOBILIDADE URBANA: UM ESTUDO EM ALGUMAS CAPITAIS BRASILEIRAS	1324
PERCEPÇÕES DE ESPECIALISTAS DA ÁREA DA SAÚDE SOBRE OS EFEITOS DOS DESLOCAMENTOS PROLONGADOS NO TRÂNSITO	1329
PLANOS DE MOBILIDADE URBANA NO BRASIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTEMATIZADA DA LITERATURA	1334
PROGRAMA NACIONAL DE APOIO AO TRANSPORTE DO ESCOLAR (PNATE): ANÁLISE DO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE RECURSOS	1339
QUALIDADE DE SERVIÇO NO BRT NORTE–SUL DE GOIÂNIA: UMA ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO	1344
SETE E A TRANSFORMAÇÃO INSTITUCIONAL: MODERNIZAÇÃO, PARTICIPAÇÃO SOCIAL E DESAFIOS NA GESTÃO DO TRANSPORTE ESCOLAR	1349
Políticas Públicas de Transportes - Comunicações técnicas	**1354**
O IMPACTO DO SUBISÍDIO PÚBLICO NA TARIFA DO TRANSPORTE COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS EM RIO VERDE-GO	1355
Políticas Públicas de Transportes - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**1359**
GOVERNANÇA DA MOBILIDADE COMO UM SERVIÇO (MAAS): REFLEXÕES SOBRE O CONTEXTO DE SÃO PAULO E A AGENDA 2030	1360
Políticas Públicas de Transportes - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1363**
INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DA TARIFA NA DINÂMICA URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO	1364
Avaliação Socioeconômica de Transportes - Artigos científicos	**1367**
A FAIXA AZUL SOB A ÓTICA DE MOTOCICLISTAS ENTREGADORES: SEGURANÇA, COMPORTAMENTO E INFRAESTRUTURA URBANA	1368
A INFLUÊNCIA DAS REDES DE RODOVIAS NA CONECTIVIDADE ESPACIAL E NA ATRATIVIDADE TERRITORIAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	1373
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA SOCIAL INTEGRADA EM AEROPORTOS BRASILEIROS:UMA ABORDAGEM EM DOIS ESTÁGIOS COM DEA NETWORK	1378
CUSTOS DE ATENDIMENTO PÚBLICO RODOVIÁRIO EM ACIDENTES NAS RODOVIAS FEDERAIS DO RIO GRANDE DO NORTE EM 2024	1383
DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO DE TRANSPORTE ESCOLAR: REFLEXÕES A PARTIR DA EXPERIÊNCIA DO SISTEMA SETE	1389
EFEITOS ECONÔMICOS DOS DIFERENTES MODOS DE TRANSPORTE SOBRE OS SETORES PRODUTIVOS BRASILEIROS	1394
IMPACTOS ECONÔMICOS DE INVESTIMENTOS EM FERROVIAS: MATRIZ DE INSUMO PRODUTO COM CHOQUES SETORIAIS AGREGADOS E DESMEMBRADOS	1399
METODOLOGIA PARA GESTÃO METROPOLITANA E ORDENAMENTO TERRITORIAL EM CORREDORES VIÁRIOS ARTERIAIS	1404
O QUE OS USUÁRIOS VALORIZAM NO METRÔ? UMA ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS CARIOCAS	1410
PESQUISA DE SATISFAÇÃO COM OS USUÁRIOS DE ÔNIBUS DE JAGUARIÚNA SP E PLANO DE AÇÃO PARA MELHORAR O SISTEMA	1415

PLANEJAMENTO E DESAFIOS DO BRT EM CIDADES LATINO-AMERICANAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM ÊNFASE NO CASO DE BOGOTÁ	1420
TELETRABALHO, MOBILIDADE URBANA E QUALIDADE DE VIDA: EVIDÊNCIAS DO CONTEXTO BRASILEIRO	1425
TRANSPORTE COMO ELO INTEGRADOR DA ECONOMIA: ANÁLISE DE REDE DAS RELAÇÕES INTERSETORIAIS DE POSSE-GO	1430
Avaliação Socioeconômica de Transportes - Comunicações técnicas	**1435**
ANÁLISE DA REDE DE TRANSPORTES TERRESTRES DO RIO GRANDE DO SUL FRENTE ÀS PROJEÇÕES DO PLANO ESTADUAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES	1436
Avaliação Socioeconômica de Transportes - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1441**
APLICAÇÃO INTEGRADA DOS MÉTODOS AHP E LCCA PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE DE GRANDES PROJETOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO NO RODOANEL DA RMBH	1442
PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE EM FAVELAS	1446
Transporte e Inclusão Social - Artigos científicos	**1450**
A ÚLTIMA MILHA COMO DESAFIO DE EQUIDADE: ESTUDO DO SERVIÇO DE TRANSPORTE EM VILAS E FAVELAS DE BELO HORIZONTE – MG	1451
A FUNÇÃO SOCIAL DA PROPRIEDADE NO BAIRRO ALTO DAS POMBAS: ANÁLISE DOS INSTRUMENTOS DO ESTATUTO DA CIDADE E SUA APLICAÇÃO	1457
A QUALIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE SOB A PERSPECTIVA DE GEHL	1462
ASSOCIAÇÃO ENTRE ACESSIBILIDADE E POBREZA: UM ESTUDO COM MODELAGEM DE EQUAÇÕES ESTRUTURAIS	1467
FRAGMENTAÇÃO URBANA E DESERTOS DE SERVIÇOS: EVIDÊNCIAS ESPACIAIS NA CIDADE DO RECIFE	1472
LOVE'S IN THE AIR? AIR RAGE: SINAL DE UMA AVIAÇÃO EM TURBULÊNCIA AFETIVA	1477
MOBILIDADE DO CUIDADO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	1482
O ACESSO AO TRANSPORTE CICLOVIÁRIO DOS MORADORES DE HABITAÇÃO SOCIAL EM FORTALEZA COMO SOLUÇÃO DE MOBILIDADE	1487
O TRANSPORTE COMO REFLEXO DA DESIGUALDADE URBANA NO RECIFE-PE: O CONTRASTE DE ACESSIBILIDADE ENTRE COHAB E AFOGADOS	1492
PERSONASCOMO REPRESENTANTES DE USUÁRIOS POTENCIAIS DE UMA NOVA LINHA DE METRÔ: O CASO DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO (LINHA 3)	1497
QUANDO A OFERTA É ESCASSA, QUEM MAIS IMPORTA? A PRIORIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSPORTE PÚBLICO EM CENÁRIOS DE GREVE	1502
QUEM ANDA DE TRANSPORTE PÚBLICO? GÊNERO, RENDA E TERRITÓRIO EM TRÊS CIDADES LATINO-AMERICANAS	1507
RESULTADO DA PESQUISA COM AGENTES DE OPERAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO DE BRASÍLIA PARA TREINAMNETO DE ATENDIMENTO A PASSAGEIROS AUTISTAS	1512
SAÚDE MENTAL DE MOTORISTAS DO TRANSPORTE COLETIVO URBANO E SUA RELAÇÃO COM A ESCALA DE TRABALHO	1517
TREINAMENTO DE INDIVIDUOS AUTISTAS PARA UTILIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	1522
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS COMO POLO GERADOR DE VIAGENS: INVISIBILIDADE DIANTE DOS DESAFIOS DE MOBILIDADE NO CAMPUS	1527
VIVENCIANDO AS CIDADES PARA AS PESSOAS: RELATO DE EXPERIÊNCIA NA 24ª EDIÇÃO DO EVENTO DOMINGO NO CAMPUS	1532
Transporte e Inclusão Social - Comunicações técnicas	**1537**
IMPACTOS DE BARREIRAS À ACESSIBILIDADE EM ROTAS URBANAS PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	1538
Transporte e Meio Ambiente - Artigos científicos	**1543**
ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: INVESTIGAÇÃO DA SENSIBILIDADE CONSIDERANDO DIFERENTES PORCENTAGENS DE ÁREA TRINCADA	1544
AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE HVO E DA NECESSIDADE DE HIDROGÊNIO VERDE PARA A DESCARBONIZAÇÃO DOS PORTOS	1549
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE COLETIVO DO	1554

DISTRITO FEDERAL ATRAVÉS DO ÓLEO VEGETAL HIDROTRATADO (HVO)	
CARACTERIZAÇÃO DE ZONAS DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA SOB A PERSPECTIVA DA URBANIZAÇÃO E DO TRANSPORTE DE CARGA	1559
CIDADES ESPONJA E INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE: CONEXÕES ENTRE SUSTENTABILIDADE URBANA E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA	1564
CONTRIBUIÇÃO DO BIODIESEL PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO2 E MATERIAL PARTICULADO	1569
DESEMPENHO DAS ROTAS LOGÍSTICAS DE EXPORTAÇÃO DE SOJA: UMA ABORDAGEM ECONÔMICA E AMBIENTAL	1574
DIREITO À CIDADE, MOBILIDADE E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO URBANO A PARTIR DE PLANOS MUNICIPAIS	1579
EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E A APLICAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO NAS OPERAÇÕES LOGÍSTICAS EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA EM 2024	1584
ESTRATÉGIAS DE MOBILIDADE SUSTENTÁVEL EM ESCOLAS FRANCESAS NO ÂMBITO DA EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: INSPIRAÇÕES PARA O BRASIL	1588
EXPLORANDO SISTEMAS DE COMPARTILHAMENTO DE BICICLETAS: UM ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO	1593
EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO RUÍDO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO: A IMPORTÂNCIA DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA PARA A QUALIDADE DE VIDA	1598
IMPORTÂNCIA DA RENOVAÇÃO DA FROTA: TEMPO DE USO DO MOTOR	1603
MOBILIDADE URBANA E SUSTENTABILIDADE: ESTUDO COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO2 PARA ACESSO AO AEROPORTO DE JOINVILLE	1608
MUDANÇA CLIMÁTICA E DESAFIOS PARA MANUTENÇÃO DA NAVEGABILIDADE EM HIDROVIAS: UMA PROPOSTA DE GOVERNANÇA	1613
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E FRONTEIRA AGRÍCOLA EM TRANSIÇÃO: IMPLICAÇÕES SOBRE A LOGÍSTICA	1618
O MODELO MRV NA LOGÍSTICA SUSTENTÁVEL: DESAFIOS E AVANÇOS NA MENSURAÇÃO, RELATO E VERIFICAÇÃO DE PRÁTICAS ESG	1623
OTIMIZAÇÃO DE EMISSÕES NO TRANSPORTE DE SOJA NA AMAZÔNIA: UM MODELO PARA SUSTENTABILIDADE	1628
POTENCIAL DO USO DO BIOMETANO NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL	1633
PREVISÃO DAS EMISSÕES DE CO2 NO TRANSPORTE DE SOJA BRASILEIRA PARA EXPORTAÇÃO: APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS	1638
QUAL A INFLUÊNCIA DOS DEFEITOS DOS PAVIMENTOS NAS EMISSÕES VEICULARES? UMA REVISÃO DA LITERATURA	1644
SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA E A RESILIÊNCIA DO TRANSPORTE HIDROVIÁRIO INTERIOR FRENTE À MUDANÇA DO CLIMA	1649
TRANSPORTE DE MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: A EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2) E O TRANSPORTE MULTIMODAL	1654
UMA AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DOS IMPACTOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS, AUTÔNOMOS OU COMPARTILHADOS NA MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL	1659
Transporte e Meio Ambiente - Comunicações técnicas	**1664**
RESILIÊNCIA DE INFRAESTRUTURA E REDES DE TRANSPORTE A EVENTOS CLIMÁTICOS DISRUPTIVOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	1665
Transporte e Meio Ambiente - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**1670**
LOGÍSTICA DA SOJA NA AMAZÔNIA: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS ALINHADAS AOS ODS	1671
REVISÃO DE LITERATURA SOBRE EMISSÕES E TRANSPORTE: APLICAÇÕES ESTATÍSTICAS NA PREVISÃO E AVALIAÇÃO DE POLUENTES	1673
Transporte e Meio Ambiente - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1675**
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO DRENANTE EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL	1676
COMO TRANSFORMAR CAMPINAS EM UMA CIDADE VERDE–ENFATIZANDO A MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL	1679
IMPACTO DA REDUÇÃO DO LIMITE DE VELOCIDADE EM ÁREAS URBANAS NAS EMISSÕES	1682

ATMOSFÉRICASlim	
IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NOS PORTOS BRASILEIROS: CAMINHOS PARA ADAPTAÇÃO FRENTE À MUDANÇA DO CLIMA	1685
Avaliação e Reabilitação de Pavimentos - Artigos científicos	**1688**
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS TRADICIONAL E AUTOMATIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO PCI EM PAVIMENTOS URBANOS	1689
AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS COM FWD E TSD EM CONDIÇÕES CONTROLADAS DE REPETIBILIDADE	1694
AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM UMA AMOSTRA DE RODOVIAS NO DISTRITO FEDERAL COM O MERLIN	1699
COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS ESTÁTICO (FWD) E DINÂMICO (TSD)	1704
FATOR DE CORREÇÃO DE TEMPERATURA PARA MÓDULOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONSIDERANDO VISCOELASTICIDADE LINEAR E DADOS BRASILEIROS	1709
USO DE FOTOGRAMETRIA DIGITAL COM CÂMERA DESMARTPHONENA INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS	1714
Avaliação e Reabilitação de Pavimentos - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1719**
AVALIAÇÃO DE MISTURAS RECICLADAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFALTICA: PARAMETROS MECANICOS E FUNCIONAIS	1720
RECICLAGEM COM EMULSÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM BASES LATERÍTICAS – ESTUDO LABORATORIAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	1723
Dimensionamento e Modelagem Computacional de Pavimentos - Artigos científicos	**1726**
ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS EMPREGADOS EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	1727
ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MISTURAS AFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO COM BAIXOS TEORES DE RAP	1733
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DEFLEXÃO VISCOELÁSTICA DE UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO SOB A AÇÃO DO TRÁFEGO E DA TEMPERATURA	1738
AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS RECICLADAS COM USO DO SOFTWARE FLEXPAVE COM FOCO NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	1743
AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA FADIGA EM UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO VIA MEF COM BASE NO MÓDULO DE RELAXAÇÃO	1748
CONTRIBUIÇÃO DE DIFERENTES CAMADAS NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: APLICAÇÃO DO CAP3D-D EM RODOVIAS FEDERAIS	1753
CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO DO SUBLEITO: AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS DEFLEXÕES E SEUS EFEITOS NO DESEMPENHO DO PAVIMENTO	1758
CORPOS DE PROVA VIRTUAIS 3D DE BGTC: ABORDAGEM DEM	1763
DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES EM CAMADAS DE BASE: UMA ABORDAGEM DE CLASSIFICAÇÃO	1768
INTER-RELAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADE E RIGIDEZ DINÂMICA EM CAMADA POROSA DE ATRITO: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E FUNDAMENTOS EXPERIMENTAIS	1773
METODOLOGIA PARA TRADE-OFF NA OTIMIZAÇÃO DE PAVIMENTOS FERROVIÁRIOS UTILIZANDO SOFTWARE SYSTRAIN	1778
Dimensionamento e Modelagem Computacional de Pavimentos - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1783**
PREDIÇÃO ESPACIAL DE COEFICIENTES DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM SOLOS CEARENSES PARA PAVIMENTAÇÃO	1784
SIMPLIFICAÇÃO DA ANÁLISE DO TRINCAMENTO POR FADIGA NO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO BRASILEIRO	1787
Materiais Alternativos - Artigos científicos	**1790**
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO ÓLEO DE LINHAÇA PARA UTILIZAÇÃO COMO AGENTE REJUVENESCEDOR DE ASFALTOS ENVELHECIDOS	1791
ANÁLISE ESTRUTURAL DE CAMADAS DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO CONTENDO AREIA DE MINERAÇÃO, POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA	1796
ANÁLISE QUÍMICA POR FTIR DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM SEIVAEUPHORBIA TIRUCALLI	1801

AVALIAÇÃO DO USO DE GEOPOLÍMERO BASEADO EM CINZA VOLANTE PARA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE UM SOLO ARGILOSO	1806
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COMSEIVA DE EUPHORBIA TIRUCALLI	1811
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO	1816
DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM RAP E RESÍDUO DE BAUXITA	1820
DESENVOLVIMENTO DE POZOLANA DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA USO COMO ESTABILIZANTE QUÍMICO EM SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO	1825
EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	1830
ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE COPRODUTO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO SOLUÇÕES POLIMÉRICAS	1835
IMPACTO DA INCORPORAÇÃO DE DIFERENTES TEORES DE FIBRA DE SISAL EM FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	1840
PLÁSTICOS RECICLADOS COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL: UMA AVALIAÇÃO TEÓRICA SOBRE O AVANÇOS E DESAFIOS NA MODIFICAÇÃO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS	1845
SOLO-CINZA DE EUCALIPTO PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	1850
Materiais Alternativos - Comunicações técnicas	**1855**
GESTÃO SUSTENTÁVEL DA LOGÍSTICA REVERSA DO RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) NO BRASIL: EFICIÊNCIA, DESAFIOS E LIÇÕES INTERNACIONAIS	1856
Materiais Alternativos - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1861**
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM ÓLEO DE PALMA COMO AGENTE REJUVENESCEDOR	1862
CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARCO)	1865
Aspectos Ambientais em Pavimentação - Artigos científicos	**1868**
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES MODIFICADOS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA PRESIDENTE DUTRA - CCR	1869
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DO APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA DE PAVIMENTOS DRENANTES E USO PARA FINS NÃO POTÁVEIS EM EDIFICAÇÕES	1874
AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA RESILIÊNCIA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NA CIDADE DE SÃO PAULO	1879
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DAS IRREGULARIDADES DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO NOS PADRÕES DE EMISSÕES VEICULARES	1884
EFEITOS AMBIENTAIS RELACIONADOS A FALTA DE CONTROLE TECNOLÓGICO NA CONSTRUÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	1889
EFEITOS DA ESCOLHA DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE FATORES DE EMISSÃO DE CO_2 NAS DECISÕES DE PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DE UM VIADUTO	1894
GEOSSINTÉTICOS E RESÍDUOS DE BRITAGEM NA ESTABILIZAÇÃO DE SUBLEITOS: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	1899
IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À QUEIMA DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS NA USINAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	1904
PAVIMENTOS TERMOCROMÁTICOS COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAÇÃO DE CALOR URBANO: AVALIAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA SUPERFICIAL	1909
SUSTENTABILIDADE NA PAVIMENTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO NA FRESAGEM E RECONSTITUIÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	1914
Aspectos Ambientais em Pavimentação - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1919**
AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS: ATIVAÇÃO DO LIGANTE DO RAP E TEXTURA DOS AGREGADOS PARA A LONGEVIDADE DE PAVIMENTOS	1920
Gestão de Pavimentos - Artigos científicos	**1923**
ANÁLISE DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PLANO DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS	1924
AVALIAÇÃO DO USO DO LIDAR EMSMARTPHONESPARA CLASSIFICAÇÃO DE BURACOS	1929
ESTUDO CORRELACIONAL ENTRE O ÍNDICE DE CONDIÇÃO DO PAVIMENTO (ICP) E INDICADORES SOCIOECONÔMICOS NO BAIRRO DE BATISTA CAMPOS BELÉM-PA	1934

INSTRUMENTAÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS CONSTRUÍDOS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO	1939
MODELAGEM 3D POR FOTOGRAMETRIA DE DEFEITOS BURACO EM SUPERFÍCIE ASFÁLTICA	1944
SMARTPHONES COMO FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DE IRI: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL	1949
USO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DO ÍNDICE INTERNACIONAL DE IRREGULARIDADE: UMA REVISÃO DE LITERATURA	1954
Gestão de Pavimentos - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**1959**
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA DE CONCRETO ASFÁLTICO	1960
Gestão de Pavimentos - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1962**
CALIBRAÇÃO DE MODELOS DO HDM-4 PARA EVOLUÇÃO DO IRI EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE MINAS GERAIS COM TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA	1963
PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA NA PERSPECTIVA DO CONFORTO	1966
Ligantes para Pavimentos Flexíveis - Artigos científicos	**1969**
ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURADE USINAGEM E COMPACTAÇÃO PARA ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO	1970
ESTUDO SOBRE A VARIABILIDADE ENTRE REMESSAS DE ASFALTO-BORRACHA AB8	1975
INFLUÊNCIA DE ÓLEOS VEGETAIS COMO REDUTORES DE VISCOSIDADE EM LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM BORRACHA DE PNEUS	1980
INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO LINEAR VISCOELÁSTICO E DE PERFORMANCE À FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE LIGANTE MODIFICADO COM FIBRA DE AÇO	1985
RELAÇÃO ENTRE A ESTRUTURA MOLECULAR E A RESISTÊNCIA À FADIGA EM LIGANTES ASFÁLTICOS BRASILEIROS	1990
Ligantes para Pavimentos Flexíveis - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**1995**
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECICLABILIDADE DE MATERIAIS ASFÁLTICOS FRESADOS POR MEIO DA ANÁLISE DA LUBRICIDADE DO LIGANTE	1996
ESTUDO COMPARATIVO DO NÍVEL DE ENVELHECIMENTO DE CURTOPRAZO DE LIGANTES ASFÁLTICOS	2000
Misturas Asfálticas ou com Ligantes Alternativos - Artigos científicos	**2003**
ÍNDICE REOLÓGICO BTSV DE ASFALTOS MODIFICADOS POR BIOMASSA EM COMPARAÇÃO COM ASFALTOS COMERCIAIS	2004
ANÁLISE COMPARATIVA DE ENSAIOS DE DESEMPENHO PARA FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA	2009
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FUNCIONAIS DA CAMADA POROSA DE ATRITO SOB DIFERENTES CONCEPÇÕES DE PROJETO	2014
CONSOLIDAÇÃO DA METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DE AMOSTRAS DO TIPO ARGAMASSA AREIA ASFALTO (AAA)	2019
DESAFIOS TÉCNICOS NA EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS DO RAP PARA MAXIMIZAR SEU REAPROVEITAMENTO EM MISTURAS NOVAS	2024
DOSAGEM E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO GRAVE-BITUME	2028
INFLUÊNCIA DO MOMENTO DE ADIÇÃO DO AGENTE REJUVENESCEDOR EM MISTURAS RECICLADAS	2033
INVESTIGAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGANTE CONVENCIONAL AO LONGO DO ENVELHECIMENTO	2038
Misturas Asfálticas ou com Ligantes Alternativos - Relatórios de pesquisa de iniciação científica	**2043**
O USO DO ASFALTO-BORRACHA NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	2044
Misturas Asfálticas ou com Ligantes Alternativos - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**2046**
IMPACTO NA UTILIZAÇÃO DO CONCEITO DE BALANCED MIX DESIGN (BMD) A PARTIR DE ANÁLISES ECONÔMICAS E DE DESEMPENHO	2047
MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA COM PLÁSTICO RECICLADO	2050

Pavimentos Aeroportuários - Artigos científicos	**2053**
ESTUDO DA VULNERABILIDADE DE AERÓDROMOS NA AMAZÔNIA FACE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	2054
Pavimentos de Concreto - Artigos científicos	**2059**
AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E DA PERMEABILIDADE DE CONCRETOS POROSOS:COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO TEÓRICO E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	2060
VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS INTERTRAVADOS	2065
Pavimentos de Concreto - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**2070**
PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA BLOCOS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM BORRACHA MOÍDA E NANOCOMPOSTO	2071
Pavimentos Ferroviários - Artigos científicos	**2074**
ANÁLISE DAS TENSÕES ADMISSÍVEIS NO PAVIMENTO FERROVIÁRIO A PARTIR DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO DORMENTE	2075
CONTAMINAÇÃO DO LASTRO E SEUS EFEITOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL FERROVIÁRIA: PROPOSTA DE PROCEDIMENTO E APLICAÇÃO PRÁTICA	2080
EFFECTS OF HIGHER-SPEED RAIL INTRODUCTION ON TRACK DEGRADATION IN A FORMER FREIGHT-ONLY CORRIDOR: A CASE STUDY OF AN AMERICAN RAILROAD	2085
IMM-TRACK - MODELO INTEGRADO DE AVALIAÇÃO E MANUTENÇÃO DE FERROVIAS	2090
USO DE GEOCÉLULAS NO REFORÇO DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO: CONTRASTE BIBLIOMÉTRICO COM A MODALIDADE RODOVIÁRIA	2095
Materiais Geotécnicos na Infraestrutura de Transportes - Artigos científicos	**2100**
ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE CONSIDERANDO A SUCÇÃO APLICADOS A UM SUBLEITO	2101
ANÁLISE DA RIGIDEZ DE SOLOS SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES ATRAVÉS DO ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO	2106
AVALIAÇÃO DE UM SOLO ARENO SILTOSO PARA USO COMO SUBLEITO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO	2111
CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DE UM SOLO DE SUBLEITO DA BR-280/SC COM APLICAÇÃO DO MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO – MeDiNa.	2116
COMPORTAMENTO NÃO-RECUPERÁVEL DE TRÊS SOLOS DE GOIÁS: UM ESTUDO BASEADO NA CLASSIFICAÇÃO MCT E EM CURVAS MESTRAS	2121
DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLO LATERÍTICO ESTABILIZADO COM CAL HIDRATADA E RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO	2126
DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ROTINA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM REFORÇO DE GEOSSINTÉTICOS	2131
EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO SUBLEITO NA ESTIMATIVA MECANÍSTICO-EMPÍRICA DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	2136
INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DE AGREGADOS NO DIMENSIONAMENTO DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS PARA SEPARAÇÃO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	2141
METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO APRIMORADA DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES NA PAVIMENTAÇÃO	2146
OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE COM TEXTURAS PRÉ-DEFINIDAS PELO AJUSTE SELETIVO DE FRAÇÕES DOS MATERIAIS	2151
POTENCIAL DO REJEITO DE BAUXITA COMO PRECURSOR GEOPOLIMÉRICO NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS ASSOCIADO À CAL HIDRATADA	2156
Materiais Geotécnicos na Infraestrutura de Transportes - Comunicações técnicas	**2161**
ESTABILIZAÇÃO EMERGENCIAL DE TALUDE EM RODOVIAS: CASO NA BR-459/SP	2162
ESTUDO GEOTÉCNICO E ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES: CASO NA BR-381/MG	2166
Materiais Geotécnicos na Infraestrutura de Transportes - Relatórios de teses e dissertações em andamento	**2170**
DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS ESTABILIZADOS COM PÓ DE PEDRA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ANÁLISE MECANÍSTICA-EMPÍRICA	2171
ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE CAMADAS GEOTÉCNICAS DO PAVIMENTO CONSIDERANDO A SUCÇÃO	2174

ESTUDO DOS FATORES DE CONVERSÃO DE VOLUMES REGIONALIZADOS PARA PERÍCIAS DE OBRAS RODOVIÁRIAS NO ESTADO DO CEARÁ	2177
INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA DEFORMABILIDADE DE MISTURAS SOLO-ARRC PARA UTILIZAÇÃO COMO CAMADA DE SUB-BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.	2180
MODELAGEM DE RISCO GEOLÓGICO BASEADA NA MÁXIMA ENTROPIA (MAXENT) APLICADA À MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS	2183
Infraestrutura aquaviária - Artigos científicos	**2186**
ANÁLISE DE PORTOS ORGANIZADOS BRASILEIROS A PARTIR DE INDICADORES OPERACIONAIS: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA	2187
AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA EXPANSÃO HIDROVIÁRIA DA BAÍA DA GUANABARA – RJ	2192
INFRAESTRUTURAS PORTUÁRIAS E MUDANÇA DO CLIMA: O PAPEL DAS SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NA RESILIÊNCIA COSTEIRA	2197
UMA ANÁLISE PROSPECTIVA SOBRE A IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO DE EMBARCAÇÕES NOS PORTOS BRASILEIROS	2202
Projeto de vias - Artigos científicos	**2207**
BIM PARA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES: UMA REVISÃO DOS DESAFIOS PARA SUA IMPLANTAÇÃO NO BRASIL	2208
CONSTRUÇÃO DE MODELOS VIRTUAIS A PARTIR DE MAPEAMENTOS TOPOGRÁFICOS POR DRONES: PRECISÃO E ACURÁCIA	2213
ESTRATEGIAS TECNOLÓGICAS EN LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE SISTEMAS DE CONTENCIÓN VEHICULAR EN COLOMBIA	2218
INVESTIGAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM CURVAS HORIZONTAIS POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS COM ÊNFASE NA SEGURANÇA VIÁRIA	2224
USO DE SOFTWARES BIM PARA ELABORAÇÃO DE UM PROJETO PILOTO DE INTERSEÇÃO RODOVIÁRIA: PROJETOS GEOMÉTRICO E DE DRENAGEM	2229
Projeto de vias - Comunicações técnicas	**2234**
BIM COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA EM PROJETO DE INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA: ESTUDO DE CASO SEGREGAÇÕES	2235
Inteligência artificial aplicada à Infraestrutura de Transportes - Artigos científicos	**2239**
INFRAESTRUTURA PARA AUTOMAÇÃO DE FROTAS NO BRASIL: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO EM CORREDORES DA BR-116	2240
OTIMIZAÇÃO DE HIPERPARÂMETROS COM ALGORITMO GENÉTICO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ANN E RF PARA PREDIÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	2246
PREVISÃO DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI) EM RODOVIAS FEDERAIS DO CEARÁ COM O USO DE ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING	2250
PROPOSTA PRELIMINAR DE UM REPOSITÓRIO NACIONAL ABERTO DE ENSAIOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS	2255
SEGMENTAÇÃO DE TRINCAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM U-NET ESTENDIDA E BLOCOSSQUEEZE-AND-EXCITATION	2260
SISTEMA DE EXTRAÇÃO DE MALHA VIÁRIA A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE USANDO GAN	2265
Inteligência artificial aplicada à Infraestrutura de Transportes - Comunicações técnicas	2270
IMPLEMENTAÇÃO DO ÍNDICE DE CONDIÇÃO DA MANUTENÇÃO NO DER-MG: VISÃO COMPUTACIONAL E GESTÃO ESTRATÉGICA DA MALHA RODOVIÁRIA	2271
KM DE PROTEÇÃO: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA ATROPELAMENTO DE FAUNA NAS RODOVIAS ESTADUAIS DE MINAS	2275
Inteligência artificial aplicada à Infraestrutura de Transportes - Relatórios de teses e dissertações em andamento	2279
DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURAIS PARA ANÁLISE DO IMPACTO DA UMIDADE EM TRECHOS EXPERIMENTAIS DE DIFERENTES REGIÕES DO BRASIL	2280
USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ELABORAÇÃO E EXECUÇÃO DE PROJETOS GEOTÉCNICOS DE PAVIMENTAÇÃO	2283
Pavimentação urbana - Artigos científicos	2286
OTIMIZAÇÃO DO ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO	2287

Metodologias e avaliação do ensino-aprendizagem - Artigos científicos	2292
EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO E AMBIENTAL EM ESCOLAS DE NATAL/RN: DESAFIOS E POTENCIAIS NA FORMAÇÃO DE HÁBITOS DE TRANSPORTE SUSTENTÁVEIS	2293
METODOLOGIA DE APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS (ABP) NO ENSINO DE PROJETOS RODOVIÁRIOS: ANÁLISE DOS RESULTADOS DE APLICAÇÃO PRÁTICA	2298
MICROLEARNING COMO ESTRATÉGIA DE ENSINO-APRENDIZAGEM NA FORMAÇÃO DE ALUNOS DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL	2303
MODELO DE SALA DE AULA INVERTIDA NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS	2308
PEDALA IF: IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE COMPARTILHAMENTO DE BICICLETAS COMO ESTRATÉGIA PARA O ENSINO DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES	2313
PROPOSTA DE GAMEFICAÇÃO DE ENSINO-APRENDIZAGEM VOLTADA AO DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE AEROPORTOS	2318
Metodologias e avaliação do ensino-aprendizagem - Comunicações técnicas	2323
UMA AVALIAÇÃO DA PERCEPÇÃO DE APRENDIZADO, IMPACTO EMOCIONAL E PREFERÊNCIAS NA APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE ENSINO BASEADOS EM JOGOS	2324
Educação mediada por tecnologia - Comunicações técnicas	2328
DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DE PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS: APLICAÇÕES COM QGIS E CIVIL 3D	2329
Educação mediada por tecnologia - Relatórios de teses e dissertações em andamento	2334
USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICAL PARA O ENSINO E APRENDIZAGEM EM ENGENHARIA	2335
Acompanhamento dos estudantes - Artigos científicos	2338
ANÁLISE COMPARATIVA DA EVASÃO NOS CURSOS DE ENGENHARIA CIVIL E TECNOLOGIA EM ESTRADAS DO IFCE CAMPUS FORTALEZA	2339
AUTOCONSCIÊNCIA, AUTOLIDERANÇA E COMPETÊNCIAS TRANSVERSAIS: UM ESTUDO COM ESTUDANTES DE ENGENHARIA DA MOBILIDADE	2344
Extensão no ensino em transportes - Artigos científicos	2349
ENSINAR PARA APRENDER: RELATO DE ATIVIDADES DE EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO DESENVOLIDAS POR DISCENTES DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES	2350
EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA COMO FERRAMENTA PARA PROPAGAÇÃO DO ENSINO EM TRANSPORTES	2355
EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES: UMA AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO ESTUDO DE CASO COMO ESTRATÉGIA DE ENSINAGEM	2360
POR QUE ELAS FICAM? INVESTIGANDO O INTERESSE SUSTENTADO DE MENINAS NAS ENGENHARIAS.	2365
Extensão no ensino em transportes - Comunicações técnicas	2371
EDUCAÇÃO E PREVENÇÃO: AÇÕES EXTENSIONISTAS DE DIVULGAÇÃO SOBRE IMPORTÂNCIA DAS FERROVIAS E OS RISCOS DAS OCUPAÇÕES PRÓXIMAS	2372
UM JOGO COMO ESTRATÉGIA PEDAGÓGICA PARA ABORDAR PROBLEMAS COMPLEXOS: UMA POSSIBILIDADE PARA A CURRICULARIZAÇÃO DA EXTENSÃO	2377
Formação, capacitação e avaliação docente - Artigos científicos	2381
PROJETO PONTO DE PARTIDA: CONSTRUÇÃO DE OBJETO DE APRENDIZAGEM SOBRE ANÁLISE MULTICRITÉRIO EM SIG, PARA ESCOLHA DO MELHOR TRAÇADO	2382
Temáticas transversais aplicadas ao ensino em transportes - Artigos científicos	2387
ARTEFATOS DE GESTÃO DO CONHECIMENTO PARA ORGANIZAÇÕES DE PESQUISA CIENTÍFICA	2388
Outras áreas	2393
DETERMINAÇÃO DE RISCOS ENVOLVIDOS NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL E COMO MINIMIZÁ-LOS	2394
SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO PARA JARDIM/MS E GUIA LOPES DA LAGUNA/MS: ADAPTAÇÕES DO MODELO BRT PARA PEQUENAS CIDADES	2404

A REESTRUTURAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO DE GOIÂNIA E REGIÃO METROPOLITANA: UMA ANÁLISE TÉCNICO-CIENTÍFICA DO NOVO MODELO SIT-RMTC	2409
AVALIAÇÃO DE FATORES DE RISCO EM ACIDENTES RODOVIÁRIOS: UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA MEDIANTE O MÉTODO AHP GAUSSIANO	2414
COMPORTAMENTO DE VIAGEM: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA COM FOCO NAS TEORIAS DO COMPORTAMENTO PLANEJADO E DA MOTIVAÇÃO HUMANA	2419
DIGITAL TWINS AND THE RESILIENCE OF CRITICAL TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE IN DEVELOPING COUNTRIES	2424
TRANSPORTE URBANO COMO VETOR DE DESCARBONIZAÇÃO: PROPOSTAS E COMPROMISSOS ESPERADOS NA COP30	2428
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS VIÁVEIS PARA CONSTRUÇÃO DE PORTOS CAPAZES DE RECEBER E OPERAR NAVIOS PÓS PANAMAX	2433

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Carga

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA APOIO À ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE FISCALIZAÇÃO EM RODOVIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Thayná Hammes de Almeida, Eduardo Lobo
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

RESUMO
Este artigo apresenta os principais resultados de uma pesquisa sobre métodos de otimização aplicados à alocação de equipamentos de fiscalização em rodovias, com um foco maior em fiscalização de peso. Para isso, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) em quatro bases acadêmicas, com o objetivo de abranger estudos nacionais e internacionais. A busca resultou na seleção de treze trabalhos de alta relevância acadêmica, cujos enfoques e contribuições são analisados e discutidos de forma concisa ao longo do texto.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024), o transporte rodoviário de cargas é responsável por aproximadamente 65% da movimentação de cargas no Brasil, desempenhando um papel fundamental para o crescimento econômico do país. Nesse contexto, é comum que transportadores pratiquem o sobrepeso como forma de maximizar lucros (Franceschi *et al.*, 2020). Essa prática, no entanto, provoca danos significativos ao pavimento, acelera a deterioração da malha rodoviária, eleva os custos de manutenção tanto da infraestrutura quanto dos veículos, representa riscos à segurança dos usuários das rodovias e compromete a equidade competitiva no setor de transportes, devido à disparidade nos custos operacionais. Dessa forma, infere-se que a fiscalização de peso desempenha um papel relevante não apenas na conservação do pavimento das rodovias, mas também na regulação do transporte de cargas no país. Estudos como os de Coiro e Arriola (2016), Han *et al.* (2012) e Jacob e Cottineau (2016) já demonstraram a efetividade desse tipo de fiscalização na prevenção da prática de sobrepeso.

A localização de equipamentos de fiscalização em rodovias é, portanto, uma questão de interesse para entidades federais, estaduais ou municipais — públicas ou privadas — responsáveis pela manutenção da infraestrutura viária e pela fiscalização das leis de trânsito. Tal planejamento deve considerar aspectos socioeconômicos da região, dados espaciais, contagens de tráfego e a tendência de evasão de veículos, conforme as possibilidades de rotas alternativas existentes. Neste trabalho, conforme apontado anteriormente, optou-se por investigar metodologias de localização de equipamentos de fiscalização em geral, por meio da realização de uma Revisão Sistemática da Literatura.

2. METODOLOGIA

De-La-Torre-Ugarte *et al.* (2011) definem a revisão sistemática como uma metodologia rigorosa, que visa identificar estudos sobre um determinado tema. O diferencial desse tipo de revisão consiste em responder a uma pergunta mais pontual, por meio da aplicação de métodos explícitos e sistematizados de busca, com o objetivo de avaliar a qualidade, a aplicabilidade e a validade desses estudos. Além disso, a revisão sistemática também busca minimizar a influência do viés do pesquisador na seleção dos trabalhos para análise, uma vez que o processo de escolha dos estudos é definido previamente à análise do conteúdo dos resultados. A revisão sistemática realizada neste trabalho baseou-se no processo proposto por Donato e Donato (2019), no qual as autoras apresentam um guia prático sobre essa metodologia, composto pelas seguintes etapas: (1) Formulação de uma questão de investigação; (2) Definição dos critérios de inclusão e exclusão de estudos; (3) Desenvolvimento e execução de estratégia de pesquisa; (4) Seleção dos estudos; (5) Extração dos dados; (6) Síntese dos dados e avaliação da qualidade da evidência.

2.1. Coleta e seleção dos trabalhos

Dessa forma, a questão norteadora da pesquisa foi: *"Quais métodos de otimização podem ser utilizados para apoio à localização de equipamentos de fiscalização em rodovias?"*

Na sequência, foram definidos os critérios de inclusão dos estudos. Os critérios adotados foram: **Data de publicação**: considerados os estudos publicados entre 2018 e 2024 (período de seis anos); **Idioma**: priorizados estudos redigidos em inglês ou português; **Aderência às palavras-chave** definidas para a busca; **Disponibilidade**: incluídos apenas os estudos com conteúdo completo disponível; **Relevância** científica e temática. Para verificar a disponibilidade dos trabalhos, utilizou-se a ferramenta de rede privada virtual (*Virtual Private Network* — VPN) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que possibilitou o acesso a bases de dados disponibilizadas pela instituição. Na etapa seguinte, foram selecionadas as seguintes bases de

pesquisa: Scopus, SciELO, Springer e EBSCOhost — sendo que apenas as duas primeiras são de acesso livre. O acesso às demais ocorreu por meio da VPN da UFSC. Para a execução das buscas nas bases selecionadas, foram formuladas duas frases de pesquisa, uma em português e outra em inglês, utilizando-se palavras-chave relacionadas ao tema e os operadores booleanos **AND** (e) e **OR** (ou), com o objetivo de abranger sinônimos e ampliar o número de resultados. As expressões utilizadas foram:

- *(location OR placement) AND (equipment OR station OR wim OR enforcement) AND (highways OR roads OR motorway OR carriageway OR freeway)*
- *(localização OR alocação OR planejamento locais) AND (sistemas OR equipamentos OR fiscalização OR pontos) AND (rodovias OR vias OR viário OR estradas OR ruas OR rodoviário)*

É importante ressaltar que a busca nas bases foi realizada em abril de 2024. Ademais, destaca-se que, ao utilizar as frases de busca nas plataformas EBSCOhost e Springer, obteve-se uma quantidade excessiva de resultados. Nesses casos, optou-se por aplicar filtros diretamente nas respectivas plataformas, conforme descrito a seguir: **EBSCOhost**: "apenas publicações com textos completos disponíveis em PDF" e "Academic Search Premier"; **Springer**: tipo de conteúdo "artigo", áreas de "Engenharia" e "Ciências da Computação", subdisciplinas de "Engenharia Civil" e todas as subáreas de Ciências da Computação; idioma "Inglês" e período de publicação entre "2018–2024". A Tabela 1 apresenta a quantidade de resultados inicialmente encontrados em cada base

Tabela 1: Quantitativo de resultados obtidos através das buscas nas bases de dados (Almeida, 2024)

Base de dados	Nº de estudos encontrados
EBSCOhost	690
Scielo	24
Scopus	4837
Springer	4031
Total	**9582**

Após a realização das buscas nas bases de dados, os resultados foram exportados em arquivos no formato *.csv*, organizados e consolidados em um único catálogo de referências contendo os dados brutos. Diante da grande quantidade de estudos encontrados, foram desenvolvidos scripts em linguagem Python para organizar as informações contidas nos arquivos exportados e remover títulos duplicados. Na sequência, procedeu-se à seleção dos artigos, inicialmente com base nos títulos e resumos, seguida pela análise do número de citações de cada trabalho e, por fim, pela leitura do conteúdo integral dos artigos. A Tabela 2 apresenta o quantitativo de estudos resultantes em cada etapa do processo de seleção realizado na revisão sistemática.

Tabela 2: Quantitativo dos resultados obtidos nas etapas de seleção de estudos (Almeida, 2024)

Etapa	Nº de estudos resultantes
Coleta de estudos das bases de dados	9582
Remoção de títulos duplicados	9417
Filtragem pelos títulos relevantes	76
Classificação por relevância (data e nº de citações ou grau de impacto do jornal/revista[1])	35
Filtragem pelos resumos relevantes	15
Verificação da disponibilidade dos textos integrais	14
Seleção de artigos relevantes pelo conteúdo integral	13

[1]Para estudos compreendidos entre 2018 e 2022, foram considerados relevantes aqueles com quatro ou mais citações. Já para os estudos mais recentes, publicados entre 2023 e 2024, por entender que o número de citações seria um parâmetro injusto para a avaliação de sua relevância, levou-se em consideração o grau de impacto da revista científica em que foi publicado.

Por fim, durante a leitura integral dos artigos, foram selecionados apenas aqueles com relevância científica comprovada, resultando em 13 trabalhos que compõem o acervo referencial da presente pesquisa sobre os métodos de otimização aplicáveis à localização de equipamentos de fiscalização em malhas rodoviárias.

3. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Os trabalhos selecionados por meio do processo de Revisão Sistemática estão listados na Tabela 3, na qual também são apresentados os assuntos-chave e a metodologia associada a cada um deles.

Tabela 3: Revisão Sistemática: estudos selecionados, assuntos e metodologias abordadas (Almeida, 2024)

Estudo (ano)	Título	Assunto-chave	Metodologia utilizada

Camara *et al.* (2023)	A hybrid solution method for the bi-objective traffic counting location problem using previous origin-destination trip tables	Contagem de fluxo: localização de sensores	Solução híbrida: integração entre método iterativo multiobjetivo ε-*constraint* com estrutura de cobertura parcial de conjunto
Bogyrbayeva & Kwon (2021)	Pessimistic evasive flow capturing problems	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Modelo de otimização em dois níveis, pessimista, com algoritmo de plano de corte
Jinyu *et al.* (2020)	Locating Control Stations for Mobile Monitoring of Overloaded Trucks on Rural Highways	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Processo Hierárquico Analítico (AHP) e modelo de otimização de distribuição espacial
Owais *et al.* (2020)	Distributing Portable Excess Speed Detectors in AL Riyadh City	Fiscalização: localização de sensores de velocidade	Abordagem heurística baseada em algoritmo guloso
Ryguła *et al.* (2020)	Limitations of the effectiveness of Weigh in Motion systems	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Estatísticas descritivas de dados de estações existentes
Vieira *et al.* (2020)	A progressive hybrid set covering based algorithm for the traffic counting location problem	Contagem de fluxo: localização de sensores	Algoritmo híbrido progressivo com estrutura de cobertura de conjunto
González *et al*. (2019)	New approaches for the traffic counting location problem	Contagem de fluxo: localização de sensores	Algoritmo *Branch-and-Cut* e heurística de agrupamento
Jovanović *et al.* (2019)	Metaheuristic approach to optimize placement of detectors in transport networks - Case study of Serbia	Contagem de fluxo: localização de sensores	Meta-heurística colônia de abelhas
Arslan *et al.* (2018)	Exact solution of the evasive flow capturing problem	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo *Branch-and-Cut*
Hooshmand & MirHassani (2018)	An Effective Bilevel Programming Approach for the Evasive Flow Capturing Location Problem	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Modelo de otimização em dois níveis e algoritmo *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT)
Kulović *et al.* (2018)	Modelling truck weigh stations' locations based on truck traffic flow and overweight violation: A case study in Bosnia and Herzegovina	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Modelo simplificado de interceptação de fluxos determinísticos
Lu *et al.* (2018)	A Bilevel Model with a Solution Algorithm for Locating Weigh-In-Motion Stations	Fiscalização: localização de sensores de pesagem	Modelo de otimização em dois níveis e heurística
Luo *et al.* (2018)	An Algorithm for Traffic Flow Prediction Based on Improved SARIMA and GA	Contagem de fluxo	Modelo de predição híbrida com algoritmo genético

A partir da Tabela 3, verifica-se uma concentração mais significativa de estudos publicados nos anos de 2018 (38,46%) e 2020 (30,77%). Com relação aos assuntos-chave abordados, os mais frequentes foram a localização de sensores de pesagem (53,85%) e a localização de sensores para contagem de fluxo (30,77%).

3.1. Assuntos e metodologias abordadas pelos trabalhos analisados

3.1.1. Contagem de fluxo e localização de sensores de contagem de fluxo

A elevação da qualidade de vida e o crescimento econômico, com o consequente aumento da frota veicular, intensificam os congestionamentos nas rodovias. Nesse cenário, torna-se fundamental dispor de dados atualizados de tráfego para prever fluxos futuros e apoiar o planejamento de transportes por parte dos órgãos competentes (Luo *et al.*, 2018). A previsão de tráfego é complexa, especialmente no que se refere à precisão e ao tempo de processamento. Luo *et al.* (2018) propuseram um modelo híbrido que combina um modelo autorregressivo integrado de médias móveis sazonais (*Seasonal Autorregressive Integrated Moving Average* – SARIMA) com um modelo autorregressivo de múltiplas entradas, otimizado por algoritmo genético. O método demonstrou desempenho semelhante ao de redes neurais artificiais (RNAs), porém com tempo computacional reduzido, evidenciando sua eficácia.

Outro desafio consiste na definição da localização ideal de sensores de contagem, conhecida como *Traffic Counting Location Problem* (TCLP), frequentemente abordada por meio do *Flow Capture Problem* (FCP), com foco na maximização da cobertura dos fluxos. Três estudos brasileiros trataram do TCLP utilizando dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de

Transportes (DNIT), aplicados à malha viária dos 26 estados brasileiros. Vieira *et al.* (2020) empregaram um algoritmo híbrido com estrutura de cobertura de conjuntos, obtendo 22 soluções ótimas e 20 ideais, com desempenho superior ao de González *et al.* (2019), que utilizaram *Branch-and-Cut* com heurística de agrupamento. Já Camara *et al.* (2023) desenvolveram um modelo híbrido para o *Bi-objective Traffic Counting Location Problem* (BTCLP), integrando o método ε-Constraint com cobertura parcial de conjuntos. A abordagem mostrou-se eficaz, minimizando o número de estações e maximizando a cobertura O-D em diferentes cenários. No contexto internacional, Jovanović *et al.* (2019) propuseram uma meta-heurística baseada em colônia de abelhas para alocação de sensores, validada com dados da República Sérvia. Embora eficiente, o modelo não considerou o fenômeno de evasão, relevante em aplicações voltadas à fiscalização.

3.1.2. Localização de sensores de pesagem de veículos

A pesquisa de Rygula *et al.* (2020), realizada nas rodovias da Polônia, discute a eficácia das estações de pesagem em movimento (*Weigh-In-Motion* – WIM) e os desafios decorrentes da evasão por parte dos motoristas, que tendem a evitar pontos fixos de fiscalização quando sua localização é amplamente conhecida. Os autores identificam que a fiscalização direta é a mais eficaz, dado que a incidência de veículos com excesso de carga aumenta significativamente fora do horário de funcionamento. Assim, recomendam que o controle seja exercido de forma contínua para maior efetividade.

Diversos estudos abordam o *Evasive Flow Capturing Problem* (EFCP), associado à evasão de veículos em resposta à presença de sensores de fiscalização. Hooshmand e MirHassani (2018) propõem um modelo de otimização em dois níveis, utilizando condições de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) e algoritmos reformulados, assumindo a existência de um limite racional para o desvio, condicionado ao custo-benefício da evasão. Em contraponto, Lu *et al.* (2018) consideram que os motoristas podem percorrer qualquer distância para evitar a fiscalização. Com base nisso, desenvolveram um modelo de otimização baseado em enlaces, não dependente de caminhos mínimos, cuja heurística não assegura otimalidade global, embora tenha apresentado resultados superiores aos modelos clássicos.

Outras abordagens também buscam aperfeiçoar a modelagem do EFCP. Arslan *et al.* (2018) formularam um modelo de dois níveis com geração aleatória de redes, ampliando sua aplicabilidade a diferentes configurações viárias. Para a resolução, aplicaram algoritmos do tipo *Branch-and-Cut* e algoritmos exatos de separação. Já Bogyrbayeva e Kwon (2021) introduziram um cenário pessimista ao modelo, considerando motoristas com comportamento incerto, dispostos a arcar com maiores custos e distâncias. Por meio de um algoritmo de plano de cortes, demonstraram que tal abordagem pode mitigar, de forma mais eficaz, os danos à infraestrutura rodoviária.

Outros estudos concentram-se na alocação estratégica de sensores e fiscalização móvel. Kulović *et al.* (2018) propuseram um modelo determinístico de interceptação de fluxo para as rodovias da Bósnia e Herzegovina, sugerindo a instalação de 11 estações de pesagem com uso de balanças WIM, considerando o volume de tráfego, os nós da rede e o histórico de infrações. Jinyu *et al.* (2020), por sua vez, empregaram o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para localizar veículos móveis de fiscalização em Guiyang, China. Dado o traçado complexo da malha viária e os altos índices de evasão, ponderaram critérios como geologia, clima, infraestrutura e grau de sobrecarga. A aplicação do AHP resultou em alternativas viáveis que contribuíram para decisões mais eficazes.

3.1.3. Localização de sensores de velocidade

O estudo de Owais *et al.* (2020) é relevante por abordar a localização de sensores de fiscalização de velocidade em rodovias, incorporando o comportamento evasivo dos motoristas. O modelo proposto considera que rotas cujo tempo de deslocamento excede em 50% o tempo do caminho mais curto são pouco atrativas aos condutores e, portanto, devem ser desconsideradas na formulação. Os autores também demonstram que a instalação de um único sensor cobre aproximadamente 20% do fluxo, enquanto a cobertura total exigiria até 24 sensores, evidenciando que o problema de cobertura de fluxo não apresenta proporcionalidade direta.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o estado da arte sobre os métodos de otimização voltados ao apoio na alocação de equipamentos de fiscalização em rodovias, por meio da realização de uma revisão sistemática da literatura conduzida em abril de 2024. Como resultado, foram identificados 13 estudos com comprovada relevância científica, os quais são analisados quanto às metodologias e modelos propostos em cada um. Espera-se, portanto, que os resultados sistematizados nesta revisão contribuam para o aprimoramento das decisões

estratégicas de alocação de sensores em diferentes contextos rodoviários, de forma a maximizar os fluxos capturados e otimizar os recursos investidos em infraestrutura rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, T. H. (2024). Uma aplicação do Sistema de Apoio à Localização de Postos de Pesagem – SIALOC na malha rodoviária federal de Santa Catarina. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

Arslan, O.; Jabali, O.; Laporte, G. (2018). Exact Solution of the Evasive Flow Capturing Problem. *Operations Research*, v. 66, n. 6, p. 1625–1640, nov. 2018.

Bogyrbayeva, A.; Kwon, C. (2021). Pessimistic evasive flow capturing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 293, n. 1, p. 133–148, ago. 2021.

Camara, M. V. O.; Vieira, B. S.; Ferrari, T.; Quadros, S. G. R.; Ribeiro, G. M. (2023). A hybrid solution method for the bi-objective traffic counting location problem using previous origin-destination trip tables. *Optimization and Engineering*, v. 24, p. 2693–2725, dez. 2023.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. *Pesquisa CNT de Rodovias 2024*. Brasil: CNT, 2024. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo. Acesso em: 01 mar. 2025.

Coiro, D.; Arriola, M. (2016). Implementation and economic benefit of a WIM enforcement system. Proceedings of the International Conference on Weigh-In-Motion (p. 226–240).

De-La-Torre-Ugarte, M. C.; Takahashi, R. F.; Bertolozzi, M. R. (2011). Revisão sistemática: noções gerais. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, v. 45, n. 5, p. 1260-1266, 2011.

Donato, H.; Donato, M. (2019). Etapas na Condução de uma Revisão Sistemática. *Acta Médica Portuguesa*, v. 32, n. 3, 2019.

Franceschi, L.; Otto, G. G.; Kaesemodel, L.; Valente, A. M. (2020). Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. *Transportes*, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020.

González, P. H.; Clímaco, G.; Mauri, G. R.; Vieira, B. S.; Ribeiro, G. M.; Orrico Filho, R. D.; Simonetti, L.; Perim, L. R.; Hoffmann, I. C. S. (2019). New approaches for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, v. 132, p. 189–198, out. 2019.

Han, L. D.; Ko, S.-S.; Gu, Z.; Jeong, M. K. (2012). Adaptive Weigh-In-Motion algorithms for truck weight enforcement. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 256–269. doi: https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.01.010

Hooshmand, F.; Mirhassani, S. A. (2018). An Effective Bilevel Programming Approach for the Evasive Flow Capturing Location Problem. *Networks and Spatial Economics*, v. 18, n. 4, p. 909–935, 1 dez. 2018.

Jacob, B.; Cottineau, L.-M. (2016). Weigh-In-Motion for Direct Enforcement of Overloaded Commercial Vehicles. *Transportation Research Procedia*, 14, 1413–1422. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.214.

Jinyu, J.; Xu, Z.; Zhongzhen, Y. (2020). Locating Control Stations for Mobile Monitoring of Overloaded Trucks on Rural Highways. *IEEE Access*, v. 8, p. 65821–65829, 2020.

Jovanović, I.; Šelmić, M.; Nikolić, M. (2019). Metaheuristic approach to optimize placement of detectors in transport networks — case study of Serbia. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 46, n. 3, p. 176-187, mar. 2019.

Kulović, M.; Injac, Z.; Davidović, S.; Posavac, I. (2018). Modelling Truck Weigh Stations' Locations based on Truck Traffic Flow and Overweight Violation: A Case Study in Bosnia and Herzegovina. *PROMET - Traffic&Transportation*, v. 30, n. 2, p. 163–171, 20 abr. 2018.

Lu, C-C.; Yan, S.; Ko, H-C.; Chen, H-J. (2018). A Bilevel Model With a Solution Algorithm for Locating Weigh-In-Motion Stations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 19, n. 2, p. 380-389, fev. 2018.

Luo, X.; Niu, L.; Zhang, S. (2018). An Algorithm for Traffic Flow Prediction Based on Improved SARIMA and GA. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 22, n. 10, p. 4107-4115, 31 out. 2018.

Owais, M.; El Deeb, M.; Abbas, Y. A. (2020). Distributing Portable Excess Speed Detectors in AL Riyadh City. *International Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 11, p. 1301-1314, 2020.

Ryguła, A.; Brzozowski, K.; Maczyński, A. (2020). Limitations of the effectiveness of Weigh in Motion systems. *Open Engineering*, v. 10, n. 1, p. 183-196, 17 mar. 2020.

Vieira, B. S.; Ferrari, T.; Ribeiro, G. M.; Bahiense, L.; Orrico Filho, R. D.; Abramides, C. A.; Campos Júnior, N. F. R. (2020). A progressive hybrid set covering based algorithm for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, v. 160, p. 113641, dez. 2020.

Thayná Hammes de Almeida (thayna.hammes@gmail.com)
Eduardo Lobo (eduardo.lobo@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), Campus Universitário bairro Trindade – Florianópolis, SC, Brasil.

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE SUBSTITUIÇÃO DE TRILHO EM FERROVIAS: UM MODELO BASEADO EM TEMPOS OBSERVADOS E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Raphael Eustáquio Macedo Nunes[1], **Ariel Vieira de Moraes Cantarino**[1], **Orivalde Soares da Silva Junior**[1], **Fernando Paulo Caneschi**[2]
[1] Instituto Militar de Engenharia, [2]Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais.

RESUMO
Este estudo visa otimizar a substituição de trilhos na ferrovia EFVM, buscando maior eficiência operacional em janelas de manutenção curtas. Utilizou-se um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), integrando dados de tempos observados com tratamento estatístico, considerando fatores como ruído, sinalização e fadiga que impactam o desempenho. A metodologia analisou tempos de trabalho, aplicando técnicas de eliminação de *outliers* e ajustes para refletir condições reais. O modelo PLIM, incorporando variáveis operacionais, otimizou a substituição de trilhos na EFVM. O planejamento das atividades permitiu concluir o processo em cerca de 217,53 minutos, dentro da janela de 240 minutos, alcançando 90,64% de eficiência operacional. Isso demonstra a capacidade do método de reduzir o tempo de troca de trilhos, aumentando a produtividade. A otimização tem potencial de aplicação em outras ferrovias, promovendo uma manutenção mais segura, sustentável e moderna no setor ferroviário.

1. INTRODUÇÃO

A modernização da manutenção ferroviária busca aumentar a eficiência e segurança nas operações. Técnicas como Programação Linear Inteira Mista (Pinedo, 2016) permitem otimizar recursos ao considerar variáveis contínuas e discretas. Estudos indicam que fatores ambientais, como ruído e sinalização (García et al., 2024), além de fadiga dos operadores (Enoka & Duchateau, 2023), impactam o tempo de execução das tarefas. A aplicação de métodos estatísticos, como o Intervalo Interquartil (Wang et al., 2023), melhora a precisão na análise dos tempos operacionais, eliminando *outliers*. Assim, integrar dados reais, análise estatística e otimização pode promover melhorias na eficiência do setor ferroviário, como demonstrado neste trabalho na substituição de trilhos na EFVM.

2.METODOLOGIA

A metodologia adotada no estudo envolveu a coleta, processamento e modelagem dos tempos de execução das atividades de substituição de trilhos, buscando refletir condições reais de operação e otimizar a programação dessas tarefas.

2.1. Apresentação dos dados

A base de dados foi composta por tempos observados TO_i, coletados por meio de medições simultâneas de 22 atividades realizadas por uma equipe primarizada de (11 oficiais, 3 operadores, 1 chefe e 1 supervisor), distribuídos como operacionais, de acordo com suas funções, conforme o quadro de mão de obra da figura 1:



Figura 1: Quadro de mão de obra – Troca de trilho, Fonte: (Rodrigues, 2017).

O quadro de mão de obra apresentado, fornece uma visão sobre os recursos humanos envolvidos na atividade de substituição de trilhos na ferrovia. Ele mostra, sequencialmente, a composição, funções e responsabilidades dos profissionais que participam do processo, permitindo entender como a equipe está organizada para garantir eficiência e coordenação na execução das tarefas. Os operadores realizam as tarefas práticas de substituição,

como instalação, alinhamento, solda, entre outras atividades técnicas.

2.2 Metodologia do tratamento de dados

Os dados de tempos reais para a substituição de trilhos serviram como referência para simular cinco medições independentes por atividade (Ti), refletindo variações práticas devido a fatores como perda/ganho de contato (Smith et al., 2023), ruído ambiental (Garcia et al., 2024) e alterações em sinalização (Chao et al.,2024).

Para cada atividade, as cinco medições foram geradas assumindo uma variação normal em torno do tempo médio de Rodrigues (2016), com desvio padrão de 5%, simulando condições reais de operação em janelas de 4-6 horas. O tempo observado (TOi) foi calculado como a média aritmética das medições, após tratamento estatístico para rejeitar *outliers* via Intervalo Interquartil (IQR), conforme recomendado por Wang et al. (2023) e (Famurewa et al. 2017). O processo envolveu: primeiro ordenar os cinco valores de Ti para cada atividade; em seguida, determinar o primeiro quartil $(Q1)$ e o terceiro *quartil* $(Q3)$; em terceiro, calcular o IQR como: $IQR = Q3 - Q1$; após isso, estabelecer limites para *outliers*: limite inferior $(Q1 - 1.5 \cdot IQR)$ e superior $(Q3 + 1.5 \cdot IQR)$ e finalizando, rejeitar valores fora desse intervalo e recalcular a média para TOi.

O tempo padrão, (TPi), foi derivado de TOi com uma tolerância de 5% para fadiga e esperas fora do controle, calculado como:

$$TP_i = TO_i.(1 + 0{,}05) \quad (1)$$

2.3. Consolidação dos dados

Os tempos padrão calculados (TPi) a partir dos tempos observados (TOi) foram utilizados como valores de referência no modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Esses tempos servem como base para definir a duração de cada atividade no modelo de otimização, mas foram ajustados por um fator de eficiência/tempo, representado pela variável δi, que pode variar até ±5% do TPi. Esse ajuste permite que o modelo otimize a execução das atividades, reduzindo ou aumentando os tempos dentro desse limite para melhorar a eficiência operacional. Consolidada na tabela 1:

.

Atividade	Tempo Médio (min)	Número de pessoas	Simulação de 5 Medições ($\boldsymbol{Ti}$) (min)	$\boldsymbol{TOi}$ (min)	$\boldsymbol{TPi}$ (min)	δi
1. Abrir LDL	6	1	6.0, 5.8, 6.2, 6.1, 5.9	6.0	6.30	0
2. Sinalizar linha	15	2	14.8, 15.2, 15.5, 14.7, 15.3	15.1	15.86	Variável
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
22. Retirar sinalização	15	2	14.9, 15.1, 15.4, 15.0, 14.8	15.04	15.79	0

Tabela 1: Tempo Médio Rodrigues (2017), Simulação das Cinco Cronometragens, TOi e TPi por Atividade.

O gráfico que representa todos os tempos padrão (TPi) calculados das 22 atividades: 1. Abrir LDL; 2. Sinalizar linha; 3. Descarregar o caminhão; 4. Retirar ferramentas; 5. Montagem do carro oxicorte; 6. Alívio e corte de trilho; 7. Retirar fixação; 8. Recolher grampo inservível; 9. Corte trilho policorte; 10. Retirar o trilho velho; 11. Limpar área; 12. Transportar trilho novo; 13. Assentar trilho com alavanca; 14. Espalhar grampos novos; 15. Tesoura; 16. Fixar trilho novo; 17. Solda aluminotérmica; 18. Esmerilhamento da solda; 19. Fixação e limpeza da solda; 20. Recolhimento de sucatas e materiais; 21. Carregar caminhão; 22. Retirar sinalização, considerando as tolerâncias está representado na figura 2:

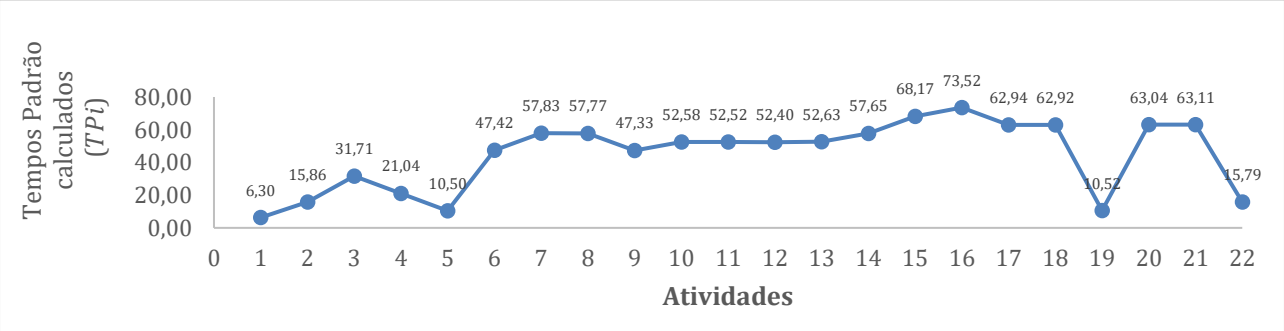


Figura 2: Quadro de mão de obra – Troca de trilho, Fonte: (Rodrigues, 2017).

2.3. Modelo Matemático

2.3.1. Conjuntos

I = {1, 2, . . . , 22}: Conjunto de atividades;
F = {1, 5, 17, 18, 19}: Subconjunto de atividades com tempo fixo (sem ajuste δi).
D = {(5, 17)}: Conjunto de pares (i, j) representando dependências diretas (atividade j inicia após o término de i).
T = {0, 10, 20. . . 300}: Conjunto de intervalos de tempo discretos para restrições de recursos.

2.3.2. Parâmetros

t_i^0 Tempo padrão de duração da atividade i;
n_i^0: Número inicial de operacionais para a atividade i;
N = 14: Número máximo de operacionais disponíveis.
M = 1000: Grande constante M para restrições com variáveis binárias;
δ_{min}, δ_{max}: Limites de ajuste de eficiência para δi (dependendo de i):
Para $i \in \{20, 21\}$: $\delta_{i,min} = -0.2t_i^0$, $\delta_{i,max} = 0.2t_i^0$ (flexibilidade de ±20%);
Para i = 22: $\delta_{i,min} = -0.1t_i^0$, $\delta_{i,max} = 0.1t_i^0$ (flexibilidade de ±10%).
Para $i \notin F \cup \{20, 21, 22\}$: $\delta_{i,min} = -0.05t_i^0$, $\delta_{i,max} = 0.05t_i^0$ (flexibilidade de ±5%).
Para $i \in F$: $\delta i = 0$.

2.3.3. Variáveis de Decisão

$si \geq 0$: Tempo de início da atividade i;
$T \geq 0$: Tempo total de conclusão de todas as atividades;
δi: Ajuste de eficiência na duração da atividade i;
$t_i' \geq 0$: Duração ajustada da atividade i;
$n_i \geq 0$: Número de operacionais alocados à atividade;
$z_{i,t} \in \{0, 1\}$: Variável binária indicando se a atividade i está ativa no tempo t;
$y_{A8,A18}$; $y_{A9,A17} \in \{0, 1\}$: Variáveis binárias para sincronização de início de A8 com A18 e A9 com A17;
$d_{9,10}$, $d_{11,12}$, $d_{11,13}$, $d_{11,16}$, $d_{A18} \geq 0$: Atrasos otimizados (continuos), com:

$$d_{9,10} \leq t'9.$$
$$d_{11,12}, d_{11,13}, d_{11,16} \leq 30.$$
$$5 \leq d_{A18} \leq 10$$

2.3.4. Função Objetivo

Minimizar o tempo total de conclusão da troca de trilho

$$Minimize = T \quad (2)$$

2.3.5. Restrições

- Janela de Tempo Máxima: $T \leq 240$ (3)
- Início das Atividades Iniciais: $s_1 = 0, \quad s_2 = 0, \quad s_3 = 0, \quad s_4 = 0$ (4)
- Dependência A7 após A1: $s_7 \geq s_1 + t_1'$ (5)
- Dependências Específicas (6)
- Para cada $(i, j) \in D$: $s_j \geq s_i + t_i'$
- A10 inicia com A9 com atraso: $s_{10} \geq s_9 + d_{9,10}$ (7)
- A11 inicia após A10: $s_{11} \geq s_{10} + t_{10}'$ (8)
- A12 e A13 iniciam após A6: $s_{12} \geq s_6 + t_6', \quad s_{13} \geq s_6 + t_6'$ (9)
- A16 inicia após A11 com atraso: $s_{16} \geq s_{11} + t_{11}' + d_{11,16}$ (10)
- A15 inicia com A13: $s_{15} \geq s_{13}$ (11)
- A17 começa após A14: $s_{17} \geq s_{14} + t_{14}'$ (12)
- A18 inicia após 30% de A17 com atraso adicional: $s_{18} \geq s_{17} + 0.3t_{17}' + d_{A18}$ (13)
- A19 inicia após A16 e 50% de A18: $s_{19} \geq s_{16} + t_{16}', \quad s_{19} \geq s_{18} + 0.5t_{18}'$ (14)
- A20 e A21 terminam 5 minutos após A18: $s_{20} + t_{20}' \geq s_{18} + t_{18}' + 5, \quad s_{21} + t_{21}' \geq s_{18} + t_{18}' + 5$ (15)
- A8: Inicia com A18 ou após 50% de A7: $s_8 \geq s_7 + 0.5t_7' - M(1 - y_{A8,A18}), \quad s_8 \geq s_{18} - My_{A8,A18}$ (16)
- A9: Inicia com A17 ou após 10% de A7: $s_9 \geq s_7 + 0.1t_7' - M(1 - y_{A9,A17}), \quad s_9 \geq s_{17} - My_{A9,A17}$ (17)

- A5 inicia após A4 $$s_5 \geq s_4 + t'_4 \quad (18)$$
- A6 inicia após A5 $$s_6 \geq s_5 + t'_5 \quad (19)$$
- A14 inicia após A10 e antes de A13 $$s_{14} \geq s_{10} + t'_{10}, \quad s_{14} \leq s_{13} \quad (20)$$
- Ajuste de Eficiência (δi): Para i ∈ - F: δi = 0. Para i /∈ F: $$\delta_{i,min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,max} \quad (21)$$
- Duração Ajustada $$t'_i = t_i^0 + \delta_i \quad \forall i \in I \quad (22)$$
- Fixação de Operacionais $$n_i = n_i^0 \quad \forall i \in I \quad (23)$$
- Restrições de Recursos: Para cada t ∈ T: $$\sum_{i=1}^{22} n_i^0 z_{i,t} \leq N \quad (24)$$
- Término das Atividades $$s_i \leq t + M(1 - z_{i,t}), \quad s_i + t'_i \geq t - M(1 - z_{i,t}) \quad \forall i \in I$$ $$s_i + t'_i \leq T \quad \forall i \in I \quad (25)$$

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos através da aplicação do modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), considerando variáveis operacionais como ruído, sinalização e fadiga, demonstram uma significativa otimização na substituição de trilhos na EFVM. A execução foi planejada para completar as atividades em um tempo total de 217,53 minutos, o que está dentro da janela de manutenção de 240 minutos, alcançando uma eficiência operacional de 90,64% do tempo máximo disponível. Conforme pode-se observar na figura 3:

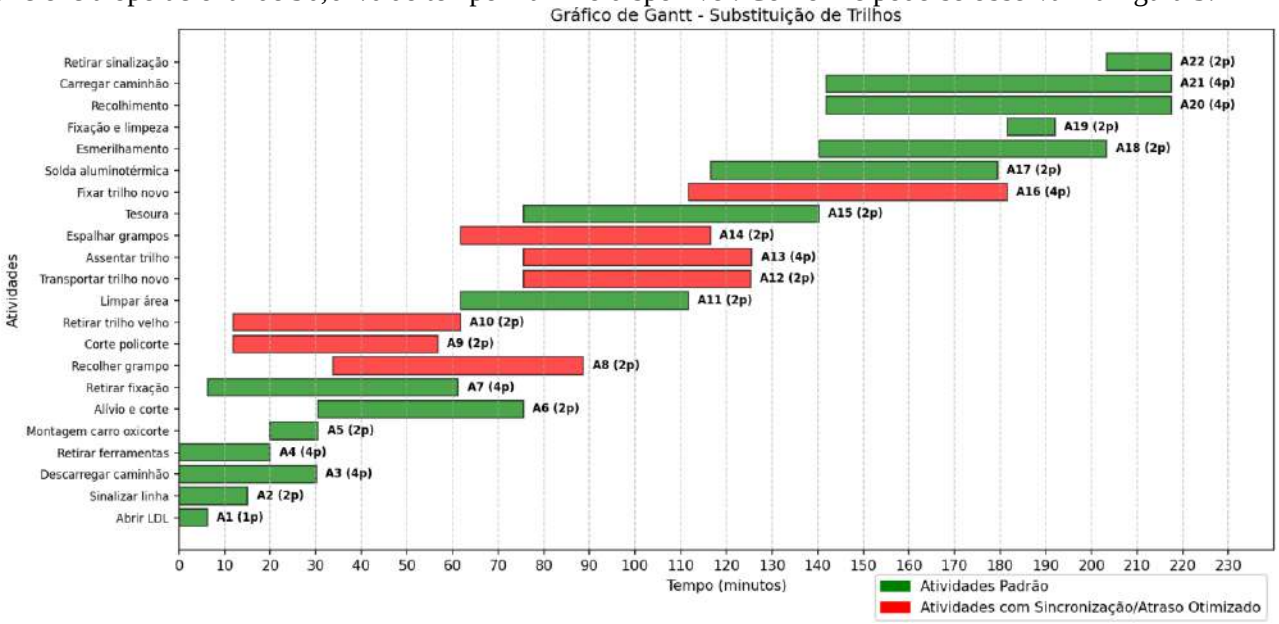


Figura 3: Gráfico de *Gantt* – Substituição de Trilhos

Essa eficiência foi alcançada por meio da integração de técnicas de ajuste dinâmico e da coordenação das atividades, tanto das atividades padrão quanto das atividades com sincronização, como A18 e A19. Para as atividades padrão, fixação, descarregamento e sinalização, empregaram-se deslocamentos otimizados que respeitaram as dependências lógicas entre as tarefas, reduzindo o tempo ocioso e aumentando a produtividade. Esses ajustes permitiram refletir atrasos ocasionados por ruído, permanências por sinalização ou outros fatores, mantendo o tempo total dentro do limite estipulado, o que evidencia a robustez do método em condições variáveis.

No caso das atividades com sincronização, esses deslocamentos foram otimizados considerando as dependências específicas, garantindo o alinhamento às precedências estabelecidas pelo processo lógico—por exemplo, a sinalização deve preceder o descarregamento, e o corte deve ocorrer antes do alinhamento. O modelo PLIM respeita essas relações, assegurando que a sequência (ex.: A1 → A2 → ... → A22) seja mantida, com ajustes que minimizam o tempo total, T. As atividades sincronizadas, como A18 e A19, tiveram seus deslocamentos ajustados para reduzir tempos ociosos, refletindo atrasos calculados e fatores adicionais, como ruído ou espera por sinalização, que também foram incorporados como variáveis no modelo. Dessa forma, o tempo total foi mantido dentro de 217,53 minutos. Essa abordagem aprimora a coordenação entre equipes e

equipamentos, aumentando a eficiência operacional.
A aplicação de técnicas estatísticas, como a rejeição de *outliers* e o uso do tempo padrão ajustado, contribuiu para uma previsão mais precisa na alocação de recursos e na duração das atividades. A escalabilidade do modelo foi demonstrada pela sua capacidade de adaptação a diferentes contextos operacionais, permitindo ajustes locais e promovendo melhorias contínuas na eficiência das operações de manutenção ferroviária.
Adicionalmente, o estudo reforça que a consideração de variáveis como fadiga e ruído aumenta a confiabilidade das previsões de tempo de execução e a coordenação entre as equipes. Assim, métodos que integram fatores ambientais e humanos se mostram essenciais para a otimização de processos complexos, como a manutenção ferroviária.

4. CONCLUSÃO

Este estudo propõe uma abordagem de otimização na substituição de trilhos, combinando cronometragem detalhada, análise estatística e Programação Linear Inteira (PLIM). Diferente de métodos anteriores, que negligenciam variáveis ambientais e humanas como ruído, sinalização e fadiga, o modelo considera esses fatores essenciais, possibilitando uma alocação de recursos mais eficiente e uma programação mais realista e adaptável às condições reais.
A implementação de ajustes dinâmicos em atividades padrão e sincronizadas foi fundamental para alcançar uma eficiência operacional de 90,64%, dentro de uma janela de manutenção de 240 minutos, refletindo uma redução de 9,36% no tempo por troca de trilho. Essa estratégia não só maximiza o uso do tempo disponível, mas também promove maior coordenação entre equipes e equipamentos, reduzindo o tempo ocioso e aumentando a produtividade.
Além disso, a escalabilidade do modelo demonstra potencial de aplicação em outras ferrovias brasileiras, com adaptações locais às especificidades de cada operação. A incorporação de variáveis como fadiga e ruído, aliada às técnicas estatísticas de tratamento de dados, reforça a confiabilidade das previsões de tempos de execução, contribuindo para uma manutenção mais segura, sustentável e eficiente. Ampliar o número de medições consolida ainda mais a confiabilidade dos resultados e reduzir a incerteza das estimativas dos tempos padrão, podendo-se atingir resultados melhores do que neste estudo, sendo uma oportunidade futuros estudos.
Por fim, os resultados deste trabalho evidenciam a importância de uma abordagem integrada, que alia dados e análises quantitativas avançadas, para promover a modernização do setor ferroviário brasileiro. Essa contribuição é especialmente relevante diante das crescentes demandas de transporte de cargas, onde a eficiência operacional é um fator decisivo para a competitividade do sistema ferroviário nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAO, H et al. Prognostics and health management for predictive maintenance: A review, Journal of Manufacturing Systems, Volume 75, 2024.
GARCIAS, J. et al. Impact of environmental noise on railway maintenance efficiency. *Journal of Environmental Engineering*, v. 150, n. 4, 2024.
FAMUREWA, S. M., Zhang, L., & Asplund, M. (2017). Maintenance analytics for railway infrastructure decision support. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(3), 245-262. PINEDO, M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 5. ed. New York: Springer, 2016.
RODRIGUES, Pammella Mara. Utilização do Lean Manufacturing na atividade de troca de trilhos em uma ferrovia [manuscrito] / Pammella Mara Rodrigues. - 2017.
SMITH, J. et al. Impact of contact loss on railway track maintenance efficiency. *Railway Engineering Journal*, v. 15, n. 3, 2023.
WANG, H. et al. Robust railway maintenance scheduling under uncertainty using MILP. *Omega*, v. 108, 2022.
ENOKA, M.; DUCHATEAU, Y. Impact of contact loss on railway track maintenance efficiency. [S.l.], 2023.

Raphael Eustáquio Macedo Nunes (raphaelmacedo.engferr@gmail.com)
Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha - Urca - Rio de Janeiro - RJ Brasil.
Ariel Vieira de Moraes Cantarino (arielvcantarino@gmail.com)
Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha - Urca - Rio de Janeiro - RJ Brasil.
Orivalde Soares da Silva Junior (orivalde@ime.eb.br)
Instituto Militar de Engenharia, Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha - Urca - Rio de Janeiro - RJ Brasil.
Fernando Paulo Caneschi (fernando.caneschi@ifsudestemg.edu.br)
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, campus Santos Dumont, Rua Técnico Panamá, nº 45 - Quarto Depósito-Santos Dumont – MG, Brasil.

UM RELATO DA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE APOIO À LOCALIZAÇÃO DE POSTOS DE PESAGEM – SIALOC NA MALHA RODOVIÁRIA FEDERAL DE SANTA CATARINA

Thayná Hammes de Almeida, Eduardo Lobo
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

RESUMO
O presente trabalho tem por objetivo aplicar o modelo de apoio à tomada de decisão do Sistema de Apoio à Localização de Postos de Pesagem - Sialoc na malha rodoviária federal catarinense, a partir de dados espaciais, por meio de um estudo de caso aplicado à malha rodoviária federal não concessionada de Santa Catarina. São apresentados o método, o *software* Sialoc, os dados utilizados nesta análise, bem como os resultados do estudo de caso e a viabilidade de instalação dos postos de pesagem nos locais propostos. Por fim, é constatada a eficácia do método proposto (IVFP) bem como a eficiência e versatilidade do *software* Sialoc para análises de dados e planejamento de transportes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O protagonismo do rodoviarismo no desenvolvimento econômico do Brasil é evidenciado através de dados. Sabe-se que o transporte rodoviário de cargas é responsável por movimentar aproximadamente 65% das cargas no país. Dessa forma, é comum que transportadores pratiquem o sobrepeso como forma de maximizar lucros (Franceschi *et al.*, 2020), prática esta que gera danos significativos ao pavimento, acelera a deterioração da malha rodoviária, eleva os custos de manutenção da infraestrutura e dos veículos, representa riscos à segurança dos usuários das rodovias e compromete a competição justa no setor de transportes. A fiscalização de peso contribui, portanto, na conservação do pavimento das rodovias e na regulação do transporte de cargas no país. O problema de localização de equipamentos de fiscalização em rodovias é de interesse para entidades federais, estaduais ou municipais — públicas ou privadas — responsáveis pela manutenção da infraestrutura viária e pela fiscalização das leis de trânsito. Tal planejamento deve considerar aspectos socioeconômicos da região, dados espaciais, contagens de tráfego e a tendência de evasão de veículos, conforme as possibilidades de rotas alternativas existentes. Este artigo apresenta uma aplicação do *software* Sialoc para apoio à tomada de decisão para alocação de três postos de pesagem na malha rodoviária federal de Santa Catarina.

2. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho foi baseada no Índice de Viabilidade de Fiscalização de Peso (IVFP), proposto por Franceschi *et al.* (2019), que consiste em um valor que classifica os trechos rodoviários em relação ao seu potencial de fiscalização de peso, gerado a partir de um método de análise multicritério. Nesse método, são concatenados critérios relevantes no contexto da localização de postos de pesagem em rodovias, normalizados e então agregados através de um somatório, levando em consideração a ponderação adotada para cada um, resultando assim, no valor do IVFP (Equação 1).

$$IVFP = max\left(\sum_i B_i \times P_i, \quad 0\right) \tag{1}$$

Onde B_i são as bases de cálculo dos diferentes critérios (Tabela 1) e P_i os respectivos pesos atribuídos.

Tabela 1: Bases de cálculo para normalização das variáveis contínuas do IVFP (Franceschi *et al.*, 2019)

Critério	Equação da base de cálculo	Variáveis
Volume médio diário anual de veículos pesados	$B_V = \frac{1}{5}\left(\frac{\sum_{f=0}^{N} V_{MDA,p}^{f}}{\sqrt{\mathrm{N}}}\right)^{\frac{1}{4}}$	$V_{MDA,p}^{f}$ – Volume Médio Diário Anual de veículos pesados de acordo com a fonte f. N – Número de fontes f disponíveis para o volume de veículos pesados.
Qualidade do pavimento	$B_{QP} = (2{,}96 - IRI) \times 0{,}6$	IRI – Índice de Irregularidade Longitudinal
Histórico de infrações de sobrepeso	$B_{HS} = \frac{1}{\lvert L\rvert}\sum_{l\in L}\frac{1}{\lvert A_l\rvert}\sum_{a\in A_l}\frac{IMDA_a^l}{25\times 1{,}3^t}$	L – Conjunto de locais de pesagem próximos ao trecho (< 100 km). A_l – Conjunto de anos que se possui dados para o local. $IMDA_a^l$ – Número médio diário de infrações para o ano, no local. t – Diferença de tempo, em anos, entre o ano dos dados e o ano atual

Critério	Equação da base de cálculo	Variáveis
Distância de pontos especiais	$B_{PE} = \max\left(\left(1 - \frac{D_{PE}}{50}\right) \times 1{,}5,\ 0\right)$	D_{PE} – Menor distância entre o trecho e o ponto especial mais próximo.
Distância de locais já estudados (PPV/PIAF)	$B_{LE} = \max\left(\sqrt[3]{1 - \frac{D_{LE}}{50}} \times 1{,}5,\ 0\right)$	D_{LE} – Menor distância entre o trecho e o local estudado anteriormente.
Proximidade de postos ativos	$B_{PA} = \max\left(\sqrt[3]{1 - \frac{D_{PA}}{100}} \times 1{,}5,\ 0\right)$	D_{PA} – Menor distância entre o trecho e o posto de pesagem ativo mais próximo.
Sinuosidade do trecho	$B_{ST} = \frac{\sqrt{\frac{S}{E}}}{15}$	S – Soma dos ângulos de desvio de todas as curvas dos segmentos. E – Extensão do trecho.
Histórico de acidentes com veículos pesados	$B_{HAp} = A_p \times 0{,}03$	A_p – Média anual de acidentes envolvendo veículos pesados registrados nos últimos cinco anos.
Histórico de acidentes com todos os veículos	$B_{HAt} = \frac{A_t}{100}$	A_t – Média anual de acidentes com vítimas registrados nos últimos cinco anos.
Corredor logístico	$B_{CL} = N_{CL} \times 0{,}2$	N_{CL} – Número de corredores logísticos estratégicos que passam que passam pelo trecho.
Fator de potencial econômico	$B_{UPE} = UPE$	UPE – Unidade de Potencial Econômico (DNIT)
Trecho em unidade de conservação	$\frac{e_{uc}}{E} > 0{,}5 \rightarrow B_{UC} = 1$ $\frac{e_{uc}}{E} \leq 0{,}5 \rightarrow B_{UC} = 0$	e_{uc} – Extensão do trecho dentro da área de conservação. E – Extensão total do trecho.
Trecho em área urbana	$\frac{e_{au}}{E} > 0{,}5 \rightarrow B_{AU} = 1$ $\frac{e_{au}}{E} \leq 0{,}5 \rightarrow B_{AU} = 0$	e_{au} – Extensão do trecho dentro da área urbana. E – Extensão total do trecho.
Situação em área especial	$\frac{e_{ae}}{E} > 0{,}5 \rightarrow B_{AE} = 1$; $\frac{e_{ae}}{E} \leq 0{,}5 \rightarrow B_{AE} = 0$	e_{ae} – Extensão do trecho dentro da área especial. E – Extensão total do trecho.
Estudo de concessão	$T_e \geq T_c \rightarrow B_{EC} = 1$ $T_e < T_c \rightarrow B_{EC} = 0$	T_e – Etapa escolhida na configuração do cenário. T_c – Etapa em que se encontra o estudo para concessão no trecho.
Trecho em obra	Trecho está em obras $\rightarrow B_{EC} = 1$ Caso contrário $\rightarrow B_{EC} = 0$	–

Os dados espaciais utilizados neste trabalho encontram-se inseridos no banco de dados do Sialoc, sendo representados através de camadas georreferenciadas, e consistem nos critérios contribuintes no cálculo do IVFP, mencionados no item 2.1. A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados utilizados, suas fontes, e outras observações pertinentes - como, por exemplo, a versão da base de dados utilizada.

Tabela 2: Fonte dos dados utilizados no Sialoc

Item	Fonte dos dados	Observações:
Rodovias federais (SNV)	DNIT (2024a)	Versão SNV: 2024.01 Data dos dados: janeiro/2024
Acidentes em rodovias federais	PRF (2024)	Data dos dados: de 2007 a 2023 Filtros: Ignorados todos os acidentes com classificação "Sem Vítimas"
Estimativa de volumes em rodovias federais (VMDA)	DNIT (2022)	Versão VMDA: 2022 Data dos dados: agosto/2023
Estudos para futuras concessões	PPI (2023)	Data dos dados: outubro/2023
Corredores logísticos	MTPA (2023)	Data dos dados: Volume I – Complexo de Soja e Milho: 2017; Volume II – Minério de Ferro: 2018; Volume III – Veículos Automotores: 2018; Volume IV – Complexo da Cana-de-Açúcar: 2018; Volume VI – Petróleo e Combustíveis: 2020
Aeroportos	ANAC (2023)	Data dos dados: agosto/2022
Portos	ANTAQ (2024)	Versão: Instalações Portuárias Outorgadas (fevereiro/2024) Data dos dados: fevereiro/2024

Áreas edificadas	IBGE (2019)	Data dos dados: 2019
Limites municipais	IBGE (2022)	Data dos dados: 2022
Áreas indígenas	FUNAI (2022)	Data dos dados: agosto/2022
Áreas quilombolas	INCRA (2021)	Data dos dados: 2021
Unidades de conservação ambiental	ICMBio (2024)	Data dos dados: fevereiro/2024

O Sistema de Apoio à Localização de Postos de Pesagem (Sialoc) foi desenvolvido pela equipe técnica do LabTrans/UFSC para prover suporte ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) na gestão de competências vinculadas às áreas de infrações, operações rodoviárias e educação para o trânsito. A ferramenta fornece acesso a dados unificados e organizados sobre a malha rodoviária federal, além de realizar de forma automatizada o cálculo do IVFP de acordo com critérios e pesos informados pelo usuário. Os dados são apresentados por meio de mapas temáticos, que exibem a malha rodoviária sobreposta a camadas cuja representação gráfica indica valores de referência para a decisão. Além disso, também possibilita filtrar os trechos rodoviários em função da Unidade Federativa (UF), do valor de IVFP e do volume de veículos pesados (VMDAp). No presente estudo foi utilizada a versão 2.5.2 do *software* (DNIT, 2024b).

3. APLICAÇÃO EM UM ESTUDO DE CASO

No intuito de testar o método proposto, este capítulo traz um estudo de caso das indicações de locais para fiscalização de peso através da aplicação do Sialoc. Adotou-se uma situação hipotética, na qual se pretende alocar três postos de pesagem na malha rodoviária federal de Santa Catarina, de forma a capturar fluxos distintos que atravessam o estado.

3.1. Configuração do cenário para cálculo do IVFP

O primeiro passo consistiu na configuração do cenário do *software* para cálculo do IVFP, onde optou-se por utilizar o cenário inicial editável do Sialoc, que já possuía os pesos de cada variável pré-definidos de acordo com a opinião técnica de profissionais da área. Estes pesos foram definidos durante o processo de concepção do *software* pelo LabTrans, através da aplicação de um questionário aos funcionários do DNIT, onde os mesmos deveriam ordenar as variáveis apontadas no método do IVFP de acordo com a sua importância para o problema de localização de equipamentos de fiscalização de peso em rodovias federais.

Vale ressaltar que o cenário adotado desconsidera trechos sob concessão, ou com estudos para concessão em andamento, considerando que o Sialoc foi desenvolvido voltado às demandas do DNIT. Além disso, optou-se por desconsiderar fatores, como sinuosidade e IRI, no cálculo do IVFP, devido a incompatibilidades do formato de suas bases com a atualização da base do SNV. Uma vez configurado e aplicado o cenário para o cálculo do IVFP, o *software* processou as bases e retornou a camada geográfica do IVFP com valores atualizados de acordo com os parâmetros pré-definidos.

3.2. Aplicação de filtros no mapa e criação de pontos de análise

Conforme citado anteriormente, o Sialoc possibilita a aplicação de filtros em suas camadas geográficas. Nesta etapa, foram aplicados os seguintes filtros de interesse (sequencialmente): **UF**: SC; **IVFP** ≥ 1,80; **VMDAp** ≥ 800 veículos pesados/dia. Como resultado, o programa retornou 8 trechos candidatos com potencial para fiscalização, sobre os quais foram criados 8 pontos de análise (Tabela 3).

Tabela 3: Dados dos pontos de análise criados no Sialoc

ID	Rodovia	Código SNV	Nome ponto	$IVFP_{cresc}$	$IVFP_{decresc}$	$VMDAp_{cresc}$	$VMDAp_{decresc}$	Corredores Logísticos
1	BR-153	153BSC1550	BR-153_a	1,95	1,98	1583	1577	Veículos consumo interno; Veículos exportação; Biodiesel
2	BR-153	153BSC1590	BR-153_b	2,11	2,06	1511	1450	Gasolina e diesel; Veículos consumo interno; Veículos exportação; Biodiesel
3	BR-282	282BSC0030	BR-282_a	2,02	1,94	2093	2107	Gasolina e diesel; Biodiesel
4	BR-282	282BSC0295	BR-282_b	1,93	1,90	970	977	Biodiesel
5	BR-282	282BSC0310	BR-282_c	2,04	2,05	1596	1611	Veículos exportação
6	BR-470	470BSC0060	BR-470_a	1,91	1,84	2477	2604	Biodiesel
7	BR-470	470BSC0160	BR-470_b	1,86	1,93	1976	2003	Biodiesel

8	BR-470	470BSC0210	BR-470_c	2,22	2,15	1809	1579	Min. de ferro consumo interno; Biodiesel

Observando a Tabela 3, é possível identificar que os pontos 4, 6 e 7 possuem os menores valores de IVFP entre os pontos candidatos. Ademais, o ponto 4 apresenta, também, os menores volumes de veículos pesados, o que sugere que os demais pontos possuem maior potencial para fiscalização. Partindo para análise dos históricos de acidentes, informação disponibilizada pelo *software* ao clicar sobre o trecho em que o ponto de análise foi criado, constatou-se que os pontos 3, 4, 5, 6 e 7 encontram-se nos trechos que apresentam maiores números de acidentes e fatalidades. Dessa forma, levando em consideração o alto valor de IVFP, o maior número de acidentes com veículos pesados, o elevado volume de veículos pesados, a presença de corredores logísticos e de estudos anteriores; optou-se por selecionar, no máximo, um ponto por rodovia (a fim de capturar fluxos distintos que atravessam o estado de Santa Catarina); e analisando cada ponto individualmente quanto à sua possibilidade de evasão, foram escolhidos os pontos: 2 (BR-153_b), 5 (BR-282_c) e 8 (BR-470_c).

3.3. Resultados do estudo de caso

A Figura 1 apresenta um *shapefile* com indicação dos locais selecionados para fiscalização de peso, e a Tabela 4, na sequência, exibe as principais informações geográficas dos pontos escolhidos.

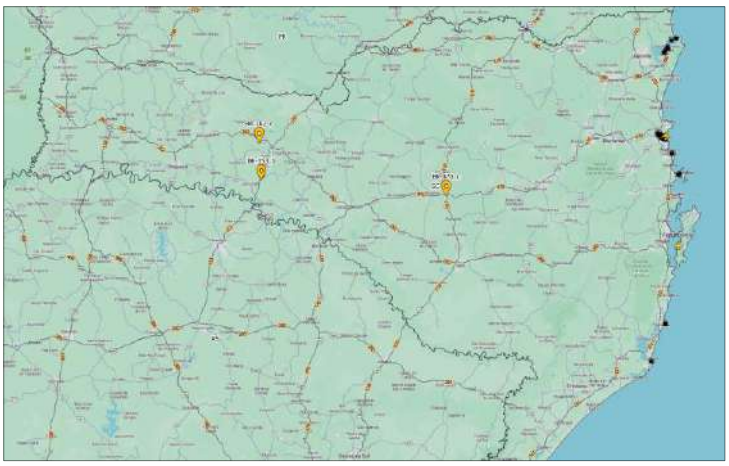


Figura 1: Locais selecionados para a instalação de postos de pesagem na malha rodoviária federal de Santa Catarina (Almeida, 2024)

Tabela 4: Informações geográficas dos pontos selecionados

ID	Rodovia	Cód. SNV	Km	Coordenadas (lat, long)	Município
2	BR-153	153BSC1590	92,5	(-27.187795, -51.933857)	Concórdia
5	BR-282	282BSC0310	449,9	(-26.919894, -51.954137)	Ponte Serrada
8	BR-470	470BSC0210	234,6	(-27.301985, -50.435459)	São Cristóvão do Sul

Finalmente escolhidos os locais para instalação da fiscalização de peso, foi feita uma conferência desses locais, via *Google Street View*, a fim de avaliar: a viabilidade de instalação quanto à sinuosidade e curvatura do trecho, se esse trecho se encontra em área urbana ou especial, e ainda, se a região dispõe de infraestrutura elétrica (postes). Através das imagens do *Google Street View*, pôde-se perceber que que os pontos se encontram em locais de pouca sinuosidade (variando de terreno plano à levemente inclinado), em trechos retilíneos de pista, e fora de áreas urbanas (o que diminui a tendência evasão dos transportadores). Além disso, é possível identificar nas três imagens a presença de postes de instalação elétrica, fato que também facilita a implementação dos postos de pesagem. Também foi verificado se os locais escolhidos não se encontravam em áreas especiais. Dito isso, os locais selecionados aparentam ser opções viáveis para a instalação de postos de pesagem – no sentido crescente da rodovia para o caso do ponto 2, e em ambos os sentidos para os pontos 5 e 8.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi possível constatar a eficácia do método proposto por Franceschi *et al.* (2019), o IVFP, por meio da sua aplicação utilizando o Sialoc, através da verificação de viabilidade dos pontos propostos na malha rodoviária federal catarinense. Também foi comprovada a utilidade e eficiência do *software* Sialoc, enquanto se testava suas funcionalidades. O *software* apresentou um bom tempo de resposta em termos de configuração

de cenário e reprocessamento das bases de cálculo, levando poucos minutos. Ademais, a localização de postos de pesagem é apenas uma das funcionalidades que o *software* proporciona, apresentando versatilidade quanto a sua utilização no âmbito de análises de dados e planejamento de transportes.

Agradecimentos
Os autores são gratos ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por viabilizar esse estudo através da autorização para uso do *software* Sialoc e seus dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, T. H. (2024). Uma aplicação do Sistema de Apoio à Localização de Postos de Pesagem – SIALOC na malha rodoviária federal de Santa Catarina. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil (2023). Aeródromos [recurso eletrônico]. Brasília: ANAC, 2023. Disponível em: https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aerodromos. Acesso em: 10 jan. 2024.

ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2024). Informações Geográficas [recurso eletrônico]. Brasília: ANTAQ, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/informacoes-geograficas. Acesso em: 24 fev. 2024.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2022). Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT). Estimativa do Volume Médio Diário Anual – VMDA [recurso eletrônico]. Brasília: DNIT, 2022. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Modelagem. Acesso em: 10 jan. 2024.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2024a). Repositório compartilhado por DNITGeo Geotecnologias Aplicadas [recurso eletrônico]. Brasília: DNIT, 2024a. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/oTpPRmYs5AAdiNr?path=SNV%20Bases%20Geom%C3%A9tricas%20(2013-Atual)%20(SHP). Acesso em: 10 jan. 2024.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2024b). Sistema de Apoio à Localização de Postos de Pesagem (Sialoc). Versão 2.5.2. Software. Brasília: DNIT, 2024b.

Franceschi, L.; Otto, G. G.; Kaesemodel, L.; Valente, A. M. (2020). Effects of drivers' evasive behavior on the placement of automated enforcement equipment in highway systems. *Transportes*, v. 28, n. 5, p. 235–251. [S.l.: s.n.], 2020.

Franceschi, L.; Otto, G. G.; Kaesemodel, L.; Valente, A. M. (2019). Elaboração de um processo multicritérios para apoio à localização de postos de pesagem em malhas rodoviárias. In: Anais 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Balneário Camboriú: ANPET, p. 2557–2566.

FUNAI. Fundação Nacional dos Povos Indígenas (2022). Terras Indígenas: Dados Geoespaciais e Mapas [recurso eletrônico]. Brasília: FUNAI, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas. Acesso em: 10 jan. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). Áreas Urbanizadas [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=downloads. Acesso em: 10 jan. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Malha Municipal [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html. Acesso em: 10 jan. 2024.

ICMBio. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2024). Dados geoespaciais de referência da Cartografia Nacional e dados temáticos produzidos no ICMBio [recurso eletrônico]. Brasília: ICMBio, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/dados_geoespaciais/mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-unidades-de-conservacao-federais. Acesso em: 24 fev. 2024.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (2021). Acervo Fundiário [recurso eletrônico]. Brasília: INCRA, 2021. Disponível em: https://acervofundiario.incra.gov.br/acervo/acv.php. Acesso em: 10 jan. 2024.

MTPA. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (2023). Corredores Logísticos Estratégicos (2017-2020) [recurso eletrônico]. Brasília: MTPA, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/planejamento-integrado-de-transportes/politica-e-planejamento/corredores-logisticos-estrategicos-2017-2020. Acesso em: 30 nov. 2023.

PPI. Programa de Parcerias de Investimentos (2023). Projetos. Brasília: PPI, 2023. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/projetos/. Acesso em: 10 jan. 2024.

PRF. Polícia Rodoviária Federal (2024). Dados Abertos da PRF: BAT- Boletim de Acidente de Trânsito [recurso eletrônico]. Brasília: PRF, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-da-prf. Acesso em: 10 jan. 2024.

Thayná Hammes de Almeida (thayna.hammes@gmail.com)
Eduardo Lobo (eduardo.lobo@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial (PPGTG), Campus Universitário bairro Trindade – Florianópolis, SC, Brasil.

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Carga

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO DE DANOS EM TRECHOS FERROVIÁRIOS AFETADOS POR QUEDA DE BLOCOS DE TALUDES

Lucas Américo Cunha Lisboa[1], **Marina Donato**[1,2], **Bruno Guida Gouveia**[3]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – ETG, [2]Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ – DTECH,
[3]Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ – DCCT

RESUMO
A queda de blocos em taludes próximos à via permanente representa risco significativo à operação ferroviária. Este estudo propõe alternativas para prevenir e mitigar danos decorrentes desses eventos, considerando a identificação de trechos críticos, análise da dinâmica dos trens e avaliação do tempo necessário para paradas seguras. Foram definidos dois cenários: (i) parada antes de atingir o trecho crítico, e (ii) parada dentro do trecho afetado. A metodologia inclui levantamento de dados técnicos do sistema ferroviário, análise de tempos de resposta dos sistemas de alerta e emprego de tecnologias para monitoramento e emissão de alertas. Os resultados esperados envolvem maior segurança operacional, definição de pontos estratégicos de parada e apoio à tomada de decisão em situações de emergência. O estudo contribui para a redução de riscos, otimização da operação e aumento da resiliência da infraestrutura ferroviária.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A instabilidade de taludes adjacentes à via permanente e a consequente queda de blocos sobre os trilhos configuram um dos principais desafios à operação segura e contínua do transporte ferroviário brasileiro. Esses eventos podem comprometer a integridade estrutural da ferrovia, causar interrupções severas nas operações logísticas e, em situações mais críticas, resultar em acidentes com potenciais danos humanos e materiais (Cunha et al., 2023). De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2023), a malha ferroviária nacional apresenta fragilidades históricas, como manutenção deficiente, ausência de ações preventivas sistematizadas e baixa cobertura de sistemas de monitoramento em áreas suscetíveis. Essa combinação de fatores intensifica a exposição ao risco, sobretudo em trechos com geometria restrita ou corte em encostas instáveis, onde a margem para ação corretiva é reduzida. A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2023) complementa essa análise ao evidenciar os impactos logísticos e econômicos causados por paralisações não programadas, que geram atrasos no transporte de cargas, aumentam o custo operacional e reduzem a confiabilidade do sistema ferroviário.

Nesse cenário, a identificação e o monitoramento sistemático de zonas de risco tornam-se essenciais para a gestão de segurança e continuidade da operação. A literatura técnica destaca que, embora existam tecnologias avançadas para detecção e previsão de movimentações de massa tais como sensores sísmicos, instrumentação para monitoramento e sistemas integrados de alerta precoce, ainda há desafios na resposta operacional rápida e na integração eficiente entre detecção, comunicação e ação (Zimmer et al., 2015; Penz, 2013). Conforme apontado por Costa et al. (2005), a definição precisa de trechos críticos e a elaboração de estratégias de mitigação baseadas em dados técnicos são fundamentais para trechos com gabaritos estreitos e elevado risco de instabilidade. Diante disso, esta pesquisa propõe uma abordagem metodológica estruturada para avaliar alternativas de prevenção e resposta operacional frente a quedas de blocos em trechos ferroviários. A proposta contempla a identificação de áreas críticas, o levantamento de parâmetros geométricos e operacionais da via e das composições e a definição de cenários de atuação para diferentes situações de risco. Busca-se, assim, contribuir para o aumento da resiliência da infraestrutura ferroviária, aprimorando os protocolos de tomada de decisão e otimizando a logística em contextos de risco elevado.

2. MATERIAIS E MÉTODO

A metodologia adotada nesta pesquisa foi estruturada em quatro etapas principais, com o objetivo de avaliar estratégias de mitigação de riscos operacionais em trechos ferroviários suscetíveis à instabilidade de taludes. Por meio dessa abordagem, busca-se definir um processo sistematizado que possa ser aplicado por operadores ferroviários em situações inesperadas que comprometam a segurança da via permanente. Tal sistematização visa promover maior confiabilidade e segurança à operação ferroviária, ao permitir respostas mais eficazes e fundamentadas frente a eventos geotécnicos adversos, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 1.

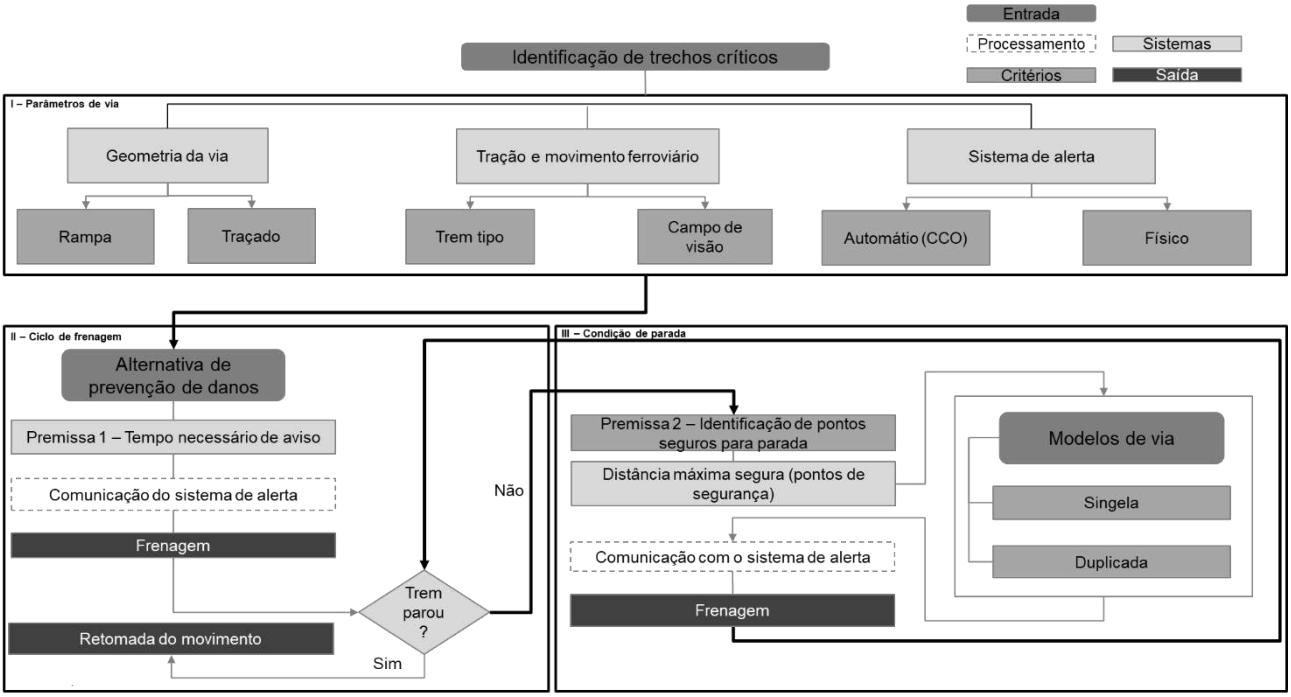


Figura 1: Proposta de procedimento metodológico.

2.1. Etapa 1 – Levantamento de dados

Serão mapeados trechos com histórico ou potencial de desmoronamentos, com base em registros operacionais, inspeções técnicas e dados pluviométricos. A análise contemplará as condições dos taludes, as características geométricas da via (declividade, raio de curvatura, superestrutura), bem como os sistemas de monitoramento existentes, incluindo tecnologias específicas para o acompanhamento de taludes. Ainda, serão coletadas informações sobre a geometria da via, rampa máxima e bitola adotada. Além disso, será necessário o conhecimento geomorfológico para identificar os locais de acesso, principalmente em áreas de difícil comunicação ou acesso. Outros parâmetros a serem considerados incluem o tipo de trem, o volume transportado, a velocidade média e a capacidade de frenagem.

2.2. Etapa 2 – Definição de cenários de análise

Foram considerados dois cenários operacionais na análise. O primeiro corresponde à situação em que a composição ferroviária encontra-se fora do trecho crítico, possibilitando a emissão de alerta prévio e a realização de parada segura antes da zona de risco. Já o segundo cenário refere-se à condição em que a composição já está inserida no trecho crítico no momento do alerta, exigindo a definição de pontos estratégicos ao longo da via para a execução de uma parada emergencial, de forma a minimizar os impactos operacionais e garantir a segurança.

2.3. Etapa 3 – Análise do Cenário 1

Serão avaliados os tempos de resposta dos sistemas de alerta e calculadas as distâncias de frenagem seguras, considerando diferentes perfis operacionais. Será também estimado o tempo mínimo necessário para o envio eficaz do alerta, relacionando-o à dinâmica ferroviária e à capacidade de detecção dos sensores.

2.4. Etapa 4 – Análise do Cenário 2

A análise contemplará a identificação de pontos alternativos para parada segura dentro da zona crítica, considerando aspectos como a inclinação da via, a estabilidade do maciço e o risco local. A escolha desses pontos terá como objetivo mitigar os impactos operacionais e permitir a retomada segura do movimento. A estrutura geral do processo de identificação dos trechos críticos seguirá três etapas interligadas: análise dos parâmetros ferroviários, cálculo do tempo mínimo de aviso e determinação dos pontos viáveis de parada.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Diante dos desafios impostos pelas condições geotécnicas em trechos ferroviários suscetíveis a instabilidades,

este estudo busca oferecer uma contribuição metodológica consistente para o planejamento seguro de paradas de emergência de composições ferroviárias. Ao propor um modelo que integra a caracterização do trecho, a definição de cenários operacionais e a análise dos tempos e distâncias necessários para a parada segura, pretende-se viabilizar respostas eficazes diante de eventos como a queda de blocos ou deslizamentos de taludes.

Os resultados esperados incluem a sistematização de um diagnóstico técnico-operacional que permita, com base em dados reais, compreender as limitações e potencialidades do sistema ferroviário frente a eventos geotécnicos extremos. A partir disso, serão definidos critérios objetivos para a seleção de pontos estratégicos de parada e para o dimensionamento de sistemas de monitoramento e alerta, com foco na antecipação de riscos e na minimização de impactos sobre a operação.

Adicionalmente, a estruturação de um fluxo metodológico aplicável a diferentes ferrovias de carga amplia a aplicabilidade prática do estudo, contribuindo para o fortalecimento da segurança operacional e para a eficiência da resposta em tempo real. Espera-se, assim, que as diretrizes propostas possam subsidiar políticas de gestão de risco e planejamento ferroviário, fomentando a resiliência das operações frente a cenários adversos e promovendo a sustentabilidade do transporte ferroviário em áreas geotécnicas sensíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres). (2023). *Relatório de desempenho da malha ferroviária brasileira*. Brasília.

COSTA, E. A. (2005). *Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CUNHA, A. P. R.; COSTA, P. A.; FERREIRA, R. D.; OLIVEIRA, R. M. Linha ferroviária do Sul: casos de instabilidade em taludes de escavação, ocorrências e medidas de estabilização. *Geotecnia*, n. 156, p. 53–78, 2023. Disponível em: https://spgeotecnia.pt. Acesso em: 7 jul. 2025.

CNT (Confederação Nacional do Transporte). 2023. *Diagnóstico da infraestrutura ferroviária brasileira: desafios e perspectivas*. Brasília.

PENZ, F. M. Gerenciamento da manutenção de obras geotécnicas em ferrovias. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ZIMMER, L. V.; SITAR, N. (2015). Detection and location of rock falls using seismic and infrasound sensors. *Engineering Geology*, v. 193, p. 49–60, 2015. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.04.007.

ESTUDO DE CUSTOS DE COMBUSTÍVEL PARA TRANSPORTE DE COMMODITIES AGRÍCOLAS NO MATO GROSSO

Samanta Soares Queiroga Maciel, Pedro Jose Perez Martinez
Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
No Brasil, os custos com combustível nos transportes representam cerca de 30% a 40% do custo final dos produtos, o consumo energético dos transportes terrestres corresponde a aproximadamente um terço do consumo mundial de energia. Entender os custos de transporte de commodities agrícolas é essencial para aumentar a competitividade do mercado brasileiro em relação a países como Estados Unidos, China e Argentina. O Mato Grosso é o maior produtor de grãos do Brasil, a logística neste estado enfrenta desafios geográficos e de infraestrutura que impactam diretamente os custos de transporte, visa entender e simular custos com o combustível. Como resultados os custos internos simulados para as rotas selecionadas das 41 cidades estudadas são em média 2,1 centavos de reais para o transporte multimodal e em média 9,4 por quilômetro percorrido e tonelada transportada para as rotas rodoviárias, sendo comprovada a eficiência da multimodalidade para o transporte de commodities agrícolas no Mato Grosso. Semelhantemente os custos externos multimodal simulados apresentaram média de 0,17 centavos de reais e para o rodoviário média de 0,74 centavos de reais.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior exportador de produtos agropecuários e o maior produtor de soja do mundo, sendo o estado do Mato Grosso o mais representativo nessa produção. A produção foi de 154.566,3 milhões de toneladas na safra de 2023 (EMBRAPA, 2023).
As dificuldades logísticas do Mato Grosso superam o volume produzido, pois o estado está localizado distante dos portos, a capital Cuiabá está localizada no centro geodésico da América do Sul. Segundo D´Agosto (2016). Portanto alternativas que reduzam distâncias de transporte são necessárias para diminuir o "*transit time*" (Tempo de percurso), custo e consumo energético.
Este trabalho tem como objetivo geral analisar os custos internos e externos das alternativas modais terrestres de transporte de mercadorias no estado do Mato Grosso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo de custos depende de muitas variáveis logísticas, como o volume, peso, modo de transporte e eficiência operacional. Para os transportes terrestres algumas estratégias de otimização de custos podem ser adotadas, como a consolidação de cargas, quanto mais próximo ao limite de transporte menor o custo unitário de transporte. Outra estratégia é a otimização de rotas, que reduzem distâncias e o uso de tecnologias, como o uso de roteirização inteligente e rastreamento de veículos. Por fim, a eficiência operacional que utiliza da sistematização de operações para otimização e gestão de recursos, uso de tecnologias, acompanhamento de indicadores e capacitações, prezando por atendimento ao nível de serviço (BALLOU, 2009).
Quando observados os efeitos econômicos a classificação de custos internos e externos cada um mede impactos e implicações diferentes. Os custos internos são provenientes de insumos, veículos, infraestrutura, seguros, combustíveis, manutenções e quaisquer outros que são associados diretamente a operação e desembolsados pelo transportador. Sendo os custos externos a composição de custos sociais e ambientais que trazem custos a indivíduos alheios a operação (BUTTON, 2010).

3. MÉTODO

3.1 Custos Internos

Para a parcela de consumo de combustíveis, o modelo a ser utilizado é o formulado por Garcia-Alvarez, Perez-Martinez e Gonzalez-Franco em 2013, desenvolveram uma formulação para descrever o consumo de energético, tanto de trens quanto de caminhões com motores a diesel.
Na formulação o consumo energético de transporte é descrito como a seguinte formulação:

$$C_{i,j} = 3{,}6 * 10^{-4} ls * \{[(A + Ac) * Mr + B * V^* + (cp * Sf + cf * pw * L) * V^{*2}] + \sum \left[\frac{1}{2}(Mr + Mrot) * V^{*2}max\right] * Kb * Ns + \sum [Mr * g * i * Ksb] * \frac{1}{\eta motor} + Caux \frac{1}{\eta aux}\} * Ce \quad (1)$$

Sendo, Ci,j o consumo energético em KWh, i o veículo e j a tecnologia do combustível nesse caso diesel, ls a distância percorrida em km, A o coeficiente de resistência de rolamento em daN/t, Ac o coeficiente de resistência de rolamento em curva em daN/t, Mr massa do veículo em t, B taxa de entrada de ar daN/ton, V* velocidade do veículo Km/h, cp coeficiente de arrasto de pressão daN/(km/h)²m², Sf seção dianteira do veículo

m², cf coeficiente de arrasto de atrito daN/(km/h)²m², pw perímetro molhado m, L comprimento do veículo m, Mrot massa rotativa do veículo t, V²max velocidade máxima quadrada (km/h)², Kb coeficiente de frenagem, Ns número de paradas equivalentes por 100 km número de paradas/100km, g aceleração da gravidade 9,8 m/s², i' declive da distância percorrida mm/m, Ksb coeficiente de frenagem em declives, ηmotor eficiência tanque-roda do veículo, Caux consumo de energia de serviços auxiliares kWh, ηaux eficiência dos serviços auxiliares e por fim Ce custo energético do litro de diesel em reais.

3.2 Custos Externos

Existem uma série de modelos para análise de custos externos de transportes, um deles será apresentado a seguir, desenvolvido na Europa com objetivo de compor as externalidades com elementos como acidentes, poluição atmosférica, mudanças climáticas, barulhos *Well-to-tank* (Emissões do poço ao tanque) (DELFT, 2020). O presente estudo adotou a formulação elaborada em 2013 por Pérez-Martínez e Vassallo-Magro para determinar custos externos de transportes.

$$CEi = \frac{10^{-4} * (Cco2 * ci)}{ti} \quad (2)$$

Sendo, Cco2 o custo de tonelada de CO_2 em R$, Ci intensidade de emissão e ti carga transportada denominador para estabelecimento de valor unitário por t*km.

3.3 Dados

A técnica a ser aplicada trata-se de uma modelagem para determinar custos das rotas a serem analisadas. A análise aplicou o cenário do Mato Grosso conforme dados da Confederação Nacional de Transportes, do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística e fatores do Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada. A seguir será apresentado detalhadamente os elementos do presente estudo, elencando:

Os produtos com produção com maior produção anual agrícola do IBGE de 2023, foram soja e milho, aplicando a proporção de exportação deste ano que foi 64% na produção foi possível obter a quantidade transportada total anual.

Os destinos são portos brasileiros que possuem atualmente volume desse tipo dos produtos mencionados no tópico anterior, sendo analisados os portos de Santos e Miritituba.

As origens são as cidades mato-grossenses serão as cidades do Mato Grosso que representam 80% da produção dos principais produtos soja e milho. Para a escolha das rotas, foram escolhidas as com menores distâncias para direcionar o modelo, com auxílio do Google Earth para identificar as rotas. As inclinações foram obtidas com maior e menor altitude com auxílio do Google Earth, identificando as altitudes pico e menores e distância percorridas entre elas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Custos Internos

Ambos os gráficos estão ordenados em ordem alfabética, curvas com comportamento semelhante, somente médias com grande variação na comparação entre os custos multimodais e rodoviários, com médias de 2,1 centavos de reais para 9,4 centavos de reais por quilômetro percorrido e tonelada transportada, respectivamente. Em ambas as rotas, Santos e Miritituba, a variabilidade de custos entre localidades tem maior amplitude nas soluções multimodais, isso é explicado pela condição das rodovias estaduais necessárias para chegar até os terminais, apresentando grandes inclinações e maior número de paradas na simulação.

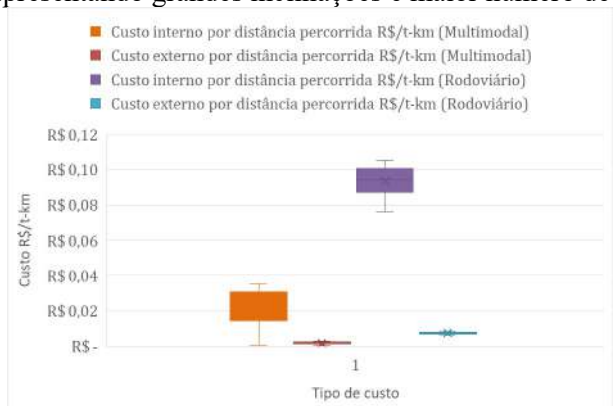


Figura 1: Comparativo de custo por tonelada quilômetro transportado

Os custos calculados se apresentaram compatíveis com outros modelos semelhantes que apresentam cerca de 20% a 40% dos custos de frete serem provenientes do consumo de combustível. No mercado atual, em 2024 a Rumo Logística teve um OPEX de 8,66 bilhões de reais, segundo a Trading Economics e segundo a companhia transportou no mesmo ano 79,8 bilhões de TKU, gerando um custo de 11 centavos por quilômetro tonelada transportada, os custos observados na simulação são de média 2,3 centavos, resultando em 21% do custo. Para os fretes rodoviários o preço médio do frete por quilômetro em 2024 foi de 6,81, segundo a Índice de Frete Edenred Repom transportando, sendo o veículo tipo de capacidade de 37 toneladas, resulta em 18 centavos de reais, com o custo de 6,2 centavos de reais resulta em 33% do custo.

4.2 Custos Externos

Para os custos externos a variabilidade do modo rodoviário é maior e apresenta também média de 0,17 centavos de reais e para o multimodal média de 0,74 centavos de reais. Portanto, apresenta um comportamento semelhante ao interno, por serem proporcionais a quantidade de combustível despendida para o transporte.

4.3 Indicadores e Discussões

Portanto, é notável a diferença entre o transporte rodoviário e o multimodal para cargas de grande volume, transportes que fazem carga com volume e peso superior têm vantagens. A expansão de ferrovias, hidrovias e outros modos de transporte alternativos são essenciais para que as soluções logísticas permitam uma melhor competitividade do Brasil frente ao mercado internacional de *commodities* agrícolas.

Quanto a indicadores de performance, a distância percorrida, a alternativa rodoviária é em média 37% menor que as multimodais, isso porque a ferrovia tem maiores restrições geométricas, porém, as menores inclinações o que pode compensar a maior distância ser percorrida no que tange custo com combustível. Outro importante indicador é o número de veículos, que é intimamente ligado ao fator de carga, sendo adotados nessa simulação rodoviário com 37 toneladas e ferroviário com 10.800 toneladas. Sendo necessário 2.090.894 veículos para transportar toda a produção na alternativa ferroviária e 4.500 trens por ano. Outro indicador é o tempo de percurso rodoviário é na média dos trechos de 22,35 horas, e o ferroviário 80 horas saindo de Rondonópolis e 63 horas de Alto Taquari, o que resulta em média nas alternativas multimodais 85 horas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Dinâmica da expansão da soja de 2014 a 2023 e disponibilidade de áreas com aptidão agrícola. Disponível em: < https://abiove.org.br/abiove_content/Abiove/Relatorio-de-Cerrado-2014-2023-1.pdf>.Acesso em: 24/02/2024.

BALLOU, Ronald H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial. Bookman editora, 2009.

BUTTON, Kenneth. Transport economics. Edward Elgar Publishing, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES - CNT. Anuário de transporte - 2022. Acesso em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Ferroviario/2-6-/Transporte-de-cargas>. Acesso em: 16 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. PAM - Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. 2023. Acesso em: 28 ago. 2024.

VALOR ECONÔMICO. Geração de crédito de carbono sobe no 1º trimestre de 2024 e seguem baixos. <Disponível em: https://valor.globo.com/brasil/esg/noticia/2024/04/26/geracao-de-credito-de-carbono-sobe-no-1o-trimestre-de-2024-e-precos-seguem-baixos.ghtml>. Acesso em: 09 jun. 2024.

VASSALLO, Jose Manuel; LOPEZ, Elena; PEREZ-MARTINEZ, Pedro J. Do charges to freight trucks and trains in the European union reflect their social marginal costs?: Application to the case of Spain. Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice, v. 21, n. 1, p. 13-24, 2012.

Samanta Soares Queiroga Maciel (samanta_s.q@hotmail.com)
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP (R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889)
Pedro Jose Perez Martinez (pjperez@unicamp.br)
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP (R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889)

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Passageiros

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ACESSO AO EMPREGO EM CIDADE TIRADENTES: ESTIMATIVAS DE IMPACTOS DA LINHA 16-VIOLETA E ESTUDO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS DE ESTAÇÕES

Caio Shinji Azuma, Guilherme de Almeida Martins, Gustavo Alcarde Grossi, Diego Bogado Tomasiello
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
O município de São Paulo apresenta baixa oferta de transporte sobre trilhos, quando comparada a cidades de porte semelhante no mundo. Este trabalho tem como objetivo estimar os impactos da implantação da linha 16 – Violeta do Metrô de São Paulo na acessibilidade do bairro de Cidade Tiradentes aos empregos do município de São Paulo e investigar alternativas de localização das duas estações dessa linha neste bairro. Com base em estimativas da acessibilidade atual e futura, concluiu-se que a linha tem o potencial de aumentar, em média, 399% a acessibilidade a empregos para moradores do bairro em viagens de até 60 minutos por transporte público. Com esses resultados, aplicou-se o método AHP para avaliar alternativas de localização para as duas estações em Cidade Tiradentes, com base em critérios como atendimento à maior demanda potencial, vulnerabilidade social do entorno, possibilidade de integração com outros modos de transporte e impacto ambiental.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transporte público na cidade de São Paulo é subdesenvolvido (Chiquetto *et al.*, 2022), possuindo extensão incompatível com a dimensão populacional e territorial da cidade, em comparação com exemplos similares como Nova York e Pequim. Tal fato reflete a forma com que o desenvolvimento urbano na cidade de São Paulo foi estruturado, muito voltado à motorização particular em detrimento ao transporte coletivo. O subdesenvolvimento do sistema de transporte, associado ao desbalanceamento na distribuição das oportunidades de emprego, resulta em um grande volume de viagens pendulares centro-periferia com motivo trabalho (Metrô, 2017). O acesso ao trabalho é um dos maiores desafios enfrentados no dia a dia da população paulistana, gastando em média 60 minutos por deslocamento, o que representa um gasto diário de aproximadamente duas horas com transporte público para a realização de sua atividade principal (Metrô, 2023). Essas viagens frequentemente envolvem múltiplos intercâmbios modais, como o uso combinado de ônibus alimentadores, linhas de trem ou metrô e caminhadas, o que aumenta a complexidade da mobilidade urbana e reforça a dependência de uma integração eficiente entre os diferentes meios de transporte. Uma das formas para se avaliar a eficiência do sistema de transporte e uso do solo é através de medidas de acessibilidade, que podem ser entendidas como "a facilidade (ou dificuldade) com que os locais da cidade são atingidos pelas pessoas e mercadorias, medida pelo tempo e pelo custo envolvido" (Vasconcelos, 1985), ou ainda como o "potencial de oportunidades para interação" (Hansen et al., 1959), sendo uma métrica que permite quantificar os benefícios de acesso decorrentes de um sistema de transporte e uso do solo (Ben-Akiva; Lerman, 1979). Em São Paulo, as regiões com baixa acessibilidade a empregos muitas vezes também apresentam população com menor renda e são áreas com menor cobertura de infraestrutura básica, como abastecimento de água, coleta e tratamento de lixo e esgoto, constituindo zonas com múltiplas privações (Slovic *et al.*, 2019), enquanto zonas de maior renda possuem, por exemplo, maiores vantagens no acesso a diversas oportunidades, como escolas.

Tendo isso em vista, este trabalho tem como objetivo estimar os impactos da implantação da linha 16 – Violeta do Metrô de São Paulo na acessibilidade do bairro de Cidade Tiradentes aos empregos do município de São Paulo e investigar alternativas de localização das duas estações dessa linha neste bairro.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

2.1.1. Linha 16-Violeta do Metrô de São Paulo

Segundo o Relatório Integrado 2023 do Metrô de São Paulo, a linha 16 - Violeta contará com 23 estações e percorrerá 31,9 km, conectando Cidade Tiradentes a estação Oscar Freire (Linha 4), com conexões com as estações Jardim Paulista (futura Linha 19), Paraíso (Linhas 1 e 2), São Carlos (Linha 10 - CPTM), Anália Franco (futura estação da Linha 2), Santa Marcelina (futura Linha 14 da - CPTM) e Cidade Tiradentes (futura estação da Linha 15)

2.1.2. Cidade Tiradentes

O bairro de Cidade Tiradentes está localizado no extremo leste do município de São Paulo, a aproximadamente 35 km do centro da cidade. De acordo com o Censo Demográfico de 2022, a região abriga 211.501 habitantes (IBGE, 2023) e a base de dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) aponta que, em 2022, havia aproximadamente 16 mil empregos formais no bairro, sendo possível notar um claro desequilíbrio entre ofertas

de emprego e residentes no bairro, o que caracteriza uma expressiva dependência de deslocamentos para outras regiões da cidade. A Pesquisa Origem e Destino (OD) (Metrô, 2023) consultada corrobora essa tendência, indicando que grande parte dos deslocamentos realizados pelos moradores da Zona Leste, especialmente de bairros periféricos como Cidade Tiradentes, são motivados por questões relacionadas ao trabalho.
No bairro, estão previstas duas estações da linha 16: a Estação Cidade Tiradentes, localizada próxima ao atual terminal de ônibus homônimo, e a Estação Fazenda do Carmo, situada nas imediações da Estrada Iguatemi, importante eixo viário da região (SPTrans, 2023). A implantação desta linha é estratégica para a ampliação da acessibilidade no bairro, que atualmente depende quase exclusivamente do transporte por ônibus.

2.2. Cálculo da Acessibilidade

Para calcular as acessibilidades aos empregos, estimaram-se os tempos de viagem entre origens e destinos e os empregos formais em diferentes níveis de agregação espacial. A Figura 1 apresenta os processos para o cálculo da acessibilidade a empregos.



Figura 1: Processos para o cálculo da acessibilidade.

As matrizes de tempos de viagem foram geradas por meio do pacote r5r (Pereira; Herszenhut, 2023) na plataforma RStudio. O pacote r5r combina dados de redes viárias, no caso deste trabalho Open Street Map (OSM) e, opcionalmente, dados de redes de transporte público, GTFS (SPTrans 2024), e topografia para criar uma rede de transporte multimodal que permite gerar rotas de viagens entre pares de origens e destinos. Foram consideradas duas unidades de agregação espacial nas origens dos pares OD (origem-destino): os hexágonos H3 de resolução 9 e os setores censitários. Os hexágonos, com nível intermediário de agregação espacial, são adequados para avaliar impactos urbanos mais amplos da instalação da linha de metrô. Já os setores censitários, menores e com dados populacionais associados, foram usados especificamente para analisar o impacto do posicionamento das estações na subprefeitura de Cidade Tiradentes, por sua maior sensibilidade à distância dos centroides até os pontos de acesso.
As zonas de destino foram definidas como os centroides dos hexágonos H3-9, com dados de vínculos empregatícios ativos provenientes da RAIS 2023. Foram selecionados os modos de viagem a pé e transporte público, com distância máxima de caminhada de 1500m, tempo máximo de viagem de 2 horas e horário de partida às 7h do dia 4 de outubro de 2024 (sexta-feira). A matriz de tempo de viagem foi gerada com base no tempo mediano. Em seguida, foram excluídas as viagens com duração superior a 60 minutos, que é o tempo médio de viagens motivo trabalho (Metrô, 2023). Por fim, foi calculada a acessibilidade cumulativa aos empregos somando todos os empregos das zonas de destino acessíveis em 60 minutos de tempo de viagem. Os dados de acessibilidade foram exportados em geopackage para uso no QGIS.

2.3. Estudos de Alternativas Locacionais das Estações

A análise das estações referenciais (denominadas posteriormente como "Cenário Base") e das possíveis alternativas de localização das duas estações, Fazenda do Carmo (F) e Cidade Tiradentes (C), foi realizada a partir de uma análise multicritério – AHP – que consiste na decomposição e síntese de uma série de fatores e critérios que, a partir da relação existente entre si, resulta em uma priorização de determinados indicadores para que se obtenha uma medição única e otimizada de desempenho entre proporções de medições (Saaty, 1991). Esse método é principalmente aplicado em análises multicritério, planejamento e resolução de conflitos, tópicos que são aplicados e desenvolvidos no presente trabalho.

Tabela 1: Critérios e indicadores da matriz de decisão

Critério	Peso do Critério	Indicador	Descrição	Peso do Indicador
Acessibilidade	0,293	Empregos acessados	Número de empregos acessados após a inserção da alternativa (empregos)	0,558
		Caminhamento médio	Média dos caminhamentos, pelo viário do entorno da estação, até intersecção desse viário com o perímetro de círculo de 600 metros de raio, traçado a partir do centro de plataforma da estação	0,442
Adequação ao interesse público	0,280	Densidade de empregos por população	Total de empregos dividido pela população total do setor censitário (empregos/habitantes)	0,176
		Densidade de empregos por área	Total de empregos dividido pela área média do setor censitário (empregos/m²)	0,176
		População de baixa renda	Total de população com renda das pessoas responsáveis até 1,5 salários-mínimos no entorno de 600 metros da estação (habitantes)	0,178
		Equipamentos urbanos	Número de equipamentos urbanos em um raio de 600 metros em torno das estações (adimensional)	0,147
		Potencial para empreendimentos associados	Área potencial para edificação e construção de novos empreendimentos em áreas em envoltória de 600 metros de raio no entorno da estação (m²)	0,142
		Relevância dos equipamentos urbanos	Relevância dos equipamentos urbanos de educação, saúde, cultura e lazer localizados num raio de 600 metros em torno das estações de metrô (adimensional)	0,181
Facilidade na execução	0,207	População vulnerável (a ser deslocada)	Desapropriações necessárias em cada alternativa de localização da estação (adimensional)	0,502
		Interferências	Interferências com potencial de impactar significativamente as alternativas de localização da estação (adimensional)	0,498
Impactos ambientais	0,220	Interferências com unidades de conservação e patrimônios protegidos	Número de UCs e/ou patrimônios protegidos que possuam interferência com uma envoltória de 600 metros de raio (adimensional)	0,354
		Recursos hídricos	Número de recursos hídricos que possuam interferência com uma envoltória de 600 metros de raio (adimensional)	0,323
		Áreas verdes	Área total de praças, parques e áreas verdes afetadas pelo projeto (m²)	0,323

A definição dos critérios e indicadores foram feitos a partir da utilização de exemplos práticos com outras linhas em projetos de expansão do Metrô, como a Linha 19 – Celeste e a Linha 20 – Rosa (Metrô, 2023), de forma a representar de maneira mais fidedigna a análise necessária para uma obra desse porte.
Os valores dos pesos dos critérios foram obtidos a partir de uma comparação entre pares conduzida pelo Metrô (cujo número de pesquisados não foi especificado) e apresentada em relatório de estudo de alternativas (Metrô, 2023), para entender qual critério possui maior importância na visão do usuário. Além disso, os indicadores e respectivos pesos utilizados para avaliação do critério foram normalizados para que a soma resulte em 1,0. Por fim, cada indicador é avaliado por meio de uma escala de pontuação pré-determinada (Metrô, 2023), que varia de 0 a 1 para formar a nota técnica da alternativa dentro do respectivo indicador e critério (Tabela 1).

3. RESULTADOS

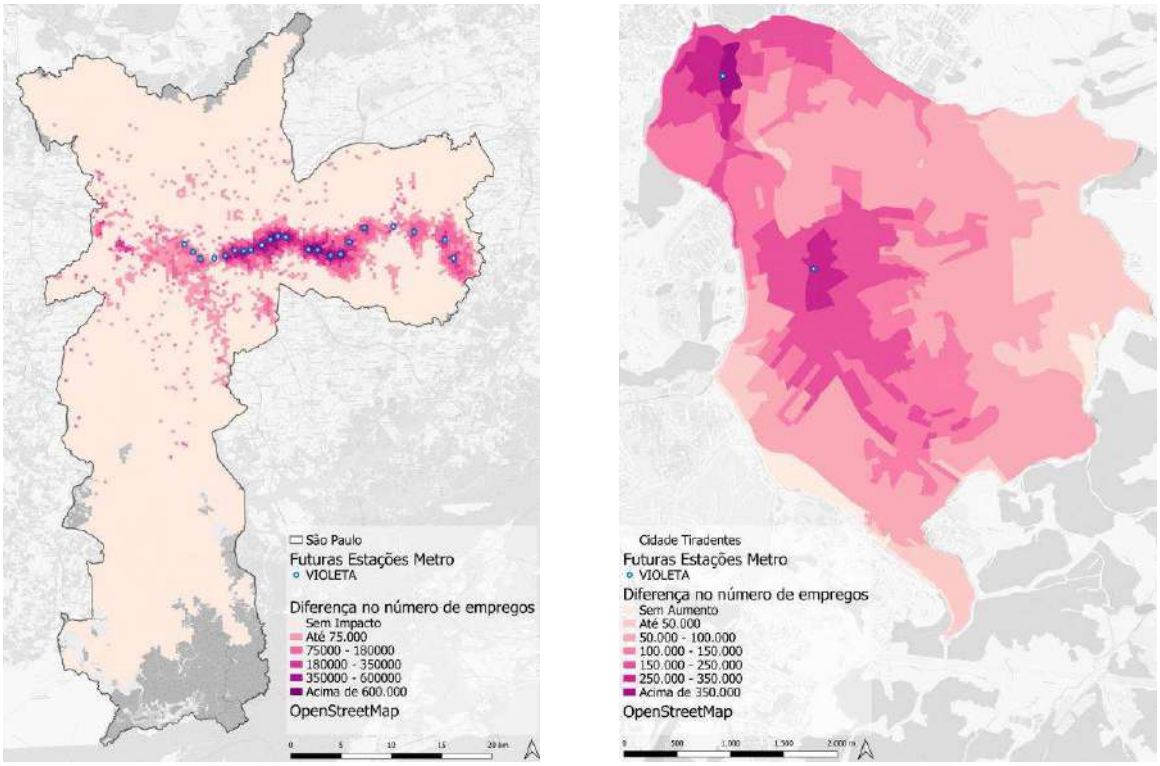
3.1. Análise da Acessibilidade

3.1.1. Cidade de São Paulo

A partir das matrizes de tempos de viagem geradas tendo como origens e destinos os hexágonos H3, foi estimado o número de empregos acessados em cada um dos 14.354 hexágonos com a oferta atual e planejada com a implementação do projeto da linha 16 violeta.
Em primeiro plano, nota-se que as zonas centrais da cidade de São Paulo possuem maior acessibilidade a empregos, com valores acima de 1.000.000 de empregos acessados em 60 minutos de tempo de viagem por transporte público. Nota-se que, em viagens de até 60 minutos, a proximidade ao transporte público é um dos principais fatores de acesso, não apenas a empregos, mas também à cidade como um todo, sendo que a maioria dos hexágonos com mais empregos acessados está localizada próxima a esses eixos.
As áreas com maior variação de acessibilidade são próximas às futuras estações da Linha 16, onde a região central da linha possui o maior aumento de acessibilidade devido à equidistância em relação às estações finais, além de permitir um melhor aproveitamento da linha no tempo de viagem estabelecido, tanto para a região central quanto para a periférica.

3.1.2. Bairro de Cidade Tiradentes

Para o cenário atual de oferta de transporte público, nota-se que a maioria dos setores censitários possuem um valor inferior a 30.000 empregos acessados, com o valor máximo sendo inferior a 120.000 e média de 24.583. Com a inserção da linha 16, houve uma melhora significativa, com valores chegando a 501.605 empregos acessados e com um aumento médio de 399% com um valor máximo de 1.406%.



(a) (b)

Figura 2: Aumento do número de empregos acessados em (a) São Paulo (b) Cidade Tiradentes.

Para verificar a significância estatística dos impactos da Linha 16 - Violeta na acessibilidade a empregos, foram realizados uma série de testes T de Student. Os resultados indicaram que os impactos são significativos no nível de acessibilidade dos setores censitários, com o valor de P de $2{,}2x10^{-16}$.

3.2. Resultados da AHP para a Locação Espacial das Estações

A partir dos critérios listados anteriormente para a avaliação da localização das estações nos cenários base e alternativos, conclui-se que a alternativa F-2 possui melhor avaliação dentre as alternativas estudadas, até mesmo em comparação com o cenário base, por conta da redução dos possíveis impactos ambientais da implantação da alternativa. Também é possível notar que o cenário base e o cenário C-2 possuem avaliações finais semelhantes, com uma combinação dos cenários F-2 e Base ou F-2 e C-2 como melhor alternativa de implantação do traçado da Linha 16 – Violeta. Vale ressaltar que a escolha da melhor alternativa de locação considera algumas premissas: apenas empregos formais foram incluídos; o caminhamento foi estimado a partir de um comportamento homogêneo dos pedestres; e a estruturação do modelo de acessibilidade aos empregos por meio do acréscimo das estações da Linha 16 – Violeta, sem a provável reconfiguração do uso do solo e do itinerário dos ônibus da região, que possivelmente centralizariam a frota para integrar as estações implementadas.

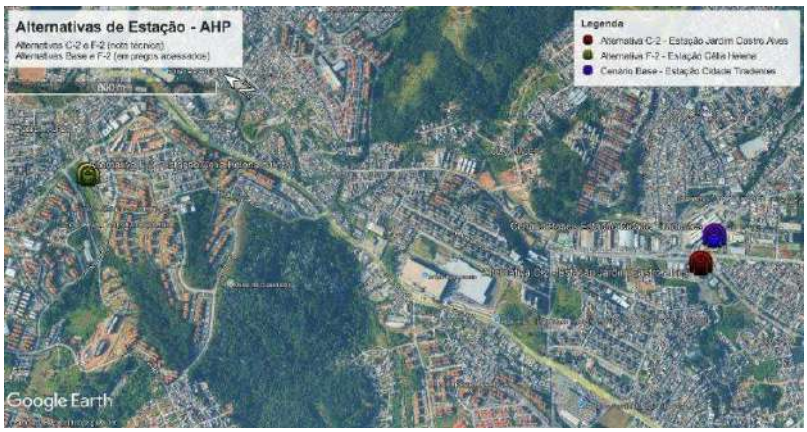


Figura 3: Alternativas escolhidas a partir da análise multicritério

CONCLUSÃO

O trabalho estimou os impactos da implantação da linha 16 – Violeta do Metrô de São Paulo na acessibilidade do bairro de Cidade Tiradentes aos empregos do município de São Paulo e analisou alternativas de localização das duas estações dessa linha neste bairro. Utilizando matrizes de tempo de viagem e a análise multicritério (AHP), observou-se um aumento médio de 399% na acessibilidade a empregos em Cidade Tiradentes e de 8% no município. Apesar de limitações como o uso de modelos estáticos, a ausência de reconfiguração da rede de ônibus e a restrição a dados de empregos informais e da região metropolitana, os resultados foram expressivos e validam a metodologia adotada. O estudo reforça a importância de planejar grandes obras de mobilidade com sensibilidade territorial e social, destacando que a expansão da Linha 16 pode representar uma transformação concreta para Cidade Tiradentes e um avanço na construção de uma cidade mais integrada, conforme propõe o Plano Diretor de São Paulo, além de propor uma motivação inicial para outros estudos na área, que englobem pontos não discutidos no presente trabalho, como a reconfiguração do uso do solo e a implementação de uma rede de transporte que considere as linhas de ônibus da região visando a um fluxo mais integrado entre as estações de metrô e os ônibus, para ampliar o acesso ao emprego na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chiquetto, Júlio B.; Leichsenring, Alexandre R.; Ribeiro, Flávia N. D.; Ribeiro, Wagner C. Work, housing, and urban mobility in the megacity of São Paulo, Brazil. Socio-Economic Planning Sciences, [S. l.], v. 81, p. 101184, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101184.

Ben-Akiva, Moshe; Lerman Steven R. Disaggregate Travel Aand Mobility-Choice Models and Measures of Acessibility. Behavioural Travel Modelling, 1ª edição, p. 654–679, 1979 DOI: https://doi.org/10.4324/9781003156055-39.

Da Silva, Ricardo (2024). Tempo de deslocamento como barreira à acessibilidade urbana na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Brasil. Geografares, v. 4, n. 38, 2024. DOI: https://doi.org/10.47456//geo.v4i38.43310.

IBGE. Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados. 2023. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102011 (acesso em 03/09/2025)

HANSEN, Walter G. How Accessibility Shapes Land Use. Journal of the American Institute of Planners, *[S. l.]*, v. 25, n. 2, p. 73–76, 1959. DOI: https://doi.org/10.1080/01944365908978307.

METRÔ (2023) Pesquisa Origem Destino 2023 - Relatório Síntese. Disponível em: https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/pesquisa-origem-e-destino-2023-relatório-síntese/resource/1c5e1c75-7790-4e13-8545 (acesso em 03/09/2025)

METRÔ (2023) Estudo de Alternativas Locacionais, Modais e Tecnológicas – Linha 19 – Celeste. Disponível em: https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/eiarima-estudo-de-impacto-ambiental-e-relatório-de-impacto-ambiental-da-linha-19-celeste-10 (acesso em 03/09/2025)

Pereira, Rafael H.M.; Herszenhut, Daniel (2023) Introdução à acessibilidade urbana: um guia prático em R. Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. DOI: https://doi.org/10.38116/9786556350547.

RAIS 2023, Microdados RAIS e CAGED, Ministério do Trabalho e Emprego, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/estatisticas-trabalho/microdados-rais-e-caged (acesso: 12/09/2025)

Saaty, R. W (1991) The Analytic Hierarchy Process—what it is and how it is used. Mathematical Modelling, v. 9, n. 3-5, p. 161–176, 1987. DOI: https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8.

Slovic, Anne Dorothée; Tomasiello, Diego Bogado; Giannotti, Mariana; Andrade, Maria de Fatima; Nardocci, Adelaide C (2019). The long road to achieving equity: Job accessibility restrictions and overlapping inequalities in the city of São Paulo. Journal of Transport Geography, v. 78, p. 181–193, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.06.003.

SPTrans. Relatório Integrado da Administração 2023 (2023). Disponível em: https://www.sptrans.com.br/relatorio-integrado-da-administracao-2023. (acesso: 03/09/2025)

Caio Shinji Azuma (caioazuma@usp.br)
Guilherme de Almeida Martins (guimartins19@usp.br)
Gustavo Alcarde Grossi (grossigst@usp.br)
Diego Bogado Tomasiello (diego.tomasiello@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 nº. 83. Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil) – São Paulo, Brasil

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE DADOS MÓVEIS NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES NA EUROPA

Gabriel José da Silva[1], Déborah Oliveira Rezende[1], Henrique Costa Braga[1], Renato Guimarães Ribeiro[1], Thiago Magela Rodrigues Dias[1], Gray Farias Moita[1]
[1]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

RESUMO
Este estudo investiga a utilização de dados móveis no planejamento de sistemas de transporte no velho continente. A análise abrange as cinco cidades mais populosas de cada país da União Europeia, além das cinco maiores do Reino Unido. Os resultados indicam que a maioria dessas cidades emprega dados móveis, fornecidos por operadoras de telefonia, em alguma etapa do processo de planejamento. Constatou-se, no entanto, a necessidade de dados complementares para subsidiar as pesquisas. A pesquisa demonstra que esses dados permitem planejar de modo mais eficaz a reestruturação de redes existentes, readequar os sistemas de transporte público de modo mais eficiente e a subsidiar planos de mobilidade urbana. Adicionalmente, identificou-se a disponibilidade de conjuntos de dados abertos de telefonia móvel, bem como scripts em Python pré-desenvolvidos para facilitar sua análise. Os achados reforçam o potencial dos dados móveis como ferramenta estratégica para o planejamento urbano sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A etapa de aquisição de dados configura-se como uma das mais onerosas e demoradas no processo de planejamento de transportes. Tradicionalmente, essa coleta é realizada por meio de pesquisas domiciliares de origem e destino, que demandam grande quantidade de recursos financeiros e humanos. Guerra *et al*. (2014) mencionam que os custos e o tempo de execução deste tipo de pesquisa são muito elevados restringindo a frequência de sua aplicação. Essas pesquisas, embora consolidadas na literatura técnica, apresentam limitações importantes, como a necessidade de extensas equipes de campo, longos prazos de execução e a obtenção de amostras frequentemente reduzidas. Além disso, os dados gerados podem apresentar inconsistências, seja pela subjetividade dos entrevistados ou pela variabilidade na atuação dos entrevistadores.

Nesse contexto, a busca por métodos alternativos e mais eficientes tem se intensificado nas últimas décadas. Um dos avanços mais promissores é a utilização de dados móveis provenientes de operadoras de telefonia celular (Chung, Nam, 2024; Fu *et al.,* 2024; Graells-Garrido *et al.,* 2023; Pavon *et al.,* 2025; Tsumura *et al.,* 2022; Zhou *et al.,* 2024). Esses dados, gerados em larga escala, possibilitam a obtenção de informações espaciais e temporais sobre os deslocamentos da população, superando muitas das limitações impostas pelas pesquisas tradicionais. Sua aplicação tem potencial para transformar significativamente a forma como as matrizes origem-destino são construídas e atualizadas, como estimativa de demanda (Montero *et al.,* 2022; Shang *et al.,* 2023), detecção do modo de viagem (Andersson *et al*., 2022; Viallard *et al.*, 2024) e propósito da viagem (Li *et al.,* 2022).

Apesar de haver várias cidades ao redor do mundo em que os planejadores de transportes utilizam dados móveis em alguma parte do processo de planejamento, é importante conhecer também qual o nível de maturidade dessa tecnologia, seus usos mais comuns, suas limitações e oportunidades visando uma aplicação prática no Brasil. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo investigar o estado da arte e o grau de utilização dos dados móveis no processo de planejamento de transportes, especificamente na Europa, local em que o uso é mais difundido. Busca-se compreender como esses dados vêm sendo utilizados por instituições públicas e privadas, bem como os desafios metodológicos e tecnológicos associados à sua implementação. Além disso, são objeto de análise as decisões tomadas pelos planejadores de trânsito com base nos dados fornecidos, assim como a verificação da disponibilidade pública desses dados na internet. Os resultados da pesquisa serão importantes subsidiar uma aplicação prática e científica do uso de dados móveis no processo de planejamento de transportes em grandes regiões metropolitanas do Brasil, como na RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte.

2. METODOLOGIA

Visando atingir os objetivos propostos, são utilizadas as etapas propostas nos itens a seguir.

2.1. Definição das cidades pesquisadas

O primeiro passo da pesquisa consistiu na definição das cidades que seriam objeto de análise, priorizando

aquelas com maior probabilidade de utilizarem dados móveis em alguma etapa do planejamento de transportes. Considerando-se que os países da União Europeia (EU) se destacam pelo desenvolvimento e adoção de tecnologias inovadoras na área de mobilidade urbana, optou-se por incluir, na amostra, as cinco cidades mais populosas de cada Estado-membro da União Europeia.

Além disso, foram incluídas também as cinco cidades mais populosas do Reino Unido, apesar de este não integrar mais a EU. A inclusão do Reino Unido justifica-se pelas fortes semelhanças econômicas, culturais e científicas com os países do bloco europeu, bem como pelo elevado grau de desenvolvimento tecnológico e pela proximidade geográfica. Essa escolha buscou assegurar uma amostra abrangente, representativa e alinhada com o objetivo do estudo de investigar contextos urbanos com alto potencial de aplicação de dados móveis no planejamento de transportes. Na Figura 1 são mostradas as cidades alvos dessa pesquisa.

País	Cidade	País	Cidade	País	Cidade	País	Cidade	País	Cidade	País	Cidade	País	Cidade
Alemanha	Berlim	Chipre	Nicósia	Eslovênia	Liubliana	França	Paris	Itália	Roma	Malta	Valeta	Reino Unido	Londres
	Hamburgo		Limassol		Maribor		Marselha		Milão		Birkirkara		Birmingham
	Munique		Larnaca		Celje		Lyon		Nápoles		Mosta		Liverpool
	Colônia		Famagusta		Kranj		Toulouse		Turim		Qormi		Nottingham
	Frankfurt		Paphos		Velenje		Nice		Palermo		Sliema		Sheffield
Áustria	Viena	Croácia	Zagreb	Espanha	Madri	Grécia	Atenas	Letônia	Riga	Países Baixos	Amsterdã	República Tcheca	Praga
	Graz		Split		Barcelona		Tessalônica		Daugavpils		Roterdã		Brno
	Linz		Rijeka		Valência		Pátras		Liepāja		Haia		Ostrava
	Salzburgo		Osijek		Sevilha		Heraclião		Jelgava		Utrecht		Plzeň
	Innsbruck		Zadar		Zaragoza		Lárissa		Jūrmala		Eindhoven		Liberec
Bélgica	Bruxelas	Dinamarca	Copenhague	Estônia	Tallinn	Hungria	Budapeste	Lituânia	Vilnius	Polônia	Varsóvia	Romênia	Bucareste
	Antuérpia		Aarhus		Tartu		Debrecen		Kaunas		Cracóvia		Cluj-Napoca
	Gante		Odense		Narva		Szeged		Klaipėda		Łódź		Timi?oara
	Charleroi		Aalborg		Pärnu		Miskolc		Šiauliai		Wrocław		Ia?i
	Liège		Esbjerg		Kohtla-Järve		Pécs		Panevėžys		Poznań		Constan?a
Bulgária	Sófia	Eslováquia	Bratislava	Finlândia	Helsinque	Irlanda	Dublin	Luxemburgo	Luxemburgo	Portugal	Lisboa	Suécia	Estocolmo
	Plovdiv		Košice		Espoo		Cork		Esch-sur-Alzette		Porto		Gotemburgo
	Varna		Prešov		Tampere		Limerick		Differdange		Vila Nova de Gaia		Malmö
	Burgas		Žilina		Vantaa		Galway		Dudelange		Amadora		Uppsala
	Ruse		Nitra		Oulu		Waterford		Ettelbruck		Braga		Vasterás

Figura 1: Cidades pesquisadas

2.2. Informações sobre as cidades pesquisadas

Definidas as cidades a serem pesquisadas, passou-se para a definição dos itens a serem pesquisados. Foi pesquisado, através do site Google, várias informações, conforme visualizado na Figura 2.

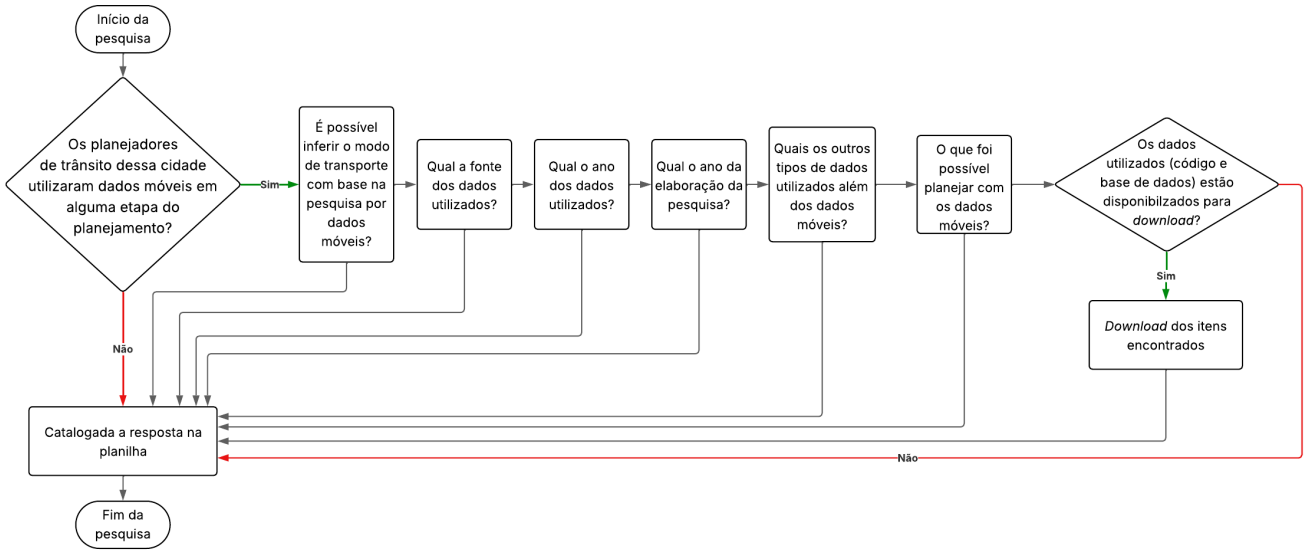


Figura 2: Fluxograma da condução da pesquisa

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro aspecto analisado foram as cidades que empregam dados móveis no planejamento de transportes. Das 140 cidades pesquisadas, 71 (50,7%) já utilizam esse recurso em alguma etapa do processo, o que evidencia tanto o amadurecimento do tema quanto a ampla difusão da tecnologia no continente europeu. Esse resultado indica uma tendência de redução da dependência exclusiva das pesquisas origem–destino baseadas em formulários, que, apesar de ainda relevantes, vêm apresentando limitações de custo, tempo e abrangência. Ressalta-se, contudo, que tais pesquisas continuam a desempenhar papel fundamental, sobretudo em contextos onde não há disponibilidade de ferramentas digitais, bases de dados ou equipes capacitadas, além de serem valiosas como fonte de comparação e validação dos resultados obtidos a partir de dados móveis.

Os resultados mostram que a maioria das grandes cidades da União Europeia utilizam dados móveis no processo de planejamento, há aproximadamente cinco anos, mostrando que o tema é atual e em expansão. Os dados utilizados são, na sua maioria, dos anos de 2020 e 2021 como mostrado na Figura 3. Para a elaboração do gráfico, considerou-se que, se uma determinada cidade utilizou dados de 2018 a 2022, foram incluídos todos os anos desse intervalo: 2018, 2019, 2020, 2021 e 2022.

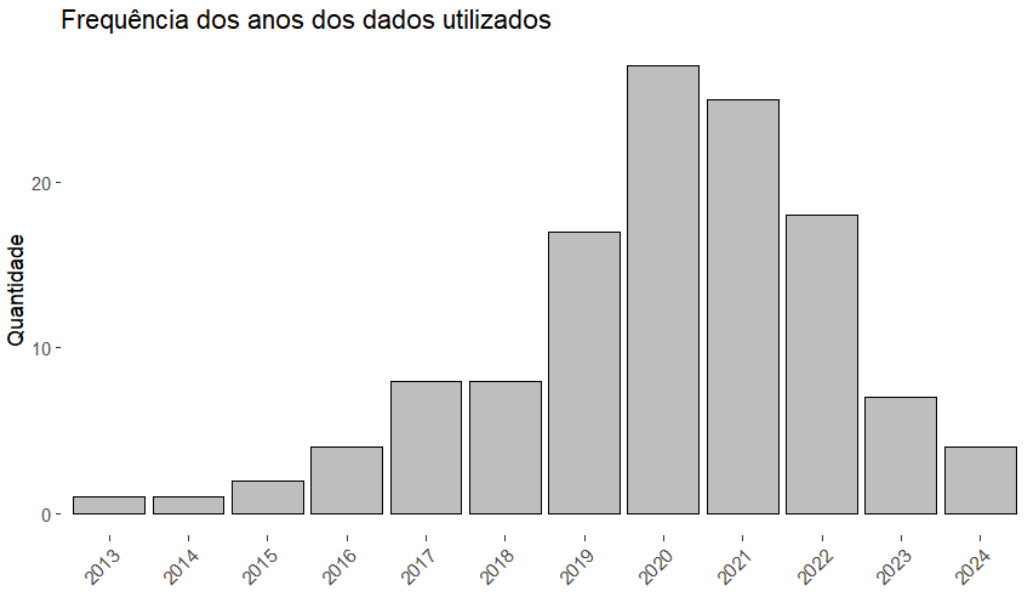


Figura 3: Anos dos dados das pesquisas

Com base na Figura 3 é possível verificar que os planejadores de trânsito das cidades europeias estão com uma experiência nos usos dos dados móveis para planejamento de transportes. Além disso, a grande maioria dos dados são do período da pandemia, o que pode ser que não reflitam a necessidade atual, vista a mudança da dinâmica de transportes ocorrida após a pandemia, pois segundo Borowska-Stefanska, *et al.* (2024) a pandemia alterou a frequência e duração das viagens e os modos de transporte.

Os dados são fornecidos por operadoras de telefonia móvel que operam na região pesquisada. Tipicamente, esses dados são de domínio das empresas de telefonia, o que significa que seu acesso depende de contratos específicos ou da compra de licenças de uso de plataformas fornecidas por essas empresas. Esses contratos podem envolver valores consideráveis, a depender da quantidade de dados extraídos (Viana *et al.,* 2024).

Os arquivos utilizados são, na maioria das vezes, na extensão .csv contendo *Call Data Records* (CDR) anonimizados. No trabalho de Aasa (2019) é possível verificar os arquivos em formatos *.csv* com o ID Origem-destino das cidades da Estônia. Também foram utilizados outros dados para complementar as pesquisas em que, na sua maioria, foram dados do transporte público, dados do censo (pesquisa por domicílios), dados de censores urbanos e dados de aplicativos na maioria das cidades.

Com a pesquisa utilizando dados móveis foi possível planejar vários itens, destacando-se redesenho da rede de transportes, planejamento da rede viária, otimização do transporte público e planos de mobilidade urbana. Na cidade da Antuérpia-BEL, por exemplo, utiliza os dados obtidos para monitorar e analisar a mobilidade na cidade (EU Urban Mobility Observatory, 2023).

Foi identificado também dados utilizados no planejamento de transportes, assim como códigos em Python, da cidade de Lisboa (AMA, 2025). Apesar da existência de diversas referências sobre planos de transporte, estimativas de demanda e dados em tempo real, os códigos e dados utilizados nas análises raramente estão disponíveis publicamente para a maioria das cidades. Isso se deve, provavelmente, ao alto valor estratégico dessas informações, o que impede sua divulgação gratuita. Além disso, o desenvolvimento dos códigos requer um volume significativo de trabalho e um nível elevado de especialização técnica, o que contribui, provavelmente, para a escassez de materiais acessíveis na rede.

4. CONCLUSÃO

Com essa pesquisa foi possível diagnosticar a situação atual da utilização de dados móveis no planejamento de transportes na Europa. Foi possível verificar a quantidade de cidades da Europa que utilizam dados móveis em alguma fase do planejamento, dentre as cinco cidades mais populosas de cada país, e com isso, verificar que o uso dessa ferramenta está bastante difundido no velho continente.

Verificou-se que os dados são de posse de operadoras de telefonia móvel que podem ser fornecidos por meios de contratos e/ou concessões e estes dados não violam leis de proteção de dados. Estes dados são, geralmente, uma planilha em que contém a quantidade de ligações/mensagens e a localização da antena mais próxima.

Os dados utilizados são, na maioria, de seis anos atrás, verificando que o uso de dados móveis para planejamento de transportes na Europa é difundido e utilizado. Foi possível verificar também que são necessários outros tipos de dados para que as pesquisas atinjam os seus objetivos e não apenas os dados de ligação/mensagens. Finalmente, foi possível identificar fontes de dados móveis de alguns países, assim como códigos em Python que serão alvos de estudos para verificar a aplicabilidade e adequabilidade em cidades brasileiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG pelo auxílio para elaboração do artigo e participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aasa, A., (2019). *OD-matrices of daily regular movements in Estonia*. University of Tartu, Mobility Lab. DOI: 10.23659/UTMOBLAB-1.

Agência para a Modernização Administrativa – AMA (2025). *WDL 2023 - Mobilidade na cidade de Lisboa com base em dados de telemóveis*. 2025. Disponível em: https://dados.gov.pt/pt/datasets/wdl-2023-mobilidade-na-cidade-de-lisboa-com-base-em-dados-de-telemoveis-1/. Acesso em: 10 jun. 2025.

Andersson, A.; Engelson, L.; Börjesson, M.; Daly, A.; Kristoffersson, I. (2022). Long-distance mode choice model estimation using mobile phone network data. *Journal Of Choice Modelling*, v. 42, p. 100337, mar. 2022. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jocm.2021.100337.

Borowska-Stefanska, M.; Dulebenets, M.A.; Koneczny, P.; Kowalski, M.; Masierek, E.; Turobo´s, F.; Wi´sniewski, S. (2024) Changes to the Transport Behaviour of Inhabitants of a Large City due the Pandemic. *Sustainability* 2024, 16, 2568. DOI: 10.3390/su16062568.

Chung, Y.; Nam, S (2024). Decomposition of travel time expenditure through individual mobility trajectories based on mobile phone signaling data. *Travel Behaviour and Society*, v. 34, p. 100702, jan. 2024. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.tbs.2023.100702.

EU Urban Mobility Observatory (2023). *Smart Ways to Antwerp – Mobility management as a long-term strategy to tackle mobility challenges and improve accessibility*. Disponível em: https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/resources/case-studies/smart-ways-antwerp-mobility-management-long-term-strategy-tackle-mobility-challenges-and-improve_en?prefLang=pt&etrans=pt. Acesso em: 19 maio 2025.

Fu, X.; Zhang, Y; Ortúzar, J. D; Lü, G (2024). Activity-travel pattern inference based on multi-source big data. *Transport Reviews*, v. 45, n. 1, p. 26-48, 16 set. 2024. Informa UK Limited. DOI: 10.1080/01441647.2024.2400341.

Graells-Garrido, E; Opitz, D; Rowe, F.; Arriagada, J (2023). A data fusion approach with mobile phone data for

updating travel survey-based mode split estimates. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 155, p. 104285, out. 2023. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104285.

Guerra, A. L.; Barbosa, H. M.; Oliveira, L. K. (2014). Estimativa de matriz origem/destino utilizando dados do sistema de bilhetagem eletrônica: proposta metodológica. *Transportes*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 26, 8 set. 2014. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. DOI: 10.14295/transportes.v22i3.789.

Li, Z.; Xiong, G.; Wei, Z.; Zhang, Yu; Zheng, M.; Liu, X.; Tarkoma, S.; Huang, M.; Lv, Y.; Wu, C. (2022). Trip Purposes Mining from Mobile Signaling Data. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 23, n. 8, p. 13190-13202, ago. 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/tits.2021.3121551.

Montero, L.; Ortigosa, J.; Alarcón, X.; Linares, M. P.; Cuatrecasas, M.; Cluet, J. (2022). Demand model estimation from smartphone data. An application to assert new urbanistic development scenarios. *Transportation Research Procedia*, v. 62, p. 270-277, 2022. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.02.034.

Pavón, E. B.; Pastor, L. A.; Padilla, A.; Gamboa, M.; Larson, K. (2025). Predicting mobility choice and community connectivity in Latin America. *Case Studies on Transport Policy*, v. 19, p. 101387, mar. 2025. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.cstp.2025.101387.

Shang, J.; Su, H.; Hu, K.; Guo, X.; Sun, D. (2023). Prediction of Traffic Volume of Motor Vehicles Based on Mobile Phone Signaling Technology. *Computers, Materials & Continua*, v. 75, n. 1, p. 799-814, 2023. Tech Science Press. DOI: 10.32604/cmc.2023.035729.

Tsumura, Y.; Asada, Y.; Kanasugi, H.; Arai, A.; Shibasaki, R.; Kawaguchi, H.; Yamada, K. (2022). Examining potentials and practical constraints of mobile phone data for improving transport planning in developing countries. *Asian Transport Studies*, v. 8, p. 100043, 2022. Elsevier BV. DOI: 10.32604/cmc.2023.035729.

Viallard, A.; Bourdeau, J. S.; Morency, C.; Trépanier, M.; Vargas, E.; Benzamane, H. (2024). Trip mode detection from massive smartphone data. *Transportation Research Procedia*, v. 76, p. 37-47, 2024. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.12.036.

Viana, P. L.; Samboni, A. F. I.; Coelho, C. S.; Naves, B. M. (2024). Matriz origem e destino de telefonia móvel: metodologia para simulação de tráfego. In*: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 38., 2024**.** Florianópolis: 2024. p. 1-5. Disponível em: https://proceedings.science/proceedings/100500/_papers/190762/download/fulltext_file1?lang=pt-br. Acesso em: 21 maio 2025.

Zhou, X.; You, L.; Zhong, S.; Cai, M. (2024). From cell tower location to user location: understanding the spatial uncertainty of mobile phone network data in human mobility research. *Computers, Environment And Urban Systems*, v. 111, p. 102130, jul. 2024. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2024.102130.

Gabriel José da Silva (gabrielsilva@cefetmg.br)
Deborah Oliveira Resende (deborah.orezende@gmail.com)
Henrique Costa Braga (henriquebraga@cefetmg.br)
Renato Guimarães Ribeiro(renato.ribeiro@cefetmg.br)
Thiago Magela Rodrigues Dias (thiagomagela@cefetmg.br)
Gray Farias Moita (gray@cefetmg.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, 30510-000, Brasil.

ANÁLISE DE RELAÇÕES ENTRE OCUPAÇÕES MAIS PROPENSAS AO TELETRABALHO E COMPORTAMENTO DE VIAGENS

Felipe Urso Parreira Pinto[1], **Gabriel Mormilho**[1], **Cira Souza Pitombo**[1], **João de Abreu e Silva**[2]
[1]Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo; [2]Instituto Superior Técnico/Universidade de Lisboa

RESUMO
O principal objetivo do trabalho é analisar as relações entre diferentes grupos de ocupações, com enfoque naquelas mais propensas ao teletrabalho, e o comportamento de viagens, caracterizado pela redução de viagens e redução de quilômetros viajados. Os dados foram obtidos por meio do Painel de Mobilidade dos Países Baixos, uma base oficial fornecida pelo Ministério de Infraestrutura e Gerência de Água dos Países Baixos, referentes ao ano de 2022. Foram aplicados, de forma sequencial, Algoritmos *K-medoids* e CART (*Classification And Regression Tree*) para agrupamento de profissões e análise das relações, respectivamente. Considerando os resultados obtidos, observa-se que indivíduos que hoje exercem profissões mais propensas ao teletrabalho, possuem uma maior probabilidade de realizar uma diminuição na frequência de viagens ou uma diminuição nas distâncias deslocadas, quando comparados à amostra total. Assim, ocupações *teletrabalháveis*, bem como o aumento delas nas grandes cidades, podem ser um instrumento potencial de gerenciamento da mobilidade.

1. INTRODUÇÃO

Com as alterações provenientes da pandemia da COVID-19, o teletrabalho ganhou popularização, uma vez que foi implementado como medida de distanciamento social na ocasião para evitar a interrupção de inúmeras atividades econômicas, mantendo-se, hoje, como uma realidade, mesmo que em proporções menores do que no período pandêmico (Mouratidis e Papagiannakis, 2021; de Abreu e Silva, 2022; Pedreira Junior e Pitombo, 2024). Com a manutenção de níveis de trabalho remoto, sobretudo nos centros urbanos, espera-se uma mudança comportamental relativa aos deslocamentos, podendo afetar frequências, distâncias viajadas, tempos de viagens e emissões veiculares (Suzuki Goshima et al., 2023; Dias et al., 2024; Motte-Baumvol et al., 2024; Kappler e de Abreu e Silva, 2025). Assim, com base na conhecida relação entre *status* profissional (aqui definido como setor de trabalho ou atuação no mercado) e comportamento de viagens (Aguiléra et al., 2009; Shin, 2019), mesmo antes da pandemia, associar setores de trabalho à propensão ao trabalho remoto e analisar relações entre diferentes grupos de profissões e comportamentos torna-se crucial no cenário atual.

O principal objetivo do trabalho é analisar relações entre diferentes grupos de ocupações, sobretudo aquelas mais propensas ao teletrabalho, e o comportamento de viagens, caracterizado pela redução de viagens e redução de quilômetros viajados em um período posterior ao *lockdown*.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Dados

A base de dados utilizada foi obtida a partir do Painel de Mobilidade[1], fornecido pelo Ministério de Infraestrutura e Gestão da Água dos Países Baixos (KIM, 2013). Esse painel contém dados históricos no período de 2013 a 2022, organizados em sete tipos de bases: automóveis, diário de viagem, mudanças no dia da viagem, dados residenciais, dados pessoais, dados pessoais especiais e fatores de ponderação (Hoogendoorn-lanser et al., 2015). Com o objetivo de atender ao escopo do trabalho, foram selecionadas e tratadas apenas as variáveis relacionadas ao tema, totalizando quatro variáveis: setor de trabalho (nominal), número de horas trabalhadas em casa (numérica), se realizou menos viagens no último ano (binária) e se percorreu menos quilômetros no último ano (binária). A base de dados final utilizada tinha 5.738 observações, referentes ao ano de 2022.

2.2. Procedimentos e *software*

O primeiro passo do estudo consistiu na obtenção dos dados do Painel de Mobilidade dos Países Baixos e no tratamento da base original, contendo as variáveis de interesse que foram utilizadas. Após a preparação do conjunto de dados, aplicou-se o algoritmo de agrupamentos, a fim de obter profissões homogêneas segundo número de horas trabalhadas em casa (teletrabalhadores mais propensos e menos propensos). Foi utilizado o algoritmo *k-medoids*, compatível com os tipos de variáveis utilizadas (setores de trabalho e número de horas trabalhadas em casa). Esse é um método de partição não hierárquico que emprega pontos representativos do conjunto de dados, os *medóides*, como *centróides* dos grupos. O algoritmo visa minimizar a soma das dissimilaridades entre as observações dentro de cada grupo. O *k-medoids* utiliza a distância de *Gower*, que

[1] https://www.mpndata.nl

permite a incorporação de diferentes tipos de variáveis, tanto numéricas quanto categóricas (Gower, 1971). Para avaliar a qualidade do agrupamento, adotou-se o coeficiente de silhueta (Kaufman e Rousseeuw, 1990; Rousseeuw, 1987; Batool e Hennig, 2021). Na sequência, realizou-se a análise e nomenclatura dos grupos, com base em suas formas e características predominantes.

Com os agrupamentos definidos e caracterizados, o banco de dados foi modificado para incluir uma nova variável representando os grupos identificados. A partir disso, utilizando as variáveis de interesse relacionadas à diminuição da frequência e da distância das viagens (variáveis dependentes binárias), associadas aos agrupamentos obtidos na etapa anterior (variável independente), foi aplicado o algoritmo CART (*Classification and Regression Trees*), para avaliar, de forma exploratória, as relações entre diferentes grupos de profissões e comportamento de viagem. Algoritmos de árvore de decisão possuem uma estrutura ramificada, composta por um nó raiz, nós intermediários e nós folha (Breiman et al., 1984). O algoritmo CART, busca maximizar a homogeneidade interna de cada nó com base nos valores da variável dependente, utilizando o índice de Gini como critério de divisão (Breiman et al., 1984). A definição do tamanho final da árvore seguiu três critérios de parada: número máximo de níveis (5); número mínimo de observações por nó folha (5) e/ou número mínimo de registros para separação do nó pai (10). Para o desenvolvimento e aplicação do procedimento, foram utilizados algoritmos implementados na linguagem de programação R, na biblioteca *cluster* (Maechler M et al., 2025). Além disso, utilizou-se o *software* IBM SPSS 25.0 com o objetivo principal de processar os algoritmos CART.

3. RESULTADOS

As variáveis utilizadas para aplicação do algoritmo *k-medoids* foram: (1) setores de trabalho, que compreendem 22 categorias — das quais 20 correspondem diferentes setores, uma corresponde à entrevista não finalizada e uma corresponde à pessoa desempregada e (2) número de horas trabalhadas em casa durante uma semana recente (variável numérica).

Com base na variável de influência (número de horas trabalhadas em casa), calcularam-se os coeficientes de silhueta para diferentes quantidades de agrupamentos, cujos valores estão apresentados na Figura 1. A partir dos resultados obtidos, observa-se que a estabilização dos valores e a obtenção de coeficientes mais representativos têm início com cinco grupos, com valor alto apresentado para 3 grupos. Dessa forma, são analisadas as configurações com 3, 4, 5 e 6 grupos para avaliar qual delas apresenta melhor coerência e interpretabilidade.

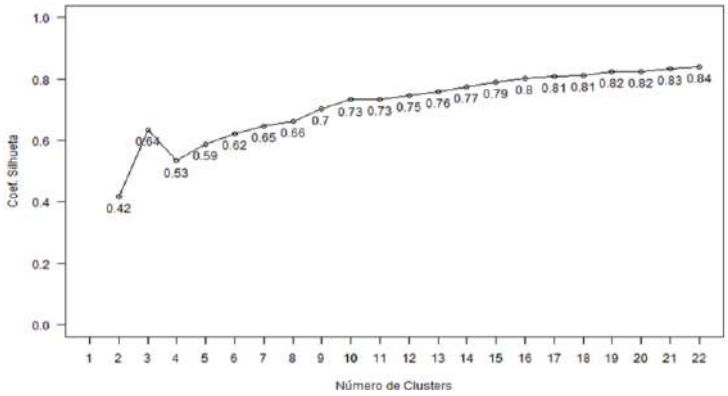


Figura 1: Gráfico do coeficiente de silhueta

Entre os quatro agrupamentos analisados, observou-se que determinadas configurações apresentam uma forma de segmentação mais condizente com o escopo do estudo, por permitirem uma distinção mais precisa entre os diferentes tipos de profissões. Essas configurações evitam agrupamentos genéricos que apenas separam os dados em categorias amplas. Dessa forma, entende-se o agrupamento com 6 *clusters* como o mais adequado, uma vez que este resulta em grupos com características distintas, incluindo: indivíduos com maior número de horas trabalhadas em casa; indivíduos com menor número de horas trabalhadas; além de categorias específicas para pessoas que não responderam ao questionário e para os desempregados. O agrupamento escolhido está representado na Tabela 1, com a porcentagem de designação de cada setor para cada grupo em destaque em cores para as maiores porcentagens, ou seja, o agrupamento definido para aquele (s) setor (s).

Tabela 1: Agrupamento com 6 grupos

Agrupamento	Setor de trabalho	Quantidade de respondentes em cada grupo (%)					
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Educação e Ciência	Educação e Ciência	0%	0%	0%	0%	8%	92%
Alta propensão ao teletrabalho	Administração pública, segurança e justiça	0%	43%	1%	0%	56%	0%
	Serviços financeiros	0%	40%	0%	0%	60%	0%
	Automação e TI	0%	0%	0%	0%	100%	0%
Saúde	Saúde	0%	0%	0%	91%	9%	0%
Não perguntado, pessoa está desempregada	Não perguntado, pessoa está desempregada	0%	5%	94%	0%	0%	0%
Baixa propensão ao teletrabalho	Turismo e recreação	0%	78%	0%	0%	22%	0%
	Técnico	0%	82%	0%	0%	18%	0%
	Armazenamento e transporte	0%	86%	0%	0%	14%	0%
	Pessoal, organização e estratégico	0%	52%	0%	0%	48%	0%
	Esporte e cuidado pessoal	0%	92%	0%	0%	8%	0%
	Imobiliário e corretagem	0%	67%	0%	0%	33%	0%
	Outros	0%	89%	0%	0%	11%	0%
	Natureza e ambiental	0%	82%	3%	0%	15%	0%
	Linguagem, mídia e comunicação	0%	57%	0%	0%	43%	0%
	Industria e produção	0%	83%	0%	0%	17%	0%
	Hospedagem e limpeza	0%	98%	0%	0%	2%	0%
	Cultura	0%	75%	2%	0%	24%	0%
	Construção	0%	88%	1%	0%	11%	0%
	Agricultura, pesca e pecuária	0%	56%	3%	0%	42%	0%
	Varejo	0%	95%	1%	0%	4%	0%
Pessoa não completou o questionário	Pessoa não completou o questionário	99%	0%	1%	0%	0%	0%

Dessa forma, cada grupo é nomeado de acordo com as suas características predominantes, sendo eles: alta propensão ao teletrabalho, saúde, educação e ciência, não perguntado, pessoa está desempregada, baixa propensão ao teletrabalho e pessoa não completou o questionário. Cabe destacar que o grupo classificado como *alta propensão ao teletrabalho* engloba áreas tipicamente associadas ao trabalho remoto, como automação e tecnologia da informação (TI) e serviços financeiros. Este grupo também inclui setores da administração pública, segurança e justiça.

Após o agrupamento dos setores de trabalho, o algoritmo CART é aplicado de duas formas: (1) a primeira com variável dependente “Comecei a fazer menos viagens” e variável independente “Seis grupos de profissões” - Figura 2a; (2) a segunda com variável dependente “Comecei a viajar menos quilômetros” e variável independente “Seis grupos de profissões” – Figura 2b.

Os resultados indicam que pessoas com profissões mais propensas ao teletrabalho tendem a diminuir, com maior incidência, a frequência de viagens quando comparadas àquelas que trabalham menos horas remotamente. Considerando-se os resultados da primeira árvore de decisão (Figura 2a), associada à variável dependente “Comecei a fazer menos viagens”, ressalta-se que no nó raiz, formado com a amostra completa (Nó 0), 82,6% dos respondentes não realizaram menos viagens, enquanto **17,4%** responderam que realizaram menos viagens. A proporção de pessoas que responderam ter realizado menos viagens aumenta ou diminui, em relação ao nó raiz, a depender do agrupamento do setor de trabalho. A árvore 1 teve 4 nós terminais: (1) Pessoas desempregadas ou não respondentes (Nó 3): **24,9%** responderam que realizaram menos viagens; (2) Pessoas com profissões com alta propensão ao teletrabalho (Nó 4): **21,5%** responderam que realizaram menos viagens; (3) Pessoas com profissões com baixa propensão ao teletrabalho ou educação/ciência (Nó 5): **15,4%** responderam que realizaram menos viagens; (4) Pessoas com profissões na área de saúde (Nó 6): **11,8%** responderam que realizaram menos viagens. Observa-se, então, que as profissões com maior potencial de teletrabalho diminuem, em maior proporção, a frequência de viagens, só ficando atrás do grupo de pessoas desempregadas. Por outro lado, profissionais da área de saúde são os menos propensos a reduzir frequência de viagens. Já verificando-se os nós terminais da Figura 2b, observa-se frequências diferentes de respostas para a redução de quilometragem viajada: (Nó 1) Indivíduos desempregados, com alta propensão ao teletrabalho ou da área de Educação e ciência: **23,6%** responderem que reduziram a quilometragem viajada; (Nó 2)

Indivíduos da área de saúde ou com profissões com baixo potencial de teletrabalho: **17,6%** responderem que reduziram a quilometragem viajada. Como parâmetro comparativo, na amostra completa (Nó 0), observa-se que **20,2%** da amostra não reduziu a quilometragem viajada.

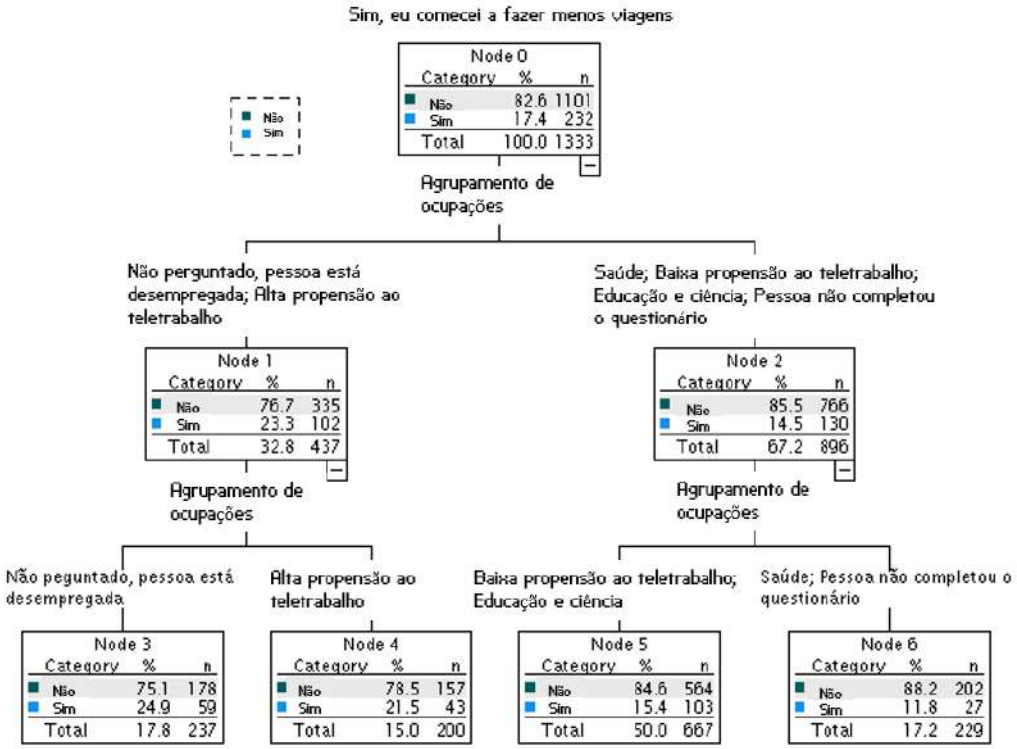


Figura 2: (a) Árvore de decisão para redução de frequência de viagens

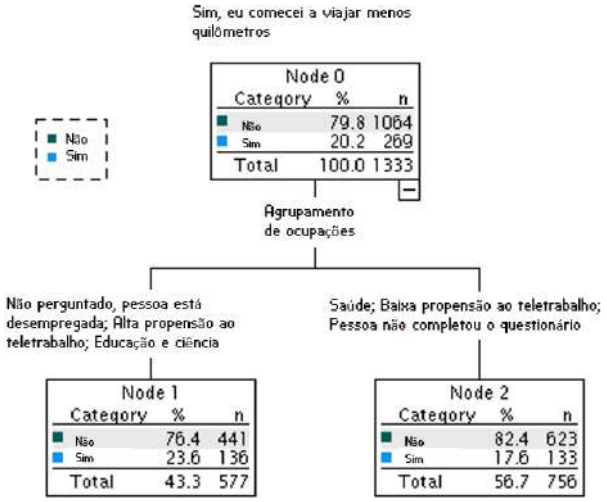


Figura 2: (b) Árvore de decisão para redução de quilômetros viajados

4. CONCLUSÃO

O estudo realizado apresenta um método de duas etapas, baseado na aplicação sequencial dos algoritmos *k medoids e CART (Classification And Regression Tree)*, com o objetivo de identificar quais setores de trabalho são mais propensos à realização de atividades remotas, classificando-os como "*teletrabalháveis",* e de analisar como esses setores se comportam em relação às distâncias de deslocamento e às frequências de viagens. Os grupos definidos são: alta propensão ao teletrabalho, baixa propensão ao teletrabalho, saúde, educação e ciências, desempregados, e aqueles que não completaram o questionário. Já por meio dos achados do algoritmo CART, observa-se que pessoas associadas a setores com maior *teletrabalhabilidade* são aquelas que tendem a realizar menos viagens, apenas ficando atrás dos desempregados. Em relação à distância, os trabalhadores com

maior propensão ao teletrabalho, juntamente com aqueles que trabalham com Educação e Ciência, apresentaram maior chance de reduzir as distâncias viajadas. Dessa forma, verifica-se a o efeito de ocupações com maior potencial de teletrabalho, uma vez que podem influenciar a redução de viagens "comecei a fazer menos viagens" ou a redução de distâncias "comecei a viajar menos quilômetros".

Assim, ocupações *teletrabalháveis*, bem como o aumento delas nas grandes cidades, podem ser um instrumento importante de gerenciamento da demanda por transportes. Para trabalhos futuros, recomenda-se incluir dados de anos posteriores ao período crítico da COVID-19, bem como dados de 2023, assim que estiverem disponíveis, para explorar longitudinalmente, as relações aqui encontradas de forma seccional.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES)– Processo nº 88887.957659/2024-00 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Projeto nº 441615/2023-6 e 305973/2023-1. Essa publicação faz uso de dados do painel de mobilidade dos Países Baixos, o qual é administrado pelo KiM instituto para análise de política de transporte dos Países Baixos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiléra, A.; M.-H. Massot e L. Proulhac (2009) Exploring the Relationship between Work and Travel Behavior on Weekdays: Analysis of Paris Region Travel Survey over 20 Years. *Transportation Research Record*, v. 2135, n. 1, p. 69–77. DOI: 10.3141/2135-09

Batool, F. e C. Hennig (2021) Clustering with the average silhouette width. *Computational Statistics & Data Analysis*, v. 158, p. 107190. DOI: 10.1016/j.csda.2021.107190

Breiman, L.; J. H. Friedman; R. A. Olshen e C. J. Stone (1984) *Classification and Regression Trees*. Belmont, CA: Wadsworth International Group.

De Abreu e Silva, J. (2022) Residential preferences, telework perceptions and the intention to telework: Insights from the Lisbon Metropolitan Area during the Covid-19 pandemic. *Regional Science Policy & Practice*. v. 14, n. S1, p. 142–162. DOI: 10.1111/rsp3.12558

Dias, V. C.; C. Y. S. Goshima e C. S. Pitombo (2024) Relações entre distâncias urbanas percorridas e teletrabalho. In Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Florianópolis), v. 3, p. 310282.

Gower, J. C. (1971) A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties. *Biometrics*, v. 27, n. 4, p. 857–871. DOI: 10.2307/2528823.

Hoogendoorn-Lanser, S.; N. T. W. Schaap e M.-J. Oldekalter (2015) The Netherlands Mobility Panel: An Innovative Design Approach for Web-based Longitudinal Travel Data Collection. *Transportation Research Procedia*, v. 11, p. 311–329.

Kappler, L. B. e J. De Abreu e Silva (2025) Telework frequency and travel behaviour during the later stages of the COVID-19 pandemic. A study across different Metropolitan Areas: Lisbon, Istanbul, and Porto Alegre. *Journal of Transport Geography*, v. 123, p. 104102. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.104102

Kaufman, L. e P. J. Rousseeuw (1990) *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. New York: John Wiley & Sons.

KiM (2013) Mobiliteitsbalans 2013. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Maechler, M.; P. Rousseeuw; A. Struyf; M. Hubert e K. Hornik (2025) *cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions*. R package version 2.1.8.1. DOI: 10.32614/CRAN.package.cluster

Mouratidis, K. e A. Papagiannakis (2021) COVID-19, internet, and mobility: The rise of telework, telehealth, e-learning, and e-shopping. *Sustainable Cities and Society*, v. 74, p. 103182. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103182

Motte-Baumvol, B., Schwanen, T., & Bonin, O. (2024). Telework and the day-to-day variability of travel behaviour: The specificities of Fridays. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*. https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104245

Pedreira Jr., J. U. e C. S. Pitombo (2024) Unveiling substitution patterns of work trips by teleworking and their associations with physical and virtual accessibility in the Brazilian COVID-19 crisis. *Travel Behaviour and Society*, v. 34, p. 100657. DOI: 10.1016/j.tbs.2023.100657

Rousseeuw, P. J. (1987) Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20, p. 53–65.

Shin, E. J. (2019) Self-employment and travel behavior: A case study of workers in central Puget Sound. *Transport Policy*, v. 73, p. 101–112. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.11.002

Suzuki Goshima, C. S. Y.; V. C. Dias; J. U. Pedreira Jr. e C. S. Pitombo (2023) Relationships between teleworking and travel behavior in the Brazilian COVID-19 crisis. *Future Transportation*, v. 3, p. 739–767. DOI: 10.3390/futuretransp3020043

Felipe Urso Parreira Pinto (parreiraursofelipe@usp.br); Gabriel Mormilho (gmormilho@usp.br); Cira Souza Pitombo (cirapitombo@usp.br); João de Abreu e Silva (jabreu@tecnico.ulisboa.pt). Universidade de São Paulo, São Carlos, EESC/STT, Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos - SP, Brasil.

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRENDIZADO SUPERVISIONADO DE MÁQUINA NA PREVISÃO DO USO DO TRANSPORTE PÚBLICO DE FORTALEZA

Kaio Gefferson de Almeida Mesquita[1], Francisco Altanizio Batista de Castro Junior [1], Francisco Moraes de oliveira Neto[1], Maurycio Kemesson Nascimento Brito[1]
[1]Universidade Federal do Ceará

RESUMO
O estudo investigou a modelagem da frequência de uso do transporte coletivo em Fortaleza por meio de algoritmos de aprendizado supervisionado, com base em dados integrados de bilhetagem eletrônica (SBE), informações de programação de linhas (GTFS), dados de localização dos veículos (GPS) e cadastro de usuários. Após etapas de pré-processamento, categorização e seleção de atributos associados a aspectos espaciais, temporais, operacionais e sociodemográficos, foram implementados modelos como *ElasticNet* e *XGBoost*. A avaliação seguiu a estratégia de validação cruzada aninhada, garantindo robustez nos resultados. O modelo *ElasticNet* destacou-se pelo equilíbrio entre desempenho e interpretabilidade. A análise dos coeficientes revelou influência do horário das validações e do tipo de cartão. A distribuição dos resíduos indicou ajuste adequado do modelo. Os resultados reforçam o potencial dos dados massivos no apoio ao planejamento de transportes, permitindo inferências relevantes sobre o comportamento dos usuários e a eficiência da rede. Este trabalho contribui para o avanço da aplicação de inteligência artificial no setor público urbano.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Padrões de deslocamento, como os fluxos origem-destino (OD), são tradicionalmente obtidos por meio de pesquisas domiciliares de mobilidade. Apesar de sua relevância, essas pesquisas exigem altos custos e longos períodos de execução, o que limita sua frequência e abrangência. Com o avanço tecnológico, os Sistemas de Bilhetagem Eletrônica (SBE) passaram a ser utilizados em diversas cidades ao redor do mundo, como Washington D.C. e Tóquio, permitindo a coleta contínua e automatizada de registros de validação de passagens (Zhao; Rahbee; Wilson, 2007; Pelletier; Trépanier; Morency, 2011). Tais registros têm sido amplamente explorados como fontes alternativas de dados para compreender os deslocamentos da população usuária do transporte público.

Entretanto, o SBE não foi projetado com a finalidade de capturar todos os atributos de uma viagem. Em muitas cidades, incluindo as brasileiras, a validação do cartão eletrônico ocorre exclusivamente na entrada dos veículos, sem registro do desembarque. Além disso, em sistemas com catracas posicionadas após a porta de entrada ou com validadores distribuídos, a validação pode não ocorrer imediatamente após o embarque (Zhao; Rahbee; Wilson, 2007; Arbex e Cunha, 2020). No caso de Fortaleza, cidade analisada neste estudo, o SBE é do tipo aberto, permitindo a validação em qualquer ponto do percurso. Esse modelo, associado a características como a integração tarifária em um intervalo de duas horas e a estrutura tronco-alimentada da rede, pode induzir comportamentos específicos, como validações realizadas próximas ao destino ou aos terminais de integração. A frequência de uso do sistema por parte dos passageiros, refletida nos registros de validação, é um atributo com potencial valor analítico. Padrões de validação podem revelar a regularidade dos deslocamentos, sugerindo perfis de uso (habitual vs. esporádico), e até servir como indicativo indireto de fenômenos não observáveis, como a superlotação. No contexto dos estudos baseados em *Big Data*, a identificação e modelagem dessas frequências podem ampliar à compreensão sobre a dinâmica do sistema de transporte público, especialmente em relação à confiabilidade, comportamento do usuário e dimensionamento da oferta (Habib; Weiss, 2014).

Apesar de avanços em mineração de dados para extrair padrões temporais e espaciais do uso do transporte público, ainda são escassos os estudos que exploram a frequência de validação como variável-alvo, especialmente associando-a a variáveis contextuais como distância de validação, características dos usuários, tipos de linhas utilizadas e fatores temporais (Cui; Long, 2019). O referido artigo busca preencher essa lacuna ao aplicar técnicas de aprendizado de máquina sobre a base de dados do Sistema Integrado de Transporte de Fortaleza (SIT-FOR), com o objetivo de modelar a frequência de validação e investigar os fatores que a influenciam.

2. PADRÕES DE DESLOCAMENTO A PARTIR DO BIG DATA DO TRANSPORTE PÚBLICO

Tradicionalmente, a identificação de atributos das viagens em dados de Sistemas de Bilhetagem Eletrônica (SBE) tem como base o método de encadeamento de viagens (Arbex, Cunha, 2020). Nesse método, assume-

se que a primeira validação do dia representa a origem, e a última, o destino da primeira viagem. Embora útil para estimar fluxos OD, esse método depende fortemente da premissa de que os registros refletem a sequência real das viagens, o que nem sempre se verifica em sistemas com validação livre ao longo do trajeto.

Como alternativa, diversos estudos vêm utilizando técnicas de aprendizado supervisionado de máquina para inferir atributos das viagens, especialmente em contextos onde os registros de origem ou destino são incertos ou ausentes (Jung; Sohn, 2017; Assemi *et al.,* 2019;). Ainda que tais abordagens tenham sido inicialmente aplicadas para identificar destinos ou locais de embarque, seu potencial também se estende à predição de atributos comportamentais dos usuários, como a frequência de uso do sistema.

A frequência de validação reflete padrões regulares de uso do transporte público, frequentemente associados a deslocamentos pendulares e atividades compulsórias, como trabalho ou estudo (Habib; Weiss, 2014). Estudos como os de Morency, Trépanier e Agard (2007), Ma *et al*. (2013) e Cui e Long (2019) demonstram que usuários frequentes tendem a manter padrões espaço-temporais estáveis, o que permite a aplicação de modelos preditivos baseados em dados históricos de uso, linhas utilizadas, horários e até mesmo características operacionais como distância percorrida.

A modelagem da frequência de uso, portanto, contribui não apenas para a segmentação dos usuários entre perfis regulares e esporádicos (Cats; Ferranti, 2022; Zhao; Cui; Levinson, 2023), mas também pode servir como proxy para fenômenos não observáveis, como sobrecarga veicular ou confiabilidade do sistema, uma vez que passageiros podem evitar validar em condições de alta lotação.

Com relação às técnicas utilizadas, os principais métodos supervisionados aplicados na literatura incluem (i) Árvores de Decisão, que operam com partições hierárquicas dos dados; e (ii) Redes Neurais Artificiais, capazes de capturar relações não-lineares complexas entre variáveis (Géron, 2019). Essas técnicas têm mostrado bons resultados na predição de atributos ausentes em bases de transporte público. Portanto, a aplicação de aprendizado de máquina para inferência da frequência de validação amplia a capacidade de compreensão do uso do transporte público a partir dos dados do SBE, permitindo o desenvolvimento de modelos explicativos e preditivos mais alinhados com a realidade comportamental dos usuários.

3. MÉTODO DO TRABALHO

A metodologia adotada neste estudo foi realizada seguindo uma abordagem sistemática composta pelas etapas seguintes: (i) Coleta e tratamento dos dados; (ii) Seleção dos atributos e pré-processamento dos dados; (iii) Definição dos algoritmos de aprendizado supervisionado de máquina; (iv) Otimização de hiperparâmetros e (v) avaliação dos resultados por meio de validação cruzada aninhada (Hastie; Tibshiranu; Friedman, 2017; Géron, 2019).

A primeira etapa iniciou-se com a coleta e integração de diferentes fontes de dados do transporte coletivo da cidade de Fortaleza. Foram utilizados registros de bilhetagem eletrônica (SBE), informações de programação de linhas em formato GTFS, dados de localização dos veículos (GPS) e o cadastro dos usuários do sistema, datados de 2018. A integração dessas bases foi essencial para a construção de um conjunto de dados robusto, capaz de representar de maneira abrangente as dinâmicas espaciais e temporais do transporte público da cidade. Com a base unificada, procedeu-se ao pré-processamento dos dados, etapa que envolveu a limpeza e filtragem de registros inconsistentes, bem como o georreferenciamento dos endereços dos usuários e pontos de parada. Todas as variáveis foram normalizadas, garantindo que tivessem pesos equilibrados durante o processo de modelagem e não influenciassem indevidamente o ajuste dos algoritmos.

Em seguida, foi realizada a definição dos modelos preditivos, com a implementação de diferentes algoritmos de aprendizado supervisionado, incluindo regressões lineares, modelos baseados em instâncias e modelos de árvore de decisão. O objetivo foi testar e comparar a capacidade preditiva de cada abordagem em relação à variável-alvo, a frequência de uso do transporte coletivo por usuário, tendo a base final 1922 registros. Para melhorar o desempenho dos modelos, foi realizada a configuração de hiperparâmetros por meio de uma estratégia de busca em grade (*grid search*), cuidadosamente ajustada para cada algoritmo, buscando maximizar o desempenho e evitar problemas como *overfitting,* ou seja, o sobreajuste dos dados. A avaliação dos modelos foi feita utilizando validação cruzada aninhada, o que garantiu tanto a escolha adequada dos hiperparâmetros

quanto uma estimativa robusta do desempenho preditivo, utilizando dois loops de particionamento. Após a validação, o modelo *Elastic Net* destacou-se como o mais eficaz. Seus coeficientes foram analisados para identificar os fatores com maior influência sobre a frequência de uso do transporte coletivo, e os resíduos foram avaliados para verificar a qualidade dos ajustes. Essa análise final permitiu interpretar de forma consistente o comportamento dos usuários frente ao sistema de transporte público.

4. CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS

Antes da modelagem, foi realizado uma análise exploratória com o conjunto de treino por meio de gráficos e tabelas. De modo geral, observou-se que a maioria das variáveis apresenta distribuições assimétricas, com exceção das variáveis relacionadas às zonas, que tendem a seguir uma distribuição mais simétrica, semelhante à curva normal. Os tópicos a seguir evidenciam os principais resultados exploratórios e de modelagem.

4.1. Análise Exploratória

A variável de interesse, frequência média diária, apresentou uma cauda longa à direita, o que sugere que a aplicação de uma transformação logarítmica pode ser uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho dos modelos (Lawrence, 2017; Murphy, 2021). Como os dados não seguem em geral uma distribuição normal, optou-se pelo uso da correlação de *Spearman* para avaliar a associação entre as variáveis numéricas. De modo geral, foram identificadas poucas correlações fortes, o que indica baixa colinearidade entre os atributos numéricos considerados. A principal exceção refere-se às variáveis agregadas ao nível de zona, que apresentaram correlações mais elevadas entre si. Um exemplo é a correlação entre renda média e média de automóveis por domicílio, que alcançou um valor de 0,82, sugerindo uma relação significativa entre essas variáveis socioeconômicas.

4.2. Pré-processamento e Fluxo das etapas

As variáveis numéricas foram inicialmente padronizadas (ou seja, transformadas para média zero e desvio padrão igual a um). Em seguida, foram geradas suas expansões polinomiais, que também passaram por uma nova padronização. Essa segunda padronização é necessária porque os termos polinomiais podem variar em escala, o que pode prejudicar o desempenho de alguns modelos. As variáveis categóricas foram transformadas utilizando o *OneHotEncoder*, que cria variáveis *dummies* correspondentes a cada categoria. Para a variável dependente (frequência média diária), foi aplicada uma transformação logarítmica a fim de reduzir a assimetria da distribuição, seguida de padronização. Essa última etapa, além de ser exigida por alguns modelos, facilita a comparação entre variáveis na análise dos coeficientes dos modelos lineares.

Alguns detalhes adicionais do *pipeline* (fluxo das etapas) incluem o uso de polinômios de grau 1 e 2 para os modelos lineares (como regressão linear e regressão *ridge*/lasso). Para modelos não lineares foi utilizado apenas o grau 1, já que esses algoritmos já são capazes de capturar relações não lineares de forma nativa. Por fim, no caso do modelo de regressão linear sem regularização, o *OneHotEncoder* foi configurado para remover a primeira categoria de cada variável categórica, com o objetivo de evitar colinearidade perfeita entre as variáveis. Para os modelos com regularização (*ridge* e lasso), essa remoção não foi aplicada, pois a própria regularização já atua no controle da colinearidade.

4.3. Experimento e resultados

A abordagem adotada para a avaliação dos modelos foi a validação cruzada aninhada, com um loop externo de 10 subdivisões e um loop interno de 5. No loop externo, foram calculadas as métricas de desempenho para avaliação dos modelos finais: erro quadrático médio (MSE), erro absoluto médio (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2). Já no loop interno, o critério utilizado para seleção dos hiperparâmetros foi o menor valor de MSE. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1. De acordo com o MSE, o modelo que apresentou o melhor desempenho foi o *Elastic Net*.

Adicionalmente, foi aplicado o *AutoRank* para selecionar a abordagem estatística mais apropriada na comparação entre modelos. A análise foi conduzida com sete populações e dez amostras pareadas. Os testes de normalidade (mínimo p-valor = 0,170) e homocedasticidade (teste de Bartlett, p = 0,401) não rejeitaram as hipóteses nulas, permitindo assumir normalidade e homogeneidade de variância entre as populações. Diante dessas condições, utilizou-se o teste ANOVA para medidas repetidas como teste *omnibus*, seguido do teste *post-hoc Tukey* HSD. A ANOVA indicou diferenças estatisticamente significativas entre os modelos (p <

0,001). Os modelos *Elastic Net* (M=0,333 ± 0,058; SD=0,072), *XGBRegressor*, *Ridge*, Lasso, Regressão Linear e SVR não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si, mas todos superaram o KNN, que teve desempenho inferior. Dado seu bom desempenho e simplicidade o modelo *Elastic Net* foi selecionado como modelo final para produção.

Tabela 1: Resumo das métricas de avaliação por modelo

Modelo	MSE Média	RMSE Média	MAE Média	R2 Média	MSE Desv.P.	RMSE Desv.P.	MAE Desv.P.	R2 Desv.P.
Elastic Net	0,333	0,574	0,400	0,619	0,072	0,063	0,030	0,048
XGBoost Regressor	0,334	0,574	0,401	0,619	0,075	0,065	0,032	0,047
Lasso Regression	0,334	0,575	0,399	0,618	0,071	0,063	0,030	0,046
Ridge Regression	0,337	0,578	0,400	0,614	0,075	0,065	0,030	0,052
Linear Regression	0,349	0,588	0,415	0,598	0,074	0,063	0,031	0,060
Support Vector Regressor (SVR)	0,381	0,614	0,428	0,564	0,085	0,067	0,037	0,052
KNN	0,567	0,749	0,524	0,352	0,132	0,086	0,052	0,081

4.4. Modelo de produção e análise dos coeficientes, resíduos e erros

Dado que o modelo *Elastic Net* apresentou o melhor desempenho durante a validação cruzada aninhada, realizou-se uma nova etapa de ajuste fino dos hiperparâmetros por meio de *grid search* com validação cruzada de 5 *folds*, utilizando todo o conjunto de treino (90%). Os valores ótimos encontrados foram: alpha = 0,01, l1_ratio = 0,3 e ordem do polinômio = 1. Vale destacar que esses mesmos valores já haviam sido selecionados no loop externo da validação aninhada, reforçando sua consistência.

A análise dos coeficientes do modelo indica que as variáveis mais influentes na predição da frequência média diária de validação são hora de início, hora de fim e tipo de cartão utilizado. Como todas as variáveis foram padronizadas, é possível comparar diretamente a magnitude dos coeficientes para inferir sua importância relativa. As interpretações a seguir devem ser compreendidas como associações e não implicam relações causais. A análise dos coeficientes sugere, por exemplo, que: (i) Viagens realizadas predominantemente na madrugada estão associadas a uma menor frequência de validação. Levanta-se a hipótese de que pessoas que se deslocam nesse horário tendem a utilizar apenas um trecho da viagem com transporte coletivo; (ii) Usuários que realizam validações pela manhã (primeira viagem) e à noite (última viagem) tendem a apresentar maior frequência de uso. Supõe-se que esses usuários sejam majoritariamente trabalhadores ou estudantes, os quais realizam deslocamentos regulares nos horários de pico; (iii) O grupo de estudantes apresenta associação negativa com a frequência de validações, enquanto adultos mostram associação positiva. Levanta-se a hipótese de que estudantes, em geral, frequentam instituições próximas de suas residências, realizando trajetos mais diretos; e (iv) A faixa etária adulta está associada positivamente ao uso do transporte coletivo, enquanto adolescentes mostram associação negativa. Presume-se que adultos utilizem o transporte coletivo com maior regularidade e por necessidade laboral, ficando mais expostos a trajetos com maior número de integrações.

A análise dos resíduos no conjunto de treino e dos erros no conjunto de teste revelou distribuições aproximadas à normalidade, evidenciadas pelas curvas de densidade, conforme apresentado na Figura 1. Além disso, a dispersão mostrou que os resíduos e erros apresentam variância aproximadamente constante e aleatória ao longo dos valores preditos, indicando ausência de padrão sistemático ou heterocedasticidade. Esses resultados sugerem que o modelo está bem ajustado, sem viés evidente, e que as suposições de normalidade e homocedasticidade dos resíduos são razoavelmente atendidas.

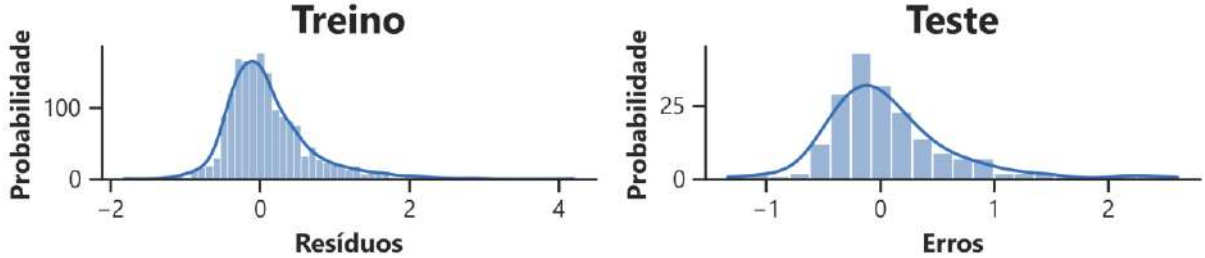


Figura 1: Análise dos resíduos e erros para o conjunto de treino e teste.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo explorou o uso de algoritmos de aprendizado supervisionado para prever a frequência média diária de validações no transporte coletivo de Fortaleza, a partir de dados do Sistema de Bilhetagem Eletrônica (SBE). Diferentemente de abordagens tradicionais centradas na inferência de origem-destino, a proposta focou na modelagem da frequência de uso, uma variável com forte potencial para aplicações em planejamento operacional e gestão da demanda. Entre os modelos testados, o *Elastic Net* apresentou o melhor desempenho, conciliando acurácia e fácil interpretabilidade. A metodologia aplicada com pipelines estruturados, validação cruzada aninhada e análise estatística garantiu robustez aos resultados,

Os achados sugerem que características como faixa etária, tipo de cartão e horários de deslocamento estão fortemente associadas à frequência de uso, refletindo comportamentos típicos de grupos como trabalhadores e estudantes. A pesquisa demonstra que, quando devidamente tratados, os dados do SBE são uma fonte valiosa para orientar decisões baseadas em evidências no transporte público. Para trabalhos futuros, recomenda-se expandir a base de dados e atualizá-la para um período pós pandemia, replicar os modelos em outras cidades e investigar de forma causal as associações identificadas, reforçando a aplicabilidade dos resultados no contexto de políticas públicas inteligentes e responsivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arbex, R. O. e C. B. Cunha (2020) Estimating the influence of crowding and travel time variability on accessibility to jobs in a large public transport network using smart card big data. Journal of Transport Geography, v. 85. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102671.

Assemi, B.; A. Alsger; M. Moghaddam; M. Hickman e M. Mesbah (2019) Improving alighting stop inference accuracy in the trip chaining method using neural networks. Public Transport, v. 12, p. 89–121. DOI: 10.1007/s12469-019-00218-9.

Cats, O. e F. Ferranti (2022) Unravelling individual mobility temporal patterns using longitudinal smart card data. Research in Transportation Business & Management, v. 43. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100816.

Cui, Z. Y. e Y. Long (2019) Perspective on stability and mobility of passenger's travel behavior through smart card data. IET Intelligent Transport Systems, v. 13, n. 12, p. 1761-1769. DOI: 0.1049/iet-its.2019.0212.

Géron, A. (2019) Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and Tensorflow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. O'Reilly Media. v 1. 856 p.

Habib, K. N. e A. Weiss (2014) Evolution of latent modal captivity and mode choice patterns for commuting trips: A longitudinal analysis using repeated cross-sectional datasets. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 66, p. 39–51. DOI: 10.1016/j.tra.2014.04.013.

Hastie, T.; R. Tibshiranu e J. Friedman (2017) The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. 2nd Edition, New York: Springer.

Jung, J. e K. Sohn (2017) Deep-learning architecture to forecast destinations of bus passengers from entry-only smart-card data. IET Intelligent Transport Systems, v. 11, n. 6, p. 334–339. DOI: 10.1049/iet-its.2016.0276.

Lawrence, N. D. (2017) Living Together: Mind and Machine Intelligence. (2019) Data Science and Digital Systems: The 3Ds of Machine Learning.

Ma, X.; Y. J. Wu; Y. Wang; F. Chein e J. Liu (2013) Mining smart card data for transit riders' travel patterns. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 36, p. 1-12. DOI: 10.1016/j.trc.2013.07.010.

Morency, C.; M. Trépanier e B. Agard (2007) Measuring transit performance using smart card data. In 11th World Conference on Transport Research, San Francisco, USA.

Murphy, K. P. (2021) Probabilistic Machine Learning: An Introduction. MIT Press, Capítulos 1, 2, 4, 9, 10, 11, 16, 18.

Pelletier, M.-P.; M. Trépanier e C. Morency (2011) Smart Card Data Use in Public Transit: A Literature Review. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 19, n. 4, p. 557–568. DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.003.

Zhao, J.; A. Rahbee e N. H. Wilson (2007) Estimating a rail passenger trip origin-destination matrix using automatic data collection systems. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 22, n. 5, p. 376–387. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2007.00494.x.

Zhao, X.; M. Cui e D. Levinson (2023) Exploring temporal variability in travel patterns on public transit using big smart card data. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 50, n. 1, p. 198–217. DOI: 10.1177/23998083221089662.

Kaio Gefferson de A. Mesquita (kaio@det.ufc.br)
Francisco Altanizio Batista de C. Junior (altanizio@alu.ufc.br)
Francisco Moraes de O. Neto (moraes@det.ufc.br)
Maurycio Kemesson N. Brito (mauryciokemesson@alu.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará R. cinco, Fortaleza, CE, Brasil.

CONSTRUÇÃO DE ARQUIVO GTFS COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA PARA O PLANEJAMENTO DA MOBILIDADE URBANA

Matheus de Souza e Silva[1], Anderson Marden de Sousa Silva[1], Joyce Azevedo Caetano, Cíntia Machado de Oliveira[2],André Leite Guerra[3]

[1] Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), [2] Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/RJ), [3]Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/MG)

RESUMO

As cidades podem desenvolver e implementar sistemas de análise inteligente para monitorar o desempenho do transporte público integrando, analisando e modelando dados do mundo real. O planejamento da mobilidade urbana demanda ferramentas precisas que permitam analisar, de forma integrada, os diferentes modos de transporte disponíveis em uma região. Este artigo apresenta a construção de um arquivo no formato GTFS (*General Transit Feed Specification*) como instrumento de suporte técnico para estudos de transporte. A partir da coleta, organização e integração de dados espaciais e operacionais dos serviços de transporte público que atendem aos municípios de Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, foi desenvolvida uma base de dados estruturada e validada. O resultado é um arquivo compatível com simulações computacionais que oferece subsídios para um sistema de transporte mais eficiente e integrado.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento eficaz da mobilidade em grandes metrópoles necessita de ferramentas que possam extrair a complexa dinâmica dos transportes em dados estruturados e analisáveis. Neste contexto, o padrão GTFS se destaca como um formato de dados aberto, criado com o objetivo de padronizar a divulgação de informações sobre o transporte público, como horários, traçado de rotas, localização de pontos de parada e frequências. A importância do GTFS está em sua capacidade de permitir que esses dados sejam facilmente consumidos por aplicativos de planejamento de viagens e, de forma mais estratégica, por softwares de análise e simulação. Além de permitir análises espaciais e operacionais, o formato GTFS tem sido utilizado em estudos de simulação baseados em atividades e de alocação dinâmica de viagens, integrando oferta (GTFS) e demanda (dados de cartão inteligente), como demonstrado por Gaudette *et al.* (2016). Já para os planejadores e pesquisadores, um arquivo GTFS funcional é um recurso de extrema importância, pois viabiliza a análise de forma precisa de cobertura, simulações de cenários e estudos de acessibilidade que seriam impraticáveis com o uso de dados brutos e de padronizados (MobilityData, 2025).

O uso do padrão GTFS tem se consolidado como uma prática global na análise da mobilidade urbana, permitindo não apenas a modelagem da rede de transportes, mas também a identificação de falhas operacionais em horários críticos, como demonstrado por Goliszek e Połom (2022) em sua análise da cidade de Szczecin, na Polônia.

A Linha 3 do Metrô do Rio de Janeiro configura-se como um projeto estruturante para a Região Metropolitana, com potencial de reduzir desigualdades no acesso à mobilidade e promover maior justiça espacial. O traçado previsto atende diretamente aos municípios de Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, cuja população apresenta alta demanda por conexão com a capital. Assim, seu planejamento requer uma compreensão detalhada da malha de transporte existente, de modo a identificar necessidades que possam orientar o planejamento integrado do sistema metropolitano.

Diante disso, o objetivo deste artigo é apresentar, como um estudo de caso, a construção de um arquivo GTFS abrangente para os municípios de Niterói, São Gonçalo, Itaboraí e Rio de Janeiro. O trabalho detalha o processo de coleta, tratamento e validação dos dados dos diferentes modos de transportes que atendem à região, demonstrando o valor do feed GTFS como uma ferramenta de suporte técnico e empírico para o planejamento de uma infraestrutura metroviária mais integrada e eficiente.

2. METODOLOGIA

A metodologia para a construção do arquivo GTFS foi estruturada em quatro etapas: (1) aquisição e estruturação dos dados de transporte; (2) pré-processamento e geração de arquivos do *feed* GTFS; (3) validação da integridade e conformidade do feed; e (4) consolidação final do arquivo. Todo o processo foi automatizado por meio de um *pipeline* de *scripts* desenvolvido em linguagem *Python*, escolhida por sua flexibilidade e pelo seu robusto ecossistema de bibliotecas de código aberto, com uso intensivo da biblioteca *Pandas* para a manipulação de dados, uma abordagem consolidada para análise de dados em transportes (McKinney, 2017),

utilizada para converter os dados brutos em *DataFrames* estruturados, realizar limpezas, tratar valores e transformar dados para o formato exigido. O detalhamento de cada etapa é descrito a seguir.

2.1. Aquisição e Estruturação dos Dados

A base de dados operacionais foi construída a partir de dados brutos de transporte coletivo disponibilizados pela comunidade de usuários na plataforma Moovit. Por meio de um script de web scraping, foram extraídos os dados disponíveis referentes às linhas de transporte público que atendem aos municípios de Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, bem como suas conexões com a cidade do Rio de Janeiro. Ressalta-se que esses dados não abrangem todas as linhas em operação, mas sim aquelas efetivamente cadastradas e atualizadas pelos usuários da plataforma (81% das linhas municipais de Niterói; 73% das linhas municipais de São Gonçalo; e 48% das linhas municipais de Itaboraí). A estratégia de construção de um *feed* GTFS com base em dados públicos se aproxima de abordagens aplicadas internacionalmente, como no estudo de Gaudette *et al.* (2016), que utilizaram dados GTFS e registros e registros de cartões inteligentes para modelar, em alto nível de detalhe, a rede de Laval, Canadá.

Os dados extraídos foram organizados e estruturados em três *DataFrames* primários, que serviram como base para a geração do *feed* GTFS:

- *df_viagens:* reúne informações sobre as linhas, como nome da operadora (agência), nomes curto e longo da rota e a geometria do itinerário;
- *df_pontos:* registra a localização geoespacial (latitude e longitude) e a descrição de cada parada de ônibus ou estação; e
- *df_horarios:* detalha as grades horárias, a sequência de paradas por viagem e os dias de operação (serviços).

A abordagem utilizada possui algumas limitações, embora os dados da comunidade sejam abrangentes, eles podem conter certas imprecisões em comparação com dados oficiais fornecidos diretamente pelas agências de transporte, um desafio inerente a dados de origem colaborativa (Barrington-Leigh & Millard-Ball, 2017). Entretanto, na ausência de um *feed* oficial e unificado para região, esta foi a abordagem mais viável.

2.2. Pré-processamento e Geração do feed GTFS

Nesta etapa, foi realizada a limpeza dos dados brutos, atividade que, de modo geral, consiste na detecção e correção de erros, como entradas duplicadas, dados ausentes ou inconsistentes, e formatos inválidos (Ilyas e Chu, 2019). Essa fase é essencial para garantir que o feed esteja em conformidade com a especificação oficial do GTFS e seja compatível com ferramentas de simulação. O pré-processamento incluiu a padronização de todos os identificadores (Ids) para o tipo *string*, a conversão de campos de data e, crucialmente, a formatação de horários para o padrão HH:MM:SS, que permite representar durações superiores a 24 horas, conforme previsto na especificação.

Com os dados devidamente tratados, procedeu-se à geração dos arquivos textuais (*.txt*) que compõem o feed GTFS. A seguir, detalha-se o conteúdo de cada arquivo gerado:

- *Agency.txt*: Descreve a agência de transporte (operadora). Contém informações como nome, URL e fuso horário, sendo gerado a partir dos dados únicos de empresas/operadoras avaliados.
- *Stops.txt:* contém a localização e a descrição de cada ponto de parada ou estação. Cada parada possui um ID único, nome e coordenadas geográficas (latitude, longitude).
- *Routes.txt:* Descreve cada uma das linhas de transportes. Inclui um nome curto (ex: “474”), um nome longo (ex: “Jacaré – Copacabana”) e o tipo de modal (route_type).
- *Calendar.txt:* Define os padrões de serviço (service_id) que indicam os dias da semana em que cada uma rota opera (ex: dias úteis, sábado) e o período de validade do serviço.
- *Stop_times.txt:* É o arquivo mais detalhado e complexo, que especifica a sequência de paradas para cada viagem (trip_id). Para cada parada na sequência, ele define os horários programados de chegada (arrival_time) e partida (departure_time), sendo fundamental para o cálculo de itinerários.
- Adicionalmente, foi gerado o *Shapes.txt* para enriquecer o feed, arquivo opcional que cntém a geometria exata do traçado físico que os veículos percorrem. Foi criado para representar o percurso das rotas com maior precisão utilizando os dados espaciais contidas na área de estudo.

Essa estrutura também permite a conversão do feed GTFS em trajetórias espaço-temporais detalhadas por meio

de ferramentas como o pacote {gtfs2gps}, que viabiliza análises de geografia do tempo e padrões de acessibilidade em redes de transporte (Pereira et al., 2023)

Essa fase de pré-processamento é crítica para a qualidade do feed, pois qualquer erro introduzido neste momento pode gerar inconsistências difíceis de detectar nas análises posteriores. A estruturação correta do feed GTFS viabiliza sua integração com ferramentas SIG como o QGIS, além daquelas voltadas ao planejamento de transportes como OpenTripPlanner, TransCAD e PTV Visum

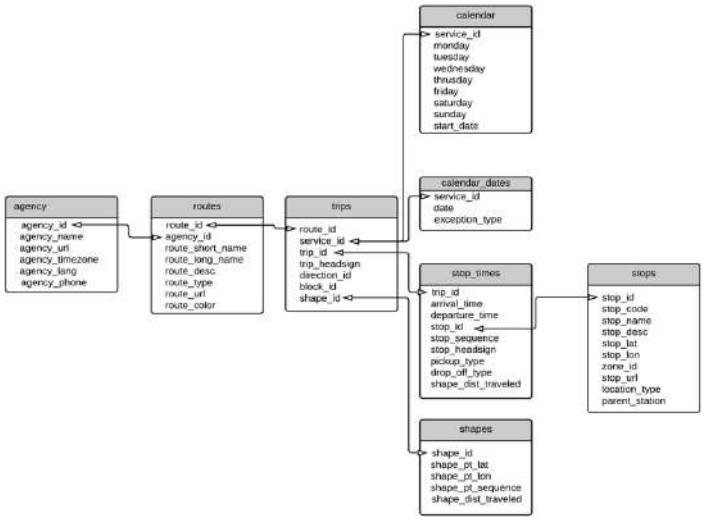


Figura 1: Esquema do formato GTFS. Fonte: Pereira *et al.* (2022).

2.3. Validação e Consolidação

A qualidade de um feed GTFS impacta diretamente a confiabilidade de qualquer análise ou aplicação subsequente (Van Oort, 2016). Para garantir a integridade e conformidade do feed com as especificações oficiais do GTFS, foi desenvolvido e aplicado um robusto *script* de validação em *Python* antes da consolidação final. Este processo verifica o conjunto de dados em múltiplas camadas:

1. **Validação Estrutural:** Confirma a presença de todos os arquivos e campos obrigatórios dentro de cada arquivo;
2. **Validação de Formato:** Assegura que os dados como coordenadas (*stop_lat*, *stop_lon*), sigam estritamente as especificações do GTFS;
3. **Validação de Consistência Lógica**: Analisa a coerência operacional dos dados, como a verificação da sequência cronológica crescente dos horários em *stop_times.txt* para evitar erros de "viagem no tempo" (chegada em uma parada antes da partida da parada anterior).

Além do método utilizado e descrito, foi usado como ferramenta adicional o *gtfs-validator* oficial mantido pela MobilityData. Apenas após a aprovação em todas as etapas de validação, os arquivos do tipo .txt são consolidados e compactados em um único arquivo (*gtfs.zip*), tornando-o pronto para utilização em *softwares* de simulação de mobilidade.

3. METODOLOGIA

Esta seção destina-se a apresentar o resultado do *feed* GTFS construído a partir dos dados dos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí. A Tabela 1 sintetiza um resumo dos modos de transporte considerados nesse processo.

Tabela 1: Resumo Quantitativo do Feed GTFS por Modo de Transporte.

Linha	Linhas	Viagens	Pontos	Descrição
Ônibus	215	18.390	4.902	Linhas urbanas metropolitanas
Trem	8	413	104	Ramais e Extensões da Supervia
Metrô	2	690	41	Linhas 1 e 2 (atualmente operando)

VLT	4	1.291	31	Trechos do Centro e Zona portuária
Barcas	6	366	8	Rotas aquaviárias

Observa-se que o transporte rodoviário por ônibus concentra o maior número de linhas e viagens cadastradas no *feed* GTFS, refletindo sua capilaridade na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Por outro lado, o trem e o metrô, apesar de contarem com um número menor de linhas, apresentam maior frequência por linha. O VLT e as barcas, por sua vez, complementam a malha com serviços de transporte localizados, porém estruturantes em seus respectivos eixos de operação. A Figura 2 ilustra a rede de transporte resultante da importação dos dados GTFS no software *TransCad*, voltado ao planejamento de transportes, utilizado para fins de modelagem e simulação.

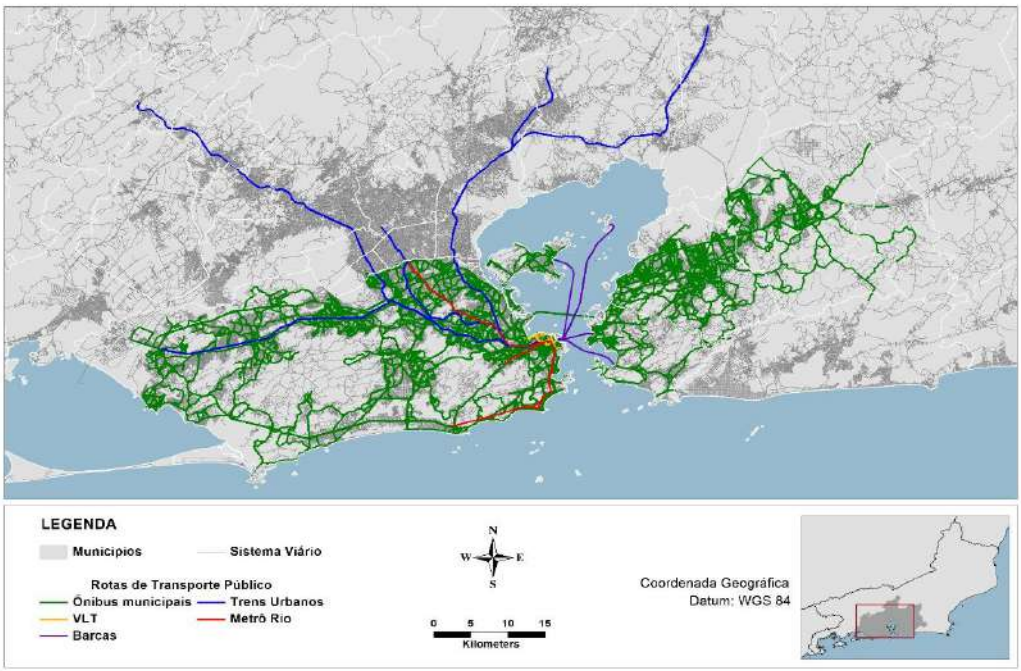


Figura 2: Cobertura Espacial e Integração Modal no Território Metropolitano.

A visualização geográfica dos dados GTFS revela padrões distintos de cobertura entre os modos de transporte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ):

- O Centro do Rio de Janeiro concentra uma alta oferta de serviços, incluindo metrô, VLT, diversas linhas de ônibus e integração direta com a estação das barcas na Praça XV. Esse núcleo central funciona como uma área estratégica quanto à integração e distribuição de viagens urbanas e intermunicipais;
- A Zona Sul do Rio de Janeiro apresenta cobertura significativa do metrô e conexões com o sistema rodoviário, embora com menor densidade de pontos;
- Em São Gonçalo e Itaboraí, observa-se uma vasta malha de ônibus, porém com pouquíssimos pontos de integração com outros modos. As únicas integrações mais evidentes são aquelas viabilizadas pelo sistema aquaviário (barcas) com terminais em Niterói e Praça XV, conectando-se a linhas de ônibus locais; e
- A Região Leste Fluminense (especialmente Itaboraí e áreas do norte de São Gonçalo) carece de opções modais diversificadas, sendo atendida quase exclusivamente pelo ônibus.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a construção de um arquivo no padrão GTFS é mais do que um exercício técnico: é um passo fundamental para o planejamento estratégico da mobilidade urbana. A metodologia desenvolvida, ao sistematizar e padronizar dados dispersos de diferentes modos de transportes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, gerou uma base de dados essencial para a realização de análises espaciais, simulações de cenários e estudos de acessibilidade em um nível de detalhe antes inacessível. A importação para o software

de planejamento de transportes foi bem-sucedida, permitindo que as linhas de transporte público fossem convertidas no formato de rotas padrão da plataforma, compatível com as exigências para fins de modelagem.

A aplicação deste *feed* como ferramenta de diagnóstico revelou importantes assimetrias na oferta de transporte. A alta concentração de integrações no Centro do Rio de Janeiro contrasta com as significativas lacunas de conectividade em municípios como São Gonçalo e Itaboraí. Portanto, a análise do arquivo GTFS torna-se um instrumento poderoso para identificar com precisão os pontos críticos da rede, orientando o desenvolvimento de soluções que promovam um sistema de transporte público mais eficiente, integrado e, acima de tudo, equitativo.

Além dos resultados específicos, o trabalho evidencia o potencial da Ciência de Dados para subsidiar políticas públicas baseadas em evidências. O modelo metodológico aqui apresentado é replicável e pode ser aprimorado em outras regiões metropolitanas brasileiras. Como próximos passos, este *feed* GTFS servirá de alicerce para a modelagem de indicadores de acessibilidade e para a simulação do impacto de novos projetos, quantificando seus potenciais benefícios na redução das desigualdades territoriais.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CNPq, à FAPERJ e ao OPTGIS da COPPE/UFRJ pelo apoio institucional, financeiro e técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MobilityData (2025). General Transit Feed Specification (GTFS). Disponível em: https://gtfs.org/documentation/overview/. Acesso em: 09 de jul. 2025.

Vieira, Joao & Pereira, Rafael & Andrade, Pedro. (2022). Estimating public transport emissions from General Transit Feed Specification data. DOI: 10.31219/osf.io/8m2cy.

Ilyas, I.F., Chu, X., 2019. Data Cleaning. Association for Computing Machinery.

Gaudette, P., Chapleau, R., & Spurr, T. (2016). Bus Network Microsimulation with General Transit Feed Specification and Tap-in-Only Smart Card Data. Transportation Research Record, 2544(1), 71-80. https://doi.org/10.3141/2544-09(Original work published 2016).

Goliszek, Sławomir & Połom, Marcin. (2016). The use of general transit feed specification (GTFS) application to identify deviations in the operation of public transport at morning peak hours on the example of Szczecin. EUROPA XXI. 31. 51-60. 10.7163/Eu21.2016.31.4.

Barrington-Leigh, Christopher & Millard-Ball, Adam. (2017). The world's user-generated road map is more than 80% complete. PLOS ONE. 12. e0180698. 10.1371/journal.pone.0180698.

McKinney, W. (2017). Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython (2nd ed.). O'Reilly Media.

Pereira, R. H. M., Andrade, P. R., & Vieira, J. P. B. (2023). *Exploring the time geography of public transport networks with the gtfs2gps package*. Journal of Geographical Systems, 25, 453–466. https://doi.org/10.1007/s10109-022-00400-x

Matheus de Souza e Silva (matheus.souza@poli.ufrj.br)
Anderson Marden de Sousa Silva (anderson.marden@poli.ufrj.br)
Joyce Azevedo Caetano (joyceazevedo@pet.coppe.ufrj.br)
André Leite Guerra(andreguerra@cefetmg.br)
Rômulo Dante Orrico Filho (romulo@pet.coppe.ufrj.br)
Laboratório de Otimização e Sistemas de Informações Geográficas (OPTGIS) do Programa de Engenharia de Transporte (PET) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Avenida Horácio Macedo, 2030, Bloco I, Sala 244,
Cíntia Machado de Oliveira (cintia.oliveira@cefet-rj.br)
Departamento de Engenharia de Produção, CEFET/RJ – Unidade Itaguaí
Rod. Gov. Mário Covas, BR-101, s/n – Santana, Itaguaí - RJ, 23812-101

DETERMINANTES DA ESCOLHA DO MODO DE TRANSPORTE PARA VIAGENS ATÉ UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO: APLICAÇÃO DE MODELOS LOGIT MULTINOMIAIS

Pedro Henrique Bruder Decker[1], **Carlos Alberto Prado da Silva Júnior**[1]
[1]Universidade Estadual de Londrina

RESUMO
Investigamos como distâncias de viagem e características socioeconômicas dos estudantes, servidores e docentes da Universidade Estadual de Londrina influenciam suas escolhas do modo de transporte até o campus. Dados de pesquisas origem-destino (OD) de 2016 e 2022 subsidiaram Modelos Logit Multinomiais da escolha do modo em função da renda, gênero, idade e logaritmo da distância. Houve redução substancial no uso de ônibus e modesta no uso de carro, acompanhada de aumento das viagens a pé e de moto, em especial por indivíduos de baixa renda. O carro permaneceu predominante entre os mais ricos, que raramente usam ônibus. Mulheres apresentam maior propensão a usar modos coletivos; homens, modos motorizados individuais e bicicleta. As mudanças observadas refletem mais restrições econômicas do que transformações estruturais, com sinais de exclusão no acesso ao transporte entre os mais pobres.

1. INTRODUÇÃO

No século XX, o desenvolvimento orientado ao automóvel moldou as cidades brasileiras, o que ainda hoje impõe desafios à sustentabilidade ambiental, econômica e social. Indivíduos com acesso a veículos particulares desfrutam de maior mobilidade e de mais oportunidades de trabalho, lazer e estudo – ao mesmo tempo em que são responsáveis por mais emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, após séculos de exclusão dos mais pobres das universidades, a Lei de Cotas (2012) ampliou o ingresso de estudantes de baixa renda no ensino superior. Entretanto, persistem barreiras à permanência, entre elas as desigualdades no acesso ao transporte diário até os campi – refletidas em padrões de mobilidade distintos entre indivíduos de diferentes faixas de renda e gêneros. Nesse contexto, é fundamental compreender como diferentes parcelas da população escolhem o modo de transporte. Características socioeconômicas – como idade, renda e gênero – e atributos da viagem – como finalidade, distância, tempo, conforto e custo – são sabidamente relevantes, mas sua influência varia conforme o contexto socioeconômico e espacial, o que dificulta extrapolar conclusões de estudos prévios.

Ruiz-Padillo e Oña (2024) destacam a necessidade de mais estudos para investigar a influência da distância nas escolhas de transporte de estudantes universitários em diferentes contextos. Diante disso, busca-se preencher parte dessa lacuna por meio de estudo de caso na Universidade Estadual de Londrina (UEL). Pretende-se quantificar a influência da distância de viagem e das características socioeconômicas dos indivíduos na escolha do modo de transporte, descrever a evolução da divisão modal entre os anos de 2016 e 2022, e examinar desigualdades e obstáculos à adoção de modos ativos e coletivos. Quantificar o efeito de diferentes variáveis na escolha do modo de transporte até o campus pode ajudar a identificar disparidades e orientar intervenções nos sistemas de transporte. Acompanhar esses efeitos ao longo do tempo permite indicar em que medida alterações em políticas de transporte se refletem nos padrões observados.

2. MÉTODO

Implantado na década de 1970 em área rural, o campus da UEL localiza-se hoje em zona suburbana, a cerca de 4 km do centro de Londrina, município com aproximadamente 560 mil habitantes. Sua localização periférica representa um primeiro obstáculo à adoção de modos ativos, devido às maiores distâncias de viagem. Além disso, o campus está situado às margens da rodovia PR-445, que constitui barreira urbana entre o centro e a universidade (Neri e Silva Jr., 2023). Os acessos carecem de infraestrutura básica para pedestres, como calçadas contínuas e faixas de travessia, e não há ciclovias que cheguem até o campus. Predomina nos arredores um modelo de desenvolvimento urbano orientado ao automóvel, refletido na ampla oferta de estacionamento gratuito no campus – que, ainda assim, frequentemente não supre a demanda. Outro empecilho ao uso de modos ativos é a topografia local. O campus está situado no topo de um espigão ($605\ m$), cercado por vales ao norte ($540\ m$) e ao sul ($520\ m$), de forma que a maior parte da comunidade acadêmica precisa atravessar a rodovia e vencer aclives acentuados para chegar à universidade.

Os dados utilizados provêm de pesquisas OD realizadas em 2016 e 2022 com membros da comunidade acadêmica da UEL, período em que a população do campus se manteve estável (aproximadamente 23.000). Em 2016, a pesquisa foi presencial, com registro de todas as viagens da semana com destino ao campus; 1.803 indivíduos relataram 9.899 viagens com origem válida. Em 2022, a pesquisa foi digital (*Google Forms*),

limitada à viagem mais frequente ao campus; obtiveram-se 707 respostas, 522 com origem válida. Em ambas as edições, os respondentes informaram faixa etária, renda familiar, gênero e esquina mais próxima da origem. Os endereços foram georreferenciados via *API* do *Google Maps* e verificados manualmente. Calcularam-se as distâncias por meio de script em *Python*, baseado na ferramenta *Open Source Routing Machine*, considerando o trajeto por automóvel entre origem e o centro de estudos de cada indivíduo (Huber e Rust, 2016).

Realizou-se breve análise exploratória para descrever, para cada grupo socioeconômico, as divisões modais e distâncias médias de viagem nas amostras de 2016 e 2022. Em seguida, como testes qui-quadrado associados à estatística *V* de Cramér revelaram variação significativa no perfil amostral, adotaram-se testes Z para comparar a fração de indivíduos de cada grupo socioeconômico que usam cada modo de forma mais frequente. Para os mesmos grupos, compararam-se distâncias médias de viagem entre 2016 e 2022 pelo teste t de Welch, adequado para amostras desbalanceadas e variâncias distintas. Em seguida, estimaram-se, separadamente por ano, modelos *Multinomial Logit* (MNL) da escolha do modo em função da renda, gênero, idade e ln(distância), com uso do *software* R e do pacote Apollo (Hess e Palma, 2019). Modelos de escolha discreta, como os MNL, são amplamente utilizados em pesquisas de mobilidade, inclusive em campi (Rérat, 2021; Hossain *et al.*, 2022). Adotou-se o ônibus como modo (i) de referência, com utilidade sistemática (V_{ni}) nula para todos os indivíduos (n). Para os demais modos (caminhada, bicicleta, fretado, motocicleta e carro), especificou-se V_{ni} em função das variáveis explicativas (x_{nk}): gênero (masculino, feminino); faixa etária (< 18, 18 a 25, 25 a 35, > 35); renda familiar mensal (< 1, 1 a 3, 3 a 5, 5 a 10, >10 salários-mínimos (SM)); e ln(distância). As variáveis categóricas foram incorporadas por *dummies*, adotando-se como referência os grupos: feminino; 18 a 25 anos; e renda de 1 a 3 SM. Avaliou-se a qualidade de ajuste dos MNL pela log-verossimilhança (LL) e pelo pseudo-R^2 de McFadden, comparando-se o modelo estimado com as frações observadas de cada modo.

Os modelos retornaram os coeficientes β_{ki} e ASC_i, a partir dos quais calcularam-se razões de chances (OR). As constantes específicas dos modos (ASC_i) são interceptos, e representam a utilidade sistemática do modo i quando todas as variáveis independentes x_{nk} são nulas. Os coeficientes β_{ki}, associados às variáveis explicativas, indicam o efeito de pertencer a um grupo k (de renda, idade ou gênero) sobre a chance de escolher um modo i em relação ao ônibus, quando em comparação com o grupo de referência, mantendo-se as demais variáveis constantes. Portanto, uma limitação de analisar somente os coeficientes do modelo, reside na dificuldade de comparar diretamente modos ou grupos que não os de referência. Para permitir comparações entre quaisquer grupos e interpretação mais clara dos efeitos revelados pelos modelos, construíram-se gráficos de probabilidades previstas de escolha de cada modo em função da distância, considerando indivíduos representativos de diferentes grupos de gênero e renda. Para isso, a partir dos coeficientes estimados, calcularam-se as utilidades sistemáticas (V_{ni}) e as probabilidades de escolha de cada modo (P_{ni}), para distâncias entre $0{,}1\ km$ e $50\ km$. A cada $0{,}1\ km$, fixaram-se as demais variáveis explicativas x_{nk} nas médias observadas nos grupos de gênero e renda, definindo-se perfis sintéticos. Assim, as probabilidades previstas refletem o comportamento de grupos socioeconômicos específicos à época de cada amostra. Por fim, realizou-se levantamento bibliográfico do preço do transporte público e dos combustíveis no município de Londrina em 2016 e 2022, para contextualizar fatores externos não modelados, mas relevantes para a interpretação.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 resume o perfil amostral de 2016 e 2022. Indicam-se as frações amostrais (ind) e a distância média de viagem (d) para os grupos de renda, idade e gênero. Teste qui-quadrado revelou variação substancial na divisão modal ($\chi^2(5) = 62{,}8,\ p < 0{,}001, V = 0{,}16$). A proporção de indivíduos cujo principal modo foi a caminhada aumentou substancialmente (12,3% para 22,1%!), enquanto observou-se redução no uso de ônibus (43,8% para 38,2') e de carro (33,1% para 27,6%*). Houve leve aumento no uso da motocicleta, enquanto não há evidências de alterações na proporção de uso da bicicleta, que permaneceu raro, e do transporte fretado. Parte dessas mudanças decorre de alterações no perfil amostral. A composição de renda mudou substancialmente ($\chi^2(5) = 301, p < 0{,}001, V = 0{,}36$), com maior participação de indivíduos de baixa renda. Houve leve alteração na faixa etária ($\chi^2(3) = 39,\ p < 0{,}001,\ V = 0{,}13$), com moderado envelhecimento. Houve alteração irrisória na divisão de gêneros ($\chi^2(2) = 25,\ p < 0{,}001,\ V = 0{,}11$), marcada por maior presença fora da dicotomia feminino/masculino. Contudo, houve aumento da caminhada e queda no uso de ônibus em todos os estratos de renda, tendência melhor demonstrada por meio da análise dos MNL.

Tabela 1: Frações de indivíduos e distâncias médias até o campus por modo, renda, idade e gênero (2016–2022)

Modo	Val.	Ano	Renda familiar (SM)						Faixa etária				Gênero			Tot. por modo
			-1	1-3	3-5	5-10	+10	N inf	-18	18-25	25-35	35	F.	M.	Out.	
Cam.	ind	16	**!11%**	**!11%**	!12%	!13%	-	!20%	!8,9%	!13%	'6,9%	!0%	!13%	!12%	!0%	**!12,3%**
		22	**!31%**	**!21%**	!20%	!20%	!16%	!28%	!19%	!24%	'9,5%	!10%	!22%	!22%	!31%	**!22,1%**
	d	16	**'1,7**	**'1,8**	2,0	1,7	-	**!11,3**	1,8	**!1,7**	2,1	-	**'1,7**	***1,8**	-	**!1,8**
		22	**'3,0**	**'2,6**	2,4	2,1	1,5	**!2,5**	1,6	**!2,4**	5,6	5,1	**'2,4**	***2,6**	1,9	**!2,5**
Bicic.	ind	16	6,5%	*2,9%	1,8%	1,6%	-	*0%	*0,8%	1,7%	!6,9%	0%	1,0%	'3,2%	!0%	2,0%
		22	5,9%	*0,9%	1,0%	1,1%	0%	*0,8%	*0%	1,5%	!0%	0%	0,8%	'1,6%	!7,7%	1,3%
	d	16	4,4	4,4	**·7,4**	6,2	-	-	4,6	4,5	9,5	-	4,2	6,4	-	5,8
		22	4,6	13,5	**·2,5**	2,3	-	1,1	-	5,6	-	-	9,3	3,3	-	5,6
Fret.	ind	16	*6,5%	6,9%	8,5%	3,1%	-	!6,5%	!11%	5,5%	5,4%	!6,3%	·5,8%	'6,0%	!0%	5,9%
		22	*10%	7,6%	7,8%	2,2%	2,6%	!3,3%	!0%	6,6%	4,8%	!0%	·7,9%	'3,8%	!7,7%	6,1%
	d	16	20,3	30,0	27,1	44,4	-	**·30,6**	23,5	34,1	11,3	52,1	28,6	34,5	-	31,3
		22	40,2	36,0	27,1	20,1	22,3	**·18,2**	-	30,9	2,9	-	29,6	30,1	37,2	30,0
Ônib.	ind	16	**!61%**	**!58%**	!48%	!31%	-	*36%	!50%	'43%	!42%	!44%	·47%	!39%	·50%	**'43,8%**
		22	**!37%**	**!46%**	37%	!30%	!11%	*41%	!75%	'38%	!33%	!20%	·44%	!31%	·46%	**'38,2%**
	d	16	7,8	9,2	8,1	7,5	-	**·6,8**	11,0	**'7,9**	8,7	10,2	**'7,9**	8,6	3,4	***8,2**
		22	12,9	12,1	9,1	7,7	20,6	**·11,4**	14,9	**'10,5**	13,2	8,7	**'11,3**	10,1	11,5	***10,9**
Moto	ind	16	!2,2%	!2,9%	4,5%	2,0%	-	3,3%	*0,8%	2,7%	!9,2%	!6,3%	*1,5%	4,9%	!0%	**· 3,1%**
		22	!5,9%	!8,5%	3,6%	2,2%	0%	3,3%	*0%	3,4%	!17%	!20%	*3,4%	6,4%	!7,7%	**· 4,8%**
	d	16	4,9	8,5	8,1	6,8	-	7,2	10,8	8,0	6,1	12,5	7,5	7,8	-	7,8
		22	3,8	9,3	5,2	7,1	-	9,8	-	8,1	9,6	7,4	7,2	8,2	20,3	8,3
Carro	ind	16	'13%	18%	*26%	49%	-	!35%	**!28%**	**!34%**	*29%	*44%	**!32%**	35%	!50%	***33,1%**
		22	'9,8%	16%	*31%	45%	71%	!24%	**!6%**	**!26%**	*36%	*50%	**!22%**	35%	!0%	***27,6%**
	d	16	8,1	**·8,7**	8,2	6,2	-	6,4	9,3	6,8	8,1	7,4	7,2	6,8	4,6	7,0
		22	5,1	**·6,5**	7,7	6,9	8,6	7,5	20,6	7,2	9,1	6,3	7,5	7,2	0	7,4
Total por grupo	ind	16	**!2,6%**	***23%**	·31%	!38%	-	**!5,1%**	**!6,9%**	·85%	7,2%	**!0,9%**	55%	45%	**!0,1%**	***n=1803***
		22	**!7,2%**	***30%**	·27%	!13%	!5%	**!17%**	**!2,3%**	·88%	5,9%	**!4,2%**	54%	44%	**!1,8%**	***n=707***
	d	16	7,7	9,5	9,1	7,2	-	7,1	11,1	8,1	8,0	11,7	8,1	8,6	·4,0	8,3
		22	10,6	10,0	8,3	6,3	8,8	7,9	12,5	8,6	10,0	6,9	9,4	7,8	·11,1	8,7

Legenda: ind = fração de indivíduos; d = distância média [km]. Significância: ! p < 0,001; * p < 0,01; ' p < 0,05; · p < 0,1.
Testes Z para comparações entre frações de indivíduos. Testes t de Welch para comparações entre distâncias médias.

A Tabela 2 elenca os coeficientes estimados pelos MNL (β_{ki} e ASC_i) e as razões de chances (OR) calculadas.

Tabela 2: Resumo dos resultados dos modelos logit multinomiais

Modo i	Valor	Ano	ASC_i	ln(dist)	Renda familiar (SM)					Faixa etária			Gênero
					-1	3-5	5-10	10	N inf	-18	25-35	35	masc.
Caminhada	Est.	2016	***3,18**	***-3,53**	-0,52	0,14	0,20	-	0,33	0,19	0,06	-	0,02
		2022	***3,22**	***-2,70**	0,81	-0,20	-0,16	1,44	-	-	-0,18	0,21	0,43
	OR	2016	**24,15**	**0,03**	0,59	1,15	1,22	-	1,39	1,21	1,06	-	1,02
		2022	**24,93**	**0,07**	2,24	0,82	0,85	4,22	-	-	0,84	1,23	1,54
Bicicleta	Est.	2016	**·-1,05**	***-1,70**	0,73	0,01	0,29	-	-	-0,52	***1,23**	-	**'1,02**
		2022	-1,16	**'-1,85**	**· 2,11**	0,18	-	-	-	-	-	-	1,3
	OR	2016	**0,35**	**0,18**	2,07	1,01	1,34	-	-	0,60	**3,43**	-	**2,78**
		2022	0,32	**0,16**	**8,23**	1,20	-	-	-	-	-	-	3,68
Fretado	Est.	2016	***-9,06**	***2,64**	0,59	**· 0,60**	0,35	-	**'0,96**	0,07	0,37	-	0,11
		2022	***-5,99**	***1,51**	1,25	**'0,97**	-	-	-	-	-	-	-0,24
	OR	2016	**0,00**	**14,03**	1,81	1,82	1,42	-	**2,62**	1,08	1,45	-	1,11
		2022	**0,00**	**4,51**	3,49	2,63	-	-	-	-	-	-	0,79
Moto	Est.	2016	***-3,22**	**-0,28**	-	**· 0,59**	0,10	-	0,72	-	***0,96**	1,11	***1,30**
		2022	***-2,17**	**-0,60**	1,18	**·-1,39**	0,91	-	-	-	***2,46**	***3,66**	***1,71**
	OR	2016	**0,04**	0,76	-	**1,81**	1,10	-	2,05	-	2,62	3,03	3,66
		2022	**0,11**	0,55	3,27	**0,25**	0,40	-	-	-	11,65	38,89	5,55
Carro	Est.	2016	-0,01	***-0,60**	-0,28	***0,48**	***1,55**	-	***1,09**	-0,11	-0,06	0,76	**'0,25**
		2022	-0,18	***-0,61**	-0,22	***0,79**	***1,03**	***4,10**	-	-0,17	**'1,02**	**'1,37**	***0,88**
	OR	2016	0,99	**0,55**	0,76	**1,61**	**4,71**	-	**2,97**	0,90	0,95	2,15	**1,28**
		2022	0,84	**0,55**	0,81	**2,20**	**2,80**	**60,05**	-	0,84	**2,79**	**3,95**	**2,42**

Significância: * |t(rob)| ≥ 2,58 (p < 0,01); ' 1,96 ≤ |t(rob)| < 2,58 (p < 0,05); · 1,65 ≤ |t(rob)| < 1,96 (p < 0,10).

Para McFadden (1979), pseudo-R^2 entre 0,2 e 0,4 indicam ajuste excelente. O MNL de 2016 obteve LL de -9603 e pseudo-R^2 de 0,28; o de 2022, -531 e 0,24, portanto ambos apresentaram ajuste satisfatório. Ilustra-

se na Figura 1 a probabilidade prevista de escolha de cada modo em função da distância para os diferentes grupos de renda nos anos de 2016 e 2022, o que facilita interpretar os efeitos revelados pelos MNL.

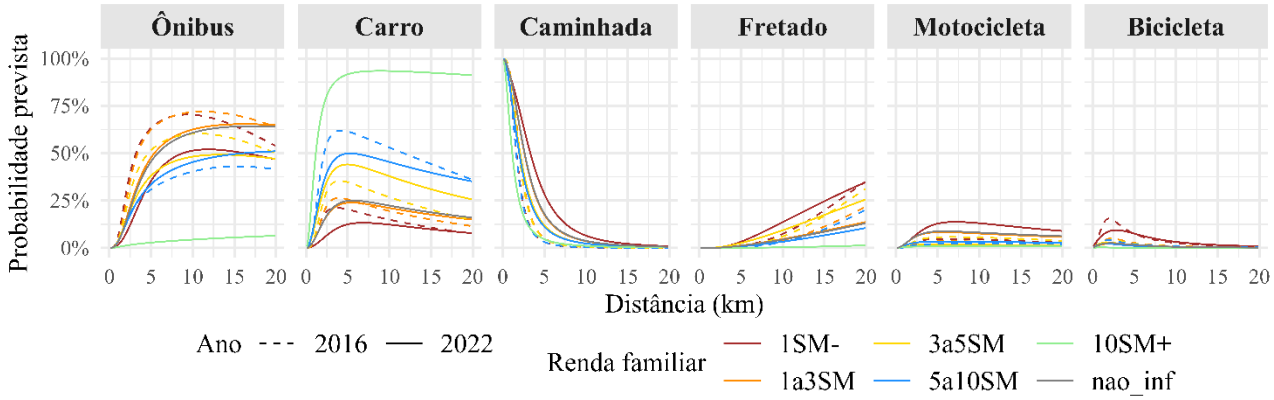


Figura 1: Probabilidade prevista do modo em função da distância, para diferentes grupos de renda (2016-2022)

Nota-se que, em ambos os anos, quanto menor a renda, maior a propensão a caminhar ou usar ônibus, e menor a probabilidade de usar carro. Embora a redução no uso de ônibus tenha ocorrido em todas as faixas de renda entre 2016 e 2022, foi mais pronunciada entre os mais pobres, que passaram a caminhar distâncias maiores e a usar motocicletas e bicicletas com maior frequência. Não por acaso, são modos mais baratos. Essa mudança de comportamento coincide com alterações nas políticas locais. Em 2016, estudantes da UEL podiam utilizar gratuitamente o transporte coletivo pelo programa Passe Livre (Londrina, 2016). A partir de 2018, porém, o benefício foi restrito a inscritos no CadÚnico, de modo que a maioria passou a arcar com pelo menos 50% da tarifa, que subiu de R$ 3,60 em 2016 para R$ 4,00 em 2022 (Londrina, 2017; TCGL, 2025). No mesmo período, o litro da gasolina variou de R 3,60 a R$ 7,00 e do etanol de R 2,59 a R 5,32, atingindo patamares históricos em 2022 (ANP, 2023). Ainda assim, o carro permaneceu predominante entre os mais ricos. Essas evidências são consistentes com os coeficientes da Tabela 2: em 2022 indivíduos com renda acima de 10 SM tiveram 60 vezes mais chance de optar pelo carro em vez do ônibus que os de 1 a 3 SM ($OR \approx 60$).

A Figura 2 evidencia disparidades entre gêneros, além de ilustrar o efeito da distância na escolha do modo para o perfil médio das amostras – que se pontua ter variado substancialmente. Para viagens muito curtas, a probabilidade de caminhada tende a 100%, o que reflete os valores elevados de $ASC_{caminhada}$ (Tabela 2).

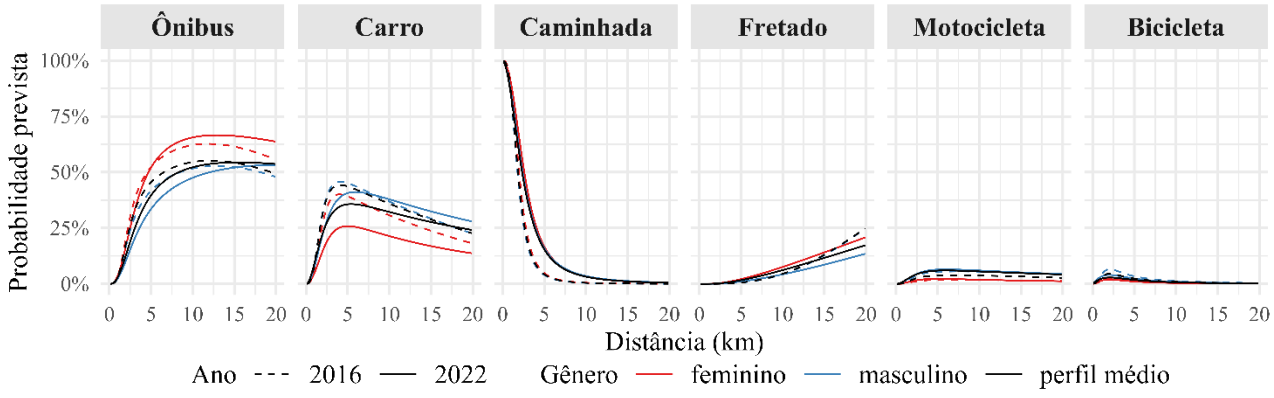


Figura 2: Probabilidade prevista por modo em função da distância, por gênero (2016-2022)

Tanto em 2016 quanto em 2022 homens usaram mais modos individuais (carro, motocicleta e bicicleta), enquanto mulheres usaram mais transporte coletivo – o que está de acordo com os coeficientes associados ao gênero (Tabela 2). Em 2016, homens tinham cerca de 1,3 vezes mais chance de usar carro (no lugar de ônibus) do que mulheres; em 2022, 2,4 vezes. Para motocicleta, os valores foram de 3,7 e 5,6; e para bicicleta, de 2,8 e 3,7. Por outro lado, não se atestou diferença significativa para caminhada entre gêneros, o que é consistente com $OR \approx 1$ e ausência de significância para o coeficiente de gênero. Esses achados subsidiam a interpretação das mudanças nos padrões de deslocamento até a UEL entre 2016 e 2022, e fundamentam as reflexões a seguir.

4. CONCLUSÕES

Investigar os determinantes da escolha do modo de transporte para estudantes universitários pode contribuir para o planejamento de transportes e para a gestão da mobilidade urbana, bem como apresentar possíveis caminhos para a redução de impactos socioeconômicos e ambientais. Os resultados evidenciam tanto o surgimento de novas dinâmicas nos padrões de escolha do modo de viagem, quanto a persistência de desigualdades. Entre 2016 e 2022, observou-se redução significativa no uso do ônibus, especialmente entre estudantes de baixa renda, acompanhada por leve queda no uso do automóvel e aumento expressivo da caminhada – mesmo para distâncias mais longas – e da motocicleta. Como não houve melhorias substanciais na infraestrutura de transporte ativo nem mudanças significativas no uso e ocupação do solo no entorno do campus, os resultados sugerem que tais alterações advêm principalmente de transformações nas condições econômicas e nas políticas de transporte. Nesse contexto, a caminhada tornou-se a única alternativa viável para muitos estudantes. Embora seu crescimento possa, à primeira vista, sugerir avanço rumo à mobilidade sustentável, os dados apontam para um processo de exclusão: estudantes de baixa renda passaram a caminhar não por preferência, mas por falta de opções de transporte acessíveis. Sua permanência no ensino superior torna-se, assim, cada vez mais condicionada à capacidade física e ao tempo disponível de cada indivíduo.

Persistem ainda disparidades associadas ao gênero. Homens apresentaram maior propensão ao uso de modos individuais, como carro, motocicleta e bicicleta, enquanto as mulheres seguiram mais dependentes do transporte coletivo. O uso da bicicleta permaneceu raro, sobretudo entre elas. O automóvel, por sua vez, manteve-se predominante entre os estudantes de maior renda, mesmo diante do encarecimento das viagens. Isso reforça que o carro segue sendo a alternativa mais conveniente para quem não enfrenta restrições orçamentárias – reflexo de uma cidade historicamente moldada para favorecer sua utilização. Modificar esse quadro exige enfrentar as raízes dessa configuração, por meio de investimentos consistentes em infraestrutura para modos ativos e no transporte coletivo, acompanhados de políticas públicas de subsídio que ampliem o acesso e tornem essas alternativas viáveis e competitivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP (2023) *Série histórica de preços de combustíveis e de GLP por município*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/serie-historica-de-precos-de-combustiveis-e-de-glp (acesso em 14/07/2025).

Hess, S. e D. de Palma (2019) Apollo: a flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application. *Journal of Choice Modelling*, v. 32, p. 100170. DOI: 10.1016/j.jocm.2019.100170.

Hossain, S.; L. Patrick; F. Ong e K. N. Habib (2022) The determinants of commute mode usage frequency of post-secondary students in the Greater Toronto and Hamilton Area. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 166, p. 164–185. DOI: 10.1016/j.tra.2022.10.010.

Huber, S.; C. Rust (2016) Calculate Travel Time and Distance with OpenStreetMap Data Using the Open Source Routing Machine (OSRM). *The Stata Journal*, v. 16, n. 2, p. 416-423. DOI: 10.1177/1536867X1601600209.

Londrina (2016) *Passe Livre: programa de subsídio integral ao transporte para estudantes.* Londrina. Disponível em: https://blog.londrina.pr.gov.br/?p=19891 (acesso em 14/07/2025).

Londrina (2017) *Lei Municipal nº 12.641. Dispõe sobre o Programa Passe Livre para estudantes no município de Londrina*. Disponível em: https://www.cml.pr.gov.br/proposicoes/Leis-/2017/1/0/27062 (acesso em 14/07/2025).

McFadden, D. (1979) *Quantitative methods for analysing travel behaviour of individuals: some recent developments*. In Hensher, D. A. e P. R. Stopher (eds.) *Behavioural travel modelling*. London: Routledge, p. 279–318.

Neri, T. B. e C. A. P. Silva Jr. (2023). O Efeito Barreira de Rodovia Urbana e os Impactos sobre a Mobilidade e Despesas com Transportes. urbe. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 15, p. 20210264. DOI: 10.1590/2175-3369.015.e20210264.

Rérat, P. (2021) A campus on the move: Modal choices of students and staff at the University of Lausanne, Switzerland. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* v. 12, p. 100490. DOI: 10.1016/j.trip.2021.100490.

Ruiz-Padillo, A. e J. de Oña (2024) Analysis of the relationships among infrastructure, operation, safety, and environment aspects that influence public transport users: case study of university small and medium sized cities in Brazil. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 185, p. 104115. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104115.

TCGL (2025) *Histórico de tarifas*. Londrina: Transportes Coletivos Grande Londrina. Disponível em: http://www.tcgrandelondrina.com.br/Servicos/historicodetarifas (acesso em 14/07/2025).

Pedro Henrique Bruder Decker (pedroh.b.decker2@uel.br)
Carlos Alberto Prado da Silva Júnior (cprado@uel.br)
Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil, PR-445, km 380, Campus Universitário, Londrina, PR, Brasil

HÁ METADADOS NA MALHA VIÁRIA DO OPENSTREETMAP? UM ESTUDO DA COMPLETUDE E DISPONIBILIDADE DE TAGS DAS ROTAS RURAIS BRASILEIRAS

Marcos Roriz Junior, Willer Luciano Carvalho, Juliana Pereira Rincon, Cláudia Mikaella Moraes
Faculdade de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal de Goiás

RESUMO
A malha viária é fundamental para algoritmos de planejamento e operação de transportes, especialmente em áreas rurais, onde características como tipo de pavimento e largura das vias impactam diretamente a viabilidade das rotas. Metadados complementares à geometria são essenciais para garantir que veículos, como ônibus escolares, trafeguem com segurança e eficiência. No entanto, a obtenção desses metadados é desafiadora, sobretudo em regiões remotas. O *OpenStreetMap* (OSM) surge como alternativa promissora ao disponibilizar dados abertos da malha viária. Neste sentido, este trabalho investiga a presença dessas informações em 8.852 rotas escolares rurais extraídas do Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar. Os resultados indicam que apesar de 99,60% das vias possuírem classificação viária (e.g., residencial ou arterial), apenas 42,26% informam o tipo de pavimento e 0,16% possuem dado referente a largura da via. Neste cenário, recomenda-se etapas adicionais de pré-processamento ou inferência para uso robusto dos metadados no contexto rural.

1. INTRODUÇÃO

A malha viária é um dado central para algoritmos de planejamento e operação de transportes. Através dela, os algoritmos compreendem a estrutura lógica das conexões entre vias, permitindo que modelos matemáticos analisem e otimizem o uso da infraestrutura de forma mais eficiente (Lovelace, 2021). Além da conectividade, a malha inclui atributos geométricos, como a largura da via em metros. No entanto, para uma modelagem mais precisa, são necessários metadados adicionais, conhecido como *tags*, tais como largura da via, número de faixas e tipo de pavimento (Acharya *et al.*, 2025).

No contexto do transporte em áreas rurais, especialmente no caso do transporte escolar, essas informações são fundamentais para a eficácia dos algoritmos. Elementos como mata-burros ou vias com largura insuficiente podem impedir o tráfego seguro de ônibus. Além disso, o tipo de pavimento afeta diretamente a velocidade média permitida, influenciando diretamente os trajetos sugeridos pelos algoritmos (Keller *et al.*, 2020). Nessas regiões, onde as condições viárias costumam ser precárias e os registros oficiais são escassos ou desatualizados, o planejamento e a operação de rotas representam um desafio constante para os gestores públicos.

Nesse cenário, plataformas de mapeamento colaborativo, como o *OpenStreetMap* (OSM), têm ganhado relevância por oferecer dados abertos e gratuitos da malha viária, incluindo a possibilidade de inclusão de metadados (Haklay e Weber, 2008). O OSM é um projeto global alimentado por voluntários, que permite o mapeamento detalhado de ruas, trilhas, terrenos e outros elementos geográficos (Medeiros, 2021; Oliveira et al., 2023). Essa abordagem, conhecida como mapeamento comunitário, permite que os próprios moradores contribuam com informações sobre o território em que vivem, ampliando a cobertura cartográfica de regiões pouco representadas em bases oficiais.

Os metadados das vias no OSM são registrados por meio de *tags*, um sistema de etiquetas que descrevem seus atributos, como tipo de pavimento, limite de velocidade e restrições de acesso (Machado e Camboim, 2019; Souto *et al*., 2021). No entanto, por se tratar de um dado opcional, a disponibilidade e a qualidade dessas informações ainda são limitadas, sobretudo em áreas rurais. Essa limitação se deve, principalmente, à baixa densidade de colaboradores e à ausência de padronização nos registros (Oliveira *et al*., 2023).

A disponibilidade dos metadados é fundamental para trazer mais robustez aos algoritmos. Neste sentido, diversos pesquisadores tem investigado a qualidade dos dados da plataforma *OpenStreetMap* (Randhawa *et al.*, 2025; Acharya *et al.* 2025). Porém, a analise comumente limita-se a atributos geométricos das vias ou realiza-se, não se estendendo aos metadados (Camboim *et al.*, 2015). Por outro lado, os trabalhos que na alisam metadados comumente se limitam ao ambiente urbano (Medeiros *et al.*, 2020). Nesse contexto, surge o desafio de compreender a disponibilidade e a qualidade desses metadados, especialmente na área rural brasileira. Com esse objetivo, este trabalho investiga a presença dessas informações em 8.852 rotas escolares rurais extraídas do Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE) (CECATE-CO, 2023). As rotas do SETE foram utilizadas como filtro para selecionar as vias rurais a serem analisadas no *OpenStreetMap*. A partir dessas rotas, os resultados indicam que 99,60% das vias possuem algum tipo de classificação viária (por

exemplo, local ou arterial). Porém, apenas 42,26% indicam o tipo de pavimento, e somente 0,16% informam a largura da via. A escassez de metadados adicionais pode dificultar o funcionamento adequado dos algoritmos, exigindo etapas adicionais de pré-processamento ou inferência para garantir uma aplicabilidade plena em contextos rurais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A natureza aberta e gratuita da plataforma OSM, em contraste com soluções proprietárias como Google Maps e Waze, tem permitido que diversas ferramentas da área de transportes acessem rapidamente os dados da malha viária (Lovelace, 2021). Como mencionado anteriormente, essa malha constitui uma base essencial para algoritmos voltados à simulação semafórica, roteirização e análise de acessibilidade. A disponibilidade desses dados em formato aberto facilita tanto a construção quanto a execução dos algoritmos, uma vez que dispensa a necessidade de coleta em campo por parte de pesquisadores e engenheiros. No entanto, para que seu uso seja efetivo, é fundamental que os dados estejam não apenas disponíveis, mas também sejam confiáveis (Machado e Camboim, 2019).

No contexto do transporte rural, isso se dá pela presença de metadados (*tags*), que permitem descrever características das vias, tias como o tipo de pavimento, número de faixas e largura da via. A presença das *tags* são fundamentais para um uso robusto da malha viária. De forma simples, as *tags* funcionam como etiquetas que descrevem as características de cada elemento mapeado, como ruas, pontes, trilhas ou até áreas específicas (Souto *et al.*, 2021). Cada *tag* traz informações que facilitam desde a visualização no mapa até análises mais complexas, como o planejamento de rotas ou a avaliação das condições de tráfego. Além de permitir a identificação das vias, as *tags* também ajudam a avaliar a viabilidade do percurso. Saber, por exemplo, se uma estrada é pavimentada, se há pontes no caminho ou se existem restrições de acesso pode evitar situações de risco e reduzir custos operacionais, como desgaste de veículos e tempo de deslocamento (Medeiros, 2021).

Entre as *tags* disponíveis, destaca-se o metadado *highway*, que indica a classificação da via. Este dado pode ser utilizado para inferir outras características da via, por exemplo, vias classificadas como arteriais costumam ter velocidade máxima de 60 km/h. Quando há a presença de duas *tags*, como *highway* e *maxspeed*, entende-se que há uma sobreposição dos valores. Assim, uma rodovia (*highway=motorway*) pode conter trechos com velocidade limitada a 40 km/h (*maxspeed*=40). A *tag surface* descreve o tipo de pavimento, podendo variar entre registros mais detalhados, como *asphalt* (asfalto) ou *compacted* (solo compactado) e termos mais genéricos, como *paved* (pavimentado) ou *unpaved* (não pavimentado). Observe que também há metadados referentes a largura (*width*) e fluxo da via (*oneway*). Por fim, há a possibilidade de anotação de barreiras físicas por meio da *tag barrier*, que permite registrar impedimentos ao tráfego, como porteiras ou mata-burros, informações cruciais para a utilização no contexto rural. Para complemento, o trabalho de discute a aplicações de outras *tags* presentes na plataforma. Infelizmente, o preenchimento de todas essas *tags* não é obrigatório para contribuir com o OSM (Davidovic *et al.,* 2016). De fato, de acordo com Mooney e Corcoran (2012), apenas 50% dos objetos usam mais de seis *tags*.

3. MÉTODO

Para avaliar a disponibilidade dos metadados em vias rurais, este trabalho utilizou o método ilustrado na Figura 1. Primeiramente, foi realizado o *download* da malha viária completa do Brasil, disponível no *OpenStreetMap* por meio do serviço gratuito GeoFabrik (*https://download.geofabrik.de/south-america/brazil.html*). O arquivo, com aproximadamente 1,8 GB, é disponibilizado em formato compactado e requer uma etapa de pós-processamento para seu uso adequado (Medeiros *et al*., 2020).

Para essa etapa, optou-se pela utilização do *software* livre OSM2PGSQL (https://osm2pgsql.org), que permite ler os dados compactados e importá-los diretamente para um banco PostgreSQL. Esse banco de dados, por sua vez, conta com a extensão espacial PostGIS, que permite o acesso e a manipulação dos dados geográficos por meio de linguagens de programação como Python e Java, além de oferecer um conjunto robusto de funções espaciais, incluindo intersecção, união e buffers, essenciais para análises geoespaciais (Obe e Hsu, 2021).

A malha viária carregada contém todas as vias georreferenciadas do Brasil no OSM. Como o intuito é compreender a disponibilidade dos dados no contexto do transporte escolar rural, utilizou-se as rotas cadastradas no Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE) como filtro espacial para seleção

das vias relevantes. Foram consideradas 8.852 rotas escolares rurais registradas por gestores municipais no sistema, com extração realizada em outubro de 2023. A partir desses trajetos, identificaram-se as vias do OSM que os interseccionavam, aplicando-se um *buffer* de 20 metros ao redor das rotas, valor adotado por ser suficiente para absorver imprecisões de GPS em áreas rurais (Oliveira et al., 2019).

Por fim, após a extração das vias, avaliou-se a presença dos metadados através do padrão ISO 19157:2013. Esta norma traz um conjunto de regras para mensurar a qualidade de informações espaciais. No caso específico, a forma de avaliar a qualidade se deu através da mensuração direta com inspeção completa, ou seja, usou-se diretamente dados reais (trajeto das rotas) para verificação da completude temática dos dados, com foco na presença ou ausência de determinadas *tags*, como *surface* e *width*, nas vias rurais extraídas do OSM. A completude se dá uma vez que não foi feito amostragem, ou seja, todas as 8.852 rotas foram consideradas. Para cada atributo, foi calculada a proporção de feições que o possuem, expressa como percentual em relação ao total de vias analisadas.

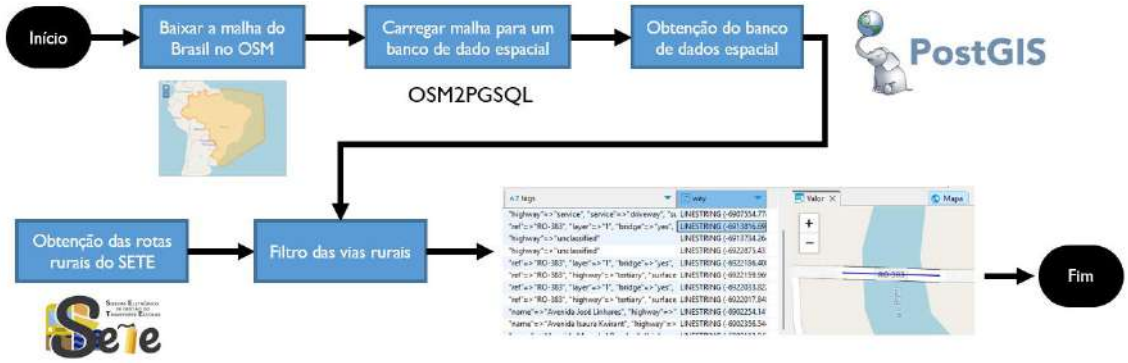


Figura 1: Etapas do método utilizado para mensurar a disponibilidade dos metadados de vias rurais no OSM

4. RESULTADOS

A partir do recorte das rotas rurais, observou-se que 99,60% das vias utilizadas possuem uma classificação viária. Ainda, os resultados apontam que a classificação predominante corresponde a vias residenciais, 44,74% do total, conforme ilustrado na Tabela 1. Em termos absolutos, esse tipo de via é mais numeroso que os demais, sendo composto, em sua maioria, por trechos localizados dentro do perímetro urbano dos municípios. A Figura 2 exemplifica essa predominância com a classificação viária do município de Cabixi, em Rondônia (Brasil).

Apesar da maior quantidade de registros, as vias residenciais geralmente abrangem pequenas extensões, concentrando-se em áreas urbanas, o que explica sua participação reduzida no total da malha quando considerada a métrica de distância, contabilizando apenas 22,07% do total. Analisar a malha viária sob essa ótica, da distância percorrida, observa-se que a maior proporção corresponde a vias classificadas como *unclassified* (37,72%). Esse rótulo não indica ausência de classificação, mas sim uma categorização voltada a vias de hierarquia inferior, comumente associadas a áreas rurais e rotas de menor tráfego.

As vias *unclassified* tendem a ser mais extensas, refletindo sua função de interligar regiões afastadas, embora representem apenas 14,44% da malha em número de ocorrências. Também se destaca a presença de vias terciárias (14,48%) e de serviço (2,68%), ambas compatíveis com o contexto rural, embora em proporções menores. Por fim, observou-se que apenas 0,04% das vias não possuem este tipo de metadado, o que ilustra a robustez do OSM na classificação viária.

Outro metadado analisado foi o tipo de pavimento da via (*surface*), uma vez que essa informação impacta diretamente o desempenho de algoritmos de roteirização e análise de acessibilidade. Observa-se, contudo, que apenas 42,26% das vias presentes na base possuem esse atributo preenchido. Inicialmente, poder-se-ia supor que a ausência da *tag* estaria concentrada em rotas não classificadas (*unclassified*), geralmente associadas a áreas rurais. Porém, os dados indicam o contrário: a omissão do metadado afeta 50,81% das vias *unclassified* e chega a 72,01% nas vias classificadas como residenciais, predominantes nos trechos urbanos.

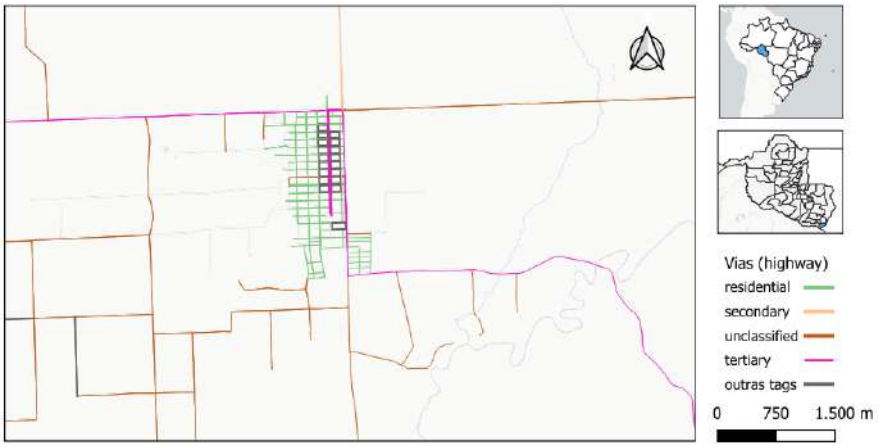


Figura 2: Classificação viária das vias do município de Cabixi (Rondônia, Brasil).

Tabela 1: Distribuição da *tag highway* nas 8.852 rotas rurais

Tag highway	Número de vias	% vias	Tamanho (km)	% km
unclassified	156560	14,44%	291340,07	37,72%
residential	485008	44,74%	170478,51	22,07%
tertiary	103108	9,51%	111072,06	14,38%
service	84390	7,78%	20708,92	2,68%
secondary	70529	6,51%	53698,4	6,95%
primary	44718	4,13%	42281,63	5,47%
nulas	400,	0,04%	2331,27	0,30%
demais *tags*	139341	12,85%	82852,96	10,42%

Quanto aos tipos de pavimento registrados, observa-se que 20,74% das vias estão classificadas como asfaltadas (*asphalt*), enquanto 6,83% utilizam a categoria genérica *paved*, indicando apenas a presença de algum tipo de revestimento. Por outro lado, 9,03% das vias são explicitamente não pavimentadas (*unpaved*) e 1,96% estão marcadas como *dirt*, termo que denota a estrada de terra não compactada.

Em relação ao metadado referente a largura da via (*width*), observa-se que 99,84% das vias não possuem essa informação registrada. Essa ausência representa uma limitação relevante para a análise da trafegabilidade na malha, uma vez que a largura pode ser um fator crítico para o deslocamento de veículos de grande porte, como ônibus escolares. No que se refere à velocidade máxima (*maxspeed*), 88,47% das vias também não apresentam esse dado explicitamente. Porém, destaca-se que é possível inferir este valor com base na classificação viária (*highway*), o que pode mitigar parcialmente a ausência dessa *tag* nos processos de análise e modelagem.

5. CONCLUSÃO

A disponibilidade e a qualidade dos dados da malha viária são fundamentais para a aplicação eficiente de algoritmos de otimização e acessibilidade. Nesse cenário, o *OpenStreetMap* (OSM) se destaca como uma alternativa promissora, ao oferecer gratuitamente uma base abrangente de dados e metadados viários. A partir da análise de 8.852 rotas escolares brasileiras, observou-se que 99,60% dos trechos viários utilizados apresentam alguma forma de classificação (*highway*), como vias locais ou arteriais. A maioria quantitativa das vias está classificada como via residencial, representando os segmentos urbanos dos municípios. Porém, destaca-se que uma parcela significativa das vias se encontra registrada como *unclassified*, sem classificação direta. Isto não quer dizer que há a ausência de classificação, mas sim a atribuição de uma hierarquia inferior, ou seja, estas vias estão associadas a ruas locais ou de serviço, predominante no ambiente rural.

Apesar da ampla cobertura em termos de classificação, observa-se uma ausência relevante de metadados complementares, como tipo de pavimento (*surface*), largura da via (*width*) e velocidade máxima permitida (*maxspeed*). Essa lacuna compromete a construção de modelos mais realistas em áreas rurais, podendo resultar em rotas passando por trechos não pavimentados ou estreitos, inviáveis para veículos de grande porte, como ônibus escolares. Por outro lado, algumas dessas informações podem ser parcialmente inferidas com base na própria classificação viária. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a possibilidade de estimar outros parâmetros a partir dos dados já disponíveis.

Por fim, compreende-se que o uso da malha viária do OSM por algoritmos deve ser conduzido com cautela, uma vez que a incompletude de metadados pode dificultar a execução adequadas dos modelos. Para sanar este problema, alguns pesquisadores tem investigado formas de utilizar técnicas de aprendizado de máquina para preencher parte dos metadados de forma automática (Acharya *et al.*, 2025; Randhawa *et al.*, 2025). Como continuidade, recomenda-se avaliar a aplicabilidade desses métodos à realidade das rotas rurais brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acharya, S., Garikapati, V. M., Allen, M., Lyu, M., Hoehne, C., Sharda, S., & Fitzgerald, R. (2025). Enriching OpenStreetMap network data for transportation applications: Insights into the impact of urban congestion on accessibility. Journal of Transport Geography, 123, 104096. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.104096

Camboim, S., Bravo, J., Sluter, C. (2015). An Investigation into the Completeness of, and the Updates to, OpenStreetMap Data in a Heterogeneous Area in Brazil. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(3), 1366–1388. https://doi.org/10.3390/ijgi4031366

CECATE-CO, Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar – Centro-Oeste (2023). SISTEMA ELETRÔNICO DE GESTÃO DO TRANSPORTE ESCOLAR. Disponível em <https://cecate.fct.ufg.br/p/49406-sete-sistema-eletronico-de-gestao-do-transporte-escolar>. Acesso em 06/07/2025.

Davidovic, N., Mooney, P., Stoimenov, L., Minghini, M., 2016. Tagging in volunteered geographic information: An analysis of tagging practices for cities and urban regions in OpenStreetMap. ISPRS Int J Geoinf 5. https://doi.org/10.3390/ijgi5120232

Haklay, M.M., Weber, P., 2008. OpenStreetMap: User-Generated Street Maps. IEEE Pervasive Comput 7, 12–18. https://doi.org/10.1109/MPRV.2008.80

International Organization for Standardization. (2013). ISO 19157:2013 Geographic information — Data quality. ISO. https://www.iso.org/standard/32575.html

Keller, S., Gabriel, R., Guth, J. (2020). Machine Learning Framework for the Estimation of Average Speed in Rural Road Networks with OpenStreetMap Data. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(11), 638. https://doi.org/10.3390/ijgi9110638

Lovelace, R. (2021). Open source tools for geographic analysis in transport planning. Journal of Geographical Systems, 23(4), 547–578. https://doi.org/10.1007/s10109-020-00342-2

Machado, A. A., & Camboim, S. P. (2019). Mapeamento colaborativo como fonte de dados para o planejamento urbano: desafios e potencialidades. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 11. https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180142

Medeiros, G., Holanda, M. (2019). Solutions for Data Quality in GIS and VGI: A Systematic Literature Review. In Advances in Intelligent Systems and Computing (pp. 645–654). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16181-1_61

Medeiros, G. F. B. de, Degrossi, L. C., Holanda, M. (2020). QualiOSM: Improving Data Quality in the Collaborative Mapping Tool OpenStreetMap. *Brazilian Symposium on GeoInformatics*, 10–21. http://urlib.net/rep/8JMKD3MGPDW34P/43PL798

Mooney, P., Minghini, M., 2017. A Review of OpenStreetMap Data, in: Foody, G., See, L., Fritz, S., Mooney, P., Olteanu-Raimond, A.-M., Fonte, C.C., Antoniou, V. (Eds.), Mapping and the Citizen Sensor. Ubiquity Press, London, pp. 37–59. https://doi.org/10.5334/bbf.c

Obe, R.O., Hsu, L.S., 2021. PostGIS in action, Third edition. ed. Manning Publications, Shelter Island.

Oliveira, P. R., Souza, L. M., & Camboim, S. P. (2023). Análise da cobertura e qualidade do OpenStreetMap em áreas rurais brasileiras. Boletim de Ciências Geográficas.

Souto, C. P., Ferreira, D. R., & Machado, A. C. (2021). A importância das tags no OpenStreetMap para aplicações de transporte. Anais do Congresso Brasileiro de Geotecnologias.

Randhawa, S., Aygün, E., Randhawa, G., Herfort, B., Lautenbach, S., Zipf, A. (2025). Paved or unpaved? A deep learning derived road surface global dataset from mapillary street-view imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 223, 362–374. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.02.020

Marcos Paulino Roriz Junior (marcosroriz@ufg.br)
Willer Luciano Carvalho (willer_carvalho@ufg.br)
Claudia Mikaella Carvalho de Moraes (claudiamoraes@discente.ufg.br)
Juliana Pereira Rincon (julianarincon@discente.ufg.br)
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)
Estrada Municipal - Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio
Aparecida de Goiânia - Goiás - Brasil

IMPACTO DA IRREGULARIDADE DA OPERAÇÃO NO NÍVEL DE SERVIÇO DE UMA ESTAÇÃO DE BRT: UMA ANÁLISE BASEADA EM MICROSSIMULAÇÃO

André Leite Guerra[1, 2], **Glaydston Mattos Ribeiro**[1]
[1] Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

RESUMO
As estações de sistemas BRT desempenham um papel crucial no transporte público de passageiros, influenciando diretamente a qualidade percebida do transporte público. Este artigo analisa como a regularidade da operação dos veículos afeta o nível de serviço em uma estação de BRT na cidade de Belo Horizonte. O estudo foi conduzido por meio de microssimulação de tráfego de pedestres, alimentada com dados de bilhetagem eletrônica e rastreamento por GPS. Foram comparados diferentes cenários de regularidade operacional, evidenciando que variações na frequência dos veículos produzem impactos significativos no desempenho da estação e na qualidade do serviço percebido. Os resultados demonstram que a análise da irregularidade do sistema fornece subsídios relevantes para o planejamento e gestão do transporte público.

1. INTRODUÇÃO

As estações de transporte público coletivo são locais onde as pessoas acessam e egressam os sistemas de transporte e devem oferecer condições adequadas de operação, além de conforto e segurança aos passageiros. Em muitos casos, por concentrar um grande volume de passageiros, pode haver dificuldades na circulação de pessoas que se movimentam nas áreas internas para embarcar e desembarcar ou que aguardam pela chegada da linha, principalmente nos horários de maior exigência do sistema. As estações possuem grande influência na qualidade dos sistemas de transporte já que as condições de espera e de transferência são muito valorizadas pelos passageiros (van Lierop, Badami, & El-Geneidy, 2017). Estudos desenvolvidos internacionalmente (Vanhanen & Jari, 2007; Sharic, Kulathunga, De Silva, & Arambawela, 2019) e no Brasil (Freitas, 2016; Rodrigues, 2006), incluindo Belo Horizonte (Ramos, 2013) mostram que fatores como tempo de espera, tempo e facilidade de transferência, conforto, ambiente da estação, segurança e disponibilidade de informação interferem significativamente no nível de satisfação no transporte público.

Em Belo Horizonte, o sistema de transporte público por ônibus possui cerca de 290 linhas e 2800 veículos que transportam em média 30 milhões de passageiros por mês. Nesta rede está inserido o MOVE, sistema de BRT formado por linhas troncais e alimentadoras que se integram em 4 (quatro) estações de integração e 37 (trinta e sete) estações de transferência (PBH, 2025). A Estação Carijós é uma das estações de transferência do MOVE e se localiza no centro da capital, onde algumas das linhas fazem um retorno operacional, desempenhando, também, a função de terminal. Nesta estação embarcam aproximadamente 13 mil passageiros por dia dos quais 17% se concentram na hora de maior carregamento do período da tarde (das 17h40 às 18h40), quando a maior parte das pessoas retorna para suas residências ao sair do trabalho ou de outras atividades.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da regularidade da operação de ônibus sobre o nível de serviço da plataforma de embarque e desembarque de uma estação de BRT. Para tanto, utiliza-se técnica de microssimulação de tráfego como apoio à análise, permitindo reproduzir as dinâmicas operacionais da estação e as interações entre veículos e passageiros sob diferentes condições de operação. A abordagem foi aplicada à Estação Carijós, em Belo Horizonte, possibilitando a comparação de cenários e a identificação do impacto da irregularidade sobre a qualidade do serviço prestado aos usuários.

Este artigo está estruturado em seis seções, sendo a primeira esta Introdução. A seção 2 apresenta uma revisão dos principais trabalhos que embasaram tecnicamente e cientificamente este estudo. A seção 3 faz uma caracterização do sistema de transporte e da estação analisados. A seção 4 descreve o método de trabalho. Os resultados e discussões são mostrados na seção 5 e a conclusão na seção 6.

2. NÍVEL DE SERVIÇO EM UMA ESTAÇÕES DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS

As estações de ônibus são instalações componentes dos sistemas de transporte onde os veículos param para realizar operação de embarque e desembarque de passageiros com posições para várias rotas de ônibus (Vuchic, 2007). Já as estações de transferência são estações que servem para facilitar o movimento de usuários entre diferentes linhas, podendo ser uma “estação intermediária de transferência” que permitem a transferência entre serviços alimentadores e troncais ou uma “estação de intercâmbio” que permitem a transferência entre

linhas troncais (Wright & Hook, 2008).

Além de cumprir sua função básica, uma estação de deve oferecer um nível de serviço adequado aos passageiros que a utilizam. Conforme adaptado por Guazzelli (2011), a partir do *Manual Transit Capacity and Quality of Service Manual* (TRB, 2013), os principais fatores que afetam a percepção que as pessoas têm do nível de serviço em um terminal de transporte são: quantidade de passageiros nos componentes do terminal; tipos de componentes de amenidades no terminal (componentes não essenciais para a operação do terminal); confiabilidade no serviço do terminal; tempo que o passageiro leva dentro do terminal; percepção que o passageiro tem da segurança enquanto estiver no terminal; quantidade de componentes necessários para atravessar todo o trajeto no terminal (escadas, corredores, rampas etc.); aparência e conforto proporcionados.

Fruin (1971) concebeu um sistema de avaliação do nível de serviço para pedestres dividido em 7 gradações, variando de A a F. Os níveis de serviço são definidos em função de um indicador de concentração espacial de dedestres na área analisada, medida em m²/pedestre. O indicador está diretamente relacionado com alguns dos fatores mencionados anteriormente, como a quantidade de passageiros e o conforto, porém de forma indireta se relaciona também com o tempo que o passageiro leva no terminal já que com o aumento do tempo de espera, haverá também aumento da concentração de passageiros na área de espera. Esse sistema é uma referência para estudos de pedestres e é amplamente utilizado em diversos trabalhos (Guazzelli, 2011; TRB, 2013).

3. A ESTAÇÃO CARIJÓS DO BRT DE BELO HORIZONTE

O sistema de transporte público de Belo Horizonte possui um serviço de BRT em operação desde março de 2014. Seu corredor exclusivo se desenvolve a partir do centro em direção ao norte do município ao longo de duas avenidas, com algumas linhas que atendem também outras regiões. Nas extremidades periféricas da rede se localizam 4 estações de integração, que fazem a conexão das linhas troncais com as alimentadoras dos bairros. Além dessas, existem outras 37 estações de transferência ao longo dos corredores exclusivos que possibilitam que o passageiro realize o pagamento antecipado da tarifa e o embarque em nível. Quatro dessas estações estão no centro da capital, no trecho de pista exclusiva para ônibus formado pelas Avenidas Paraná e Santos Dumont, uma delas é a Estação Carijós, objeto de análise neste estudo. Nesse trecho, parte das linhas do BRT retornam para os bairros de origem e outras se deslocam, a partir dali, para outras regiões do município.

A Estação Carijós, implantada no canteiro central da Avenida Paraná, é atendida por 4 linhas troncais e desempenha papel fundamental na operação do BRT, integrando a rede à área central do município, região de convergências de muitas linhas do transporte coletivo municipal e metropolitano. A estação possui três posições de parada (Figura 1): uma na pista sentido sul (posição sul) e duas na pista sentido norte (posição norte 1 e posição norte 2). As linhas 50 e 61, de característica radial, têm a estação como ponto terminal e realizam retorno utilizando, respectivamente, a posição sul e a posição norte 1. Já as linhas 51 e 5201, de característica diametral, param na estação duas vezes ao longo de seus itinerários, utilizando a posição sul no sentido 1 e a posição norte no sentido 2. A maior ocupação da estação ocorre no período da tarde, especialmente entre 17h40 e 18h40, coincidindo com o término do expediente de grande parte da população.

4. MÉTODO

O método utilizado para a realização da análise do nível de serviço da estação foi a microssimulação do tráfego de pedestres utilizando o *software* PTV VISSIM. Os dados operacionais de transporte, necessários para a modelagem do problema, foram obtidos a partir do Sistema de Bilhetagem Eletrônica (SBE) e do sistema de rastreamento da frota por GPS. Foram utilizados dois conjuntos principais de dados: o primeiro, referente à utilização dos cartões eletrônicos, registra as validações no momento do pagamento da tarifa, correspondendo à entrada dos passageiros no sistema; o segundo registra os horários de passagem dos ônibus em cada ponto de embarque e desembarque ao longo do itinerário.

Os dois conjuntos de dados foram utilizados para se obter o volume de passageiros e de ônibus, respectivamente, e os intervalos de chegada deles na estação. Os dados coletados são referentes ao dia 04 de março de 2020 entre os horários de 17h40 e 18h40 e foram resumidos na Tabela 1. A distribuição dos passageiros entre as linhas foi estimada já que o sistema registra somente o embarque na estação, não se tendo conhecimento da linha utilizada. Essa estimativa foi feita de forma proporcional à frequência das linhas e, no caso das linhas que param duas vezes na estação (linhas 51 e 5201), foi enfatizado o sentido dominante da

linha.

Tabela 1: Resumo dos dados operacionais da estação Carijós

Linha	Frequência de viagens	Volume de passageiros (embarque)	Volume de passageiros (desemb.)	Intervalo de chegada dos passageiros (seg)		Intervalo de chegada ônibus (seg)	
				Média	Desvio	Média	Desvio
50	13	732	170	4,92	4,48	277	136
51_1	7	56	13	63,91	58,19	514	289
51_2	7	394	92	9,13	8,31	514	425
61	10	563	131	6,39	5,82	360	154
5201_1	8	56	13	63,91	58,19	450	317
5201_2	8	451	105	7,99	7,27	450	363
GERAL	**53**	**2.253**	**524**	**1,60**			

O sistema analisado foi representado no PTV VISSIM pelos seguintes elementos (Figura 1): pistas de rolamento do sistema viário do entorno, incluindo a Avenida Paraná e os quarteirões adjacentes das vias transversais; calçadas e faixas de pedestres para circulação desde os pontos de entrada na rede até a estação; estação contendo as diferentes áreas para circulação e espera dos passageiros (áreas em azul na imagem) e áreas de embarque e desembarque na interface plataforma-veículo (áreas em rosa na imagem); posições de parada dos veículos (retângulos azuis nas pistas de rolamento adjacentes à estação na imagem), sendo uma na pista sentido sul e outras duas na pista sentido norte; linhas de transporte público contendo itinerário e parâmetros operacionais como horários de partida e distribuição dos intervalos entre viagens; pontos de entrada dos pedestres na rede (áreas em verde na imagem); rotas de pedestres conectando os pontos de entrada de pedestres na rede às áreas de espera da estação; veículos do transporte público com as características básicas do ônibus articulado utilizado na operação do BRT de Belo Horizonte com quatro portas à esquerda do veículo de altura compatível à plataforma da estação (0,95 m).

Os pedestres foram distribuídos em quatro quarteirões adjacentes de forma proporcional à densidade de linhas de transporte na região do entorno. Em cada quarteirão foram criados quatro pontos de entrada de pedestres um para cada tipo de passageiro (linha utilizada), com volumes proporcionais ao registrado nas catracas da estação.

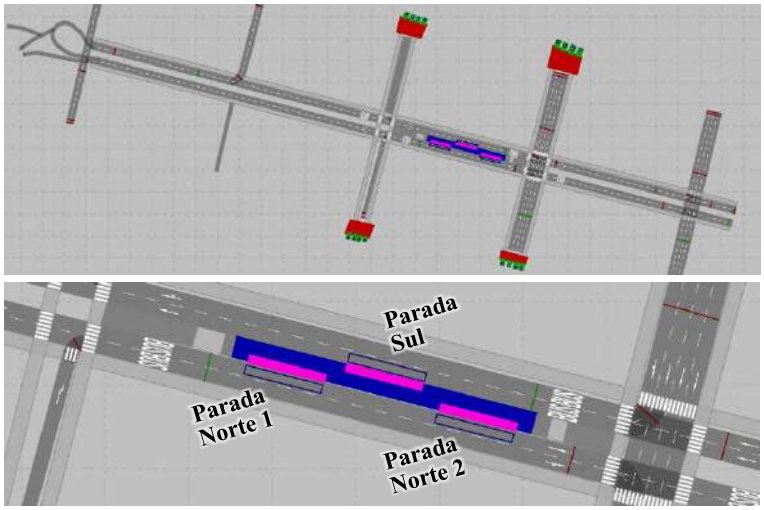


Figura 1: Rede de transporte modelada no VISSIM

Como parâmetros operacionais das linhas de transporte público, foram definidos os horários de partida a partir do intervalo (*headway*) médio da faixa horária analisada (Tabela 1). Para representar a irregularidade nos horários da operação, utilizaram-se curvas de distribuição acumulada dos *headways* (Figura 2), conforme o padrão observado no dia dos dados coletados. Esse gráfico mostra a dispersão dos intervalos no período analisado: por exemplo, a linha 61 possui *headway* médio de 360 segundos (Tabela 1), mas foram observados intervalos variando de valores muito baixos (próximo a zero) até cerca de 590 segundos (Figura 2). Quanto mais horizontalizada está uma curva, mais distantes os intervalos estão da média, indicando maior irregularidade na operação. A entrada de pedestres na rede foi definida pelo volume total (quantidade de pedestres por hora) e pelo padrão de variação desse volume com flutuação estocástica.

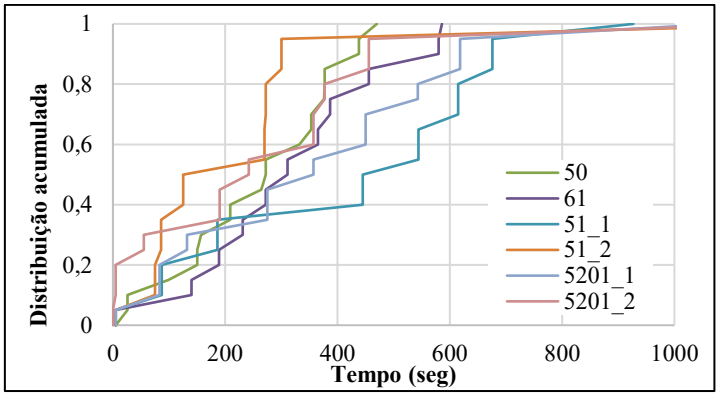


Figura 2: Distribuição de partida das linhas

As análises foram realizadas para quatro cenários diferentes. O **Cenário 1** corresponde à operação atual, com os *headways* praticados pelas linhas de transporte público e levando em conta o padrão de irregularidade observado no dia da coleta de dados, como atrasos ou adiantamentos nos horários de partida. O **Cenário 2** mantém os intervalos atuais entre os veículos, mas desconsidera as irregularidades na operação. O **Cenário 3** é semelhante ao Cenário 2, porém com um aumento de 20% nos valores dos *headways*. Já o **Cenário 4** também se baseia no Cenário 2, mas com um aumento de 40% nos *headways*. A seção seguinte apresenta os resultados obtidos com a microssimulação a partir a média de 5 simulações por cenário.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra uma ilustração extraída de uma das simulações realizadas. É possível observar uma distribuição heterogênea dos passageiros na plataforma. Isso acontece, pois, um passageiro se posiciona na subárea de espera relacionada com o local onde sua linha irá parar. Os resultados a seguir são apresentados em relação a cada uma dessas subáreas de espera e em termos globais.

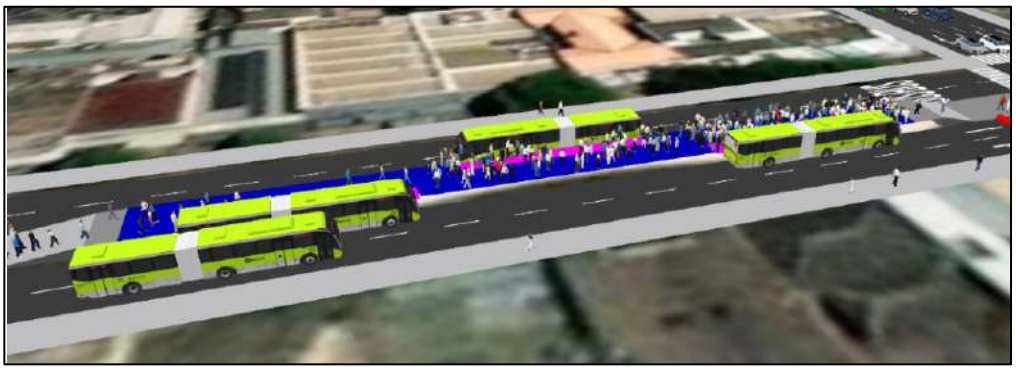


Figura 3: Imagem de uma rodada da simulação

A Tabela 2 mostra as ocupações média e máxima e as densidades média e máxima (em passageiros/m²). A ocupação se refere a quantidade de passageiros que utiliza simultaneamente a plataforma, seja esperando ou em circulação (embarque e desembarque).

Tabela 2: Ocupação média e máxima de passageiros na estação

Parada	Ocupação média (passageiros)				Ocupação máxima (passageiros)				Densidade média (pass/m²)				Densidade máxima (pass/m²)			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Sul	269	85	90	144	608	237	268	349	2,15	0,72	0,77	1,23	4,67	1,82	2,06	2,68
Norte 1	184	52	59	120	523	175	197	302	1,46	0,44	0,50	1,01	4,03	1,35	1,52	2,32
Norte 2	167	96	116	151	431	255	296	374	1,34	0,80	0,97	1,25	3,32	1,96	2,28	2,88
Total	**621**	**233**	**265**	**415**	**1562**	**667**	**761**	**1025**	**1,59**	**0,60**	**0,68**	**1,06**	**4,01**	**1,71**	**1,95**	**2,63**

No cenário 1 (C1) foi registrado um volume médio de 621 passageiros com máximo de 1562. Em todos os demais cenários, até mesmo no 4, em que foi representado um aumento de 40% no *headway* médio, a ocupação foi inferior. No cenário 2 (C2) a ocupação média foi de 233 passageiros (62% menor), no cenário 3 (C3) foi de 265 passageiros (58% menor) e no cenário 4 (C4) foi de 415 passageiros (33% menor). Esse resultado

mostra que a regularidade na operação tem grande influência sobre o nível de ocupação da estação, tendo sido, inclusive, mais importante que o valor do *headway* médio nos intervalos considerados.

Em termos de densidade, no C1, a plataforma apresentou nível de serviço D com valor próximo ao limite inferior desse nível. A subárea mais densa foi a Sul, onde param as linhas 50 e as linhas 51 e 5201 no sentido 1. Os valores máximos de concentração de pessoas nesse cenário atingiram nível de serviço E. Em todos os demais cenários observou-se melhora significativa do nível de serviço. No C2 os valores médios ficaram abaixo do limite do nível A com valores máximos no nível C ou próximo ao limite inferior do nível D. Nos cenários C3 e C4 os valores globais médios ficaram dentro do nível B. Quanto aos valores máximos destes cenários, não foi verificado nível de serviço inferior ao D.

6. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido é de grande relevância ao avaliar o nível de serviço de uma estação de transferência sob a perspectiva do passageiro, aspecto diretamente relacionado a fatores essenciais de qualidade em sistemas de transporte. Utilizando um método baseado em microssimulação, foi possível analisar o desempenho da estação em diferentes cenários operacionais, destacando-se a influência significativa da regularidade dos horários de passagem dos ônibus sobre o nível de serviço. Na comparação entre os cenários 1 e 4, observou-se uma redução de 30% na densidade de passageiros associada à maior regularidade no intervalo entre viagens, mesmo com um aumento de 40% no headway médio — o que representa uma queda de 30% na frequência das partidas. Entre as limitações do estudo, destacam-se a ausência de pesquisas de campo para aferir o nível de serviço real da estação e a utilização de dados de apenas um dia de operação. Como direções para pesquisas futuras, recomenda-se a ampliação do estudo para outras estações do sistema de transporte analisado e a superação das limitações identificadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PTV pelo fornecimento da licença do VISSIM necessária à realização da microssimulação desenvolvida neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Freitas, P. V. (2016). *Qualidade no transporte público urbano por ônibus: um estudo sobre a percepção dos usuários e o desempenho técnico em João Pessoa (PB).* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Dentro de Tecnologia, João Pessoa.

Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian Planning and Design.* Michigan: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.

Guazzelli, C. S. (2011). *Contribuição ao Dimensionamento e à Avaliação Operacional de Terminais Urbanos de Passageiros Metroviários e Ferroviários.* Dissertaçao de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PBH - Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. (17 de Janeiro de 2025). *Ônibus*. Fonte: PBH | Prefeitura Municipal de Belo Horizonte: https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transportes/onibus

Ramos, M. W. (2013). *Qualidade medida e percebida no sistema de transporte coletivo por ônibus: estudo de caso de Belo Horizonte.* Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Rodrigues, M. O. (2006). *Avaliação da qualidade do transporte coletivo da cidde de São Carlos.* Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

Sharic, A., Kulathunga, M., De Silva, M., & Arambawela, S. (2019). The Estimation Of Weight of Factors Influencing Bus Transit Service Quality – Evidence from KDU Commuters. *Proceedings of 12th International Research Conference*, (pp. 1015-1020).

TRB - Transportation Research Board. (2013). *Transit Capacity and Quality of Service Manual.* Washington, DC: National Academies Press.

van Lierop, D., Badami, M. G., & El-Geneidy, A. M. (2017). What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews, 38*(1), pp. 52-72. doi:10.1080/01441647.2017.1298683

Vanhanen, K., & Jari, K. (2007). Quality factors in public transport. Em J. K. Soininen, *The Future of Public Transport.* Ministry of Transport and Communications.

Vuchic, V. R. (2007). *Urban transit systems and technology.* John and Wiley & Sons.

Wright, L., & Hook, W. (2008). *Manual de BRT - Bus Rapid Transit - Guia de Planejamento.* Institute for Transportation & Development Policy.

André Leite Guerra (andreguerra@cefetmg.br)
Glaydston Mattos Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufrj.br)

INCORPORATING EQUITY PRINCIPLES IN THE FORMULATION OF TRANSIT PROJECTS

Nelson de Oliveira Quesado Filho[1], **Maria do Rosário Mauricio Ribeiro Macário**[2], **Francisco Moraes de Oliveira Neto**[1]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Universidade de Lisboa

ABSTRACT
The design of transit interventions often fails to consider equity principles, resulting in solutions that don't serve vulnerable populations. This research proposes a method for formulating transit projects based on the equity principles of Rawls' Egalitarianism and Sen's Capability Approach. The methodology uses network optimization to plan interventions that ensures the most disadvantaged benefit first and are protected from accessibility reductions. Applied to a case study in Fortaleza, the model proved slightly more effective than a traditional maximin approach. It reduced the number of individuals with critically low accessibility and more than halved the inequality gap – when compared to the baseline scenario. The study shows that inserting equity principles directly into the design process can lead to more just outcomes.

1. INTRODUCTION

Accessibility is a core concept in transportation equity and refers to individuals' ability to reach services and activities, considering social and spatial characteristics and constraints (Wee & Geurs, 2011). Transit interventions should be formulated from an accessibility perspective, as it reflects a person's overall capability to reach opportunities (Luz & Portugal, 2021). This implies considering equity issues, such as the equitable distribution of benefits of transport interventions and the reduction of spatial inequalities (Pereira *et al.*, 2017).

Early transport formulation research shifted from cost-based approaches to accessibility (Antunes *et al.*, 2002), but often prioritized equality over equity, overlooking vulnerable populations. Hence, some methods failed to distinguish individuals in need of accessibility improvements from those already well-served (Caggiani *et al.*, 2017). Studies on accessibility inequalities also failed to consider intersecting vulnerabilities, such as spatial and social (Wang *et al.*, 2024). A crucial step in tackling these gaps is the diagnostic phase, used to identify the most deprived communities (Handley *et al.*, 2019). Yet, many studies omit this, focusing on evaluating existing projects, without critically assessing their formulation (Freire, 2019; Amorim & Silva, 2024).

The two main approaches applied to transport justice are the Rawls' Egalitarianism and the Sen's Capability Approach. The former holds that socioeconomic inequalities are just only if they benefit the least advantaged. Its "difference" principle prioritizes the conditions for the worst-off, meaning a transport policy would be evaluated based on the impacts on those with the poorest conditions (Karner *et al.*, 2024). On the other hand, following the interpretation of Pereira *et al.* (2017), the latter is concerned with whether people have access to a minimum level of activities that they value and can perform. Defining such thresholds is a challenge, as social exclusion depends on the accepted norms and standards of the society in which they live (Amorim & Silva, 2024). Capability approach values pluralism, recognizing that different people may have different needs and that justice means enabling each to pursue their own plans (Sen, 2011).

Building on this discussion, the objective of this research is to propose a method for formulating transit projects that incorporates the equity principles of Egalitarianism and Sufficientarianism, while also framing accessibility as a capability. This work advances on previous research by providing an optimization problem for formulating public transport interventions based on the Capability Approach and the Rawls' Egalitarianism.

2. A METHOD FOR FORMULATING PUBLIC TRANSPORT INTERVENTIONS BASED ON EQUITY PRINCIPLES

This paper deals with the formulation of public transport as a network optimization problem. The goal of network optimization is to find the most efficient way to utilize resources within a network towards a goal, like minimizing costs or maximizing overall performance (Dantzig & Thapa, 1997). The optimization problem proposed can be generalized as a network design problem and is represented by an objective function, a set of decision variables, and a set of constraints. These elements are described as follows.

2.1 Objective Function and Decision Variables

The objective function operationalizes the principle of Sufficientarianism by prioritizing interventions that reduce the number of individuals in a problem situation, defined as vulnerable individuals falling below a

critical accessibility threshold. Moreover, some vulnerable individuals experience greater disadvantage due to intersecting vulnerability factors. To reflect this, and following Rawls's difference principle, the objective function is weighted by each individual's original vulnerability, ensuring that those in more precarious conditions contribute more to the optimization criteria. The weighting factor is the inverse of the individual's original accessibility relative to the average accessibility of the population. This means that if an individual has half of the average accessibility in the baseline scenario, its weight is two. The objective function – to minimize – is depicted as follows.

$$min\left(\sum_i \frac{p_i}{u_i}\right) \; given \; that: \begin{cases} if \; a_{project,i} < a_{critical} \; and \; v_i = 1, & p_{project,i} = 1 \\ else, & p_{project,i} = 0 \\ u_i = \left(\frac{a_{baseline,i}}{\overline{a_{baseline}}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

In Equation 1, $p_{project,i}$ is a dummy for whether the individual *i* is in situation of problem (1) or not (0) in the projected scenario, u_i is the original vulnerability for individual *i*, $a_{project,i}$ is the accessibility for individual *i* in the projected scenario, $a_{baseline,i}$ is the accessibility for individual *i* in the baseline scenario, $\overline{a_{baseline}}$ is the average accessibility in baseline scenario, $a_{critical}$ is the minimum acceptable accessibility threshold and v_i is a dummy indicating whether the individual *i* is a vulnerable individual (1) or not (0) (Church *et al.*, 2000). While sufficientarianism is embedded in the objective, it does not fully capture the equity concerns related to excessive disparities between groups. However, rather than incorporating egalitarian principles into the objective function, this research argues that egalitarianism should be enforced as a constraint, ensuring that accessibility improvements do not disproportionately benefit privileged groups or exacerbate disparities.

Transit interventions must be designed to focus on specific decision variables, depending on the nature of accessibility restrictions in a given situation. For example, interventions targeting fare levels may be most effective in situations where affordability is the primary barrier. Similarly, when physical barriers disproportionately affect individuals with disabilities, modifying station features could be prioritized. The decision variables considered are $\mathcal{D} = \{n_j, t_j, f_j, s_j\}$, where n_j is the network layout for scenario j, t_j is the timetable for scenario j, f_j is the fare level for scenario j and s_j is the station design for scenario j.

2.3 Constraints

Rawls' Egalitarianism "difference principle" focuses on protecting the worst-off, ensuring that no one already in a "problem situation" sees their accessibility decrease. It requires improving the situation of the worst-off while ensuring that existing disparities do not widen. This principle is translated into a constraint that ensures that accessibility for individuals in a problem situation must not decrease due to the proposed intervention, *i.e.*, the change in accessibility for individuals in a problem situation must be zero or positive, as follows.

$$\min_i \{\Delta a_i \times p_{baseline}\} \geq 0 \; given \; that: \begin{cases} if \; a_{baseline,i} < a_{critical}, & p_{baseline,i} = 1 \\ else, & p_{baseline,i} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

In equation 2, Δa_i is the accessibility gains for individual *i* in the projected scenario, $p_{baseline,i}$ is a dummy for whether the individual *i* is in situation of problem (1) or not (0) in the baseline scenario. However, accessibility reductions for individuals above the critical accessibility threshold are permissible, unless their accessibility fall below a critical level. This restriction serves as a safeguard for individual rights and preventing situations where accessibility losses impose unjustified burdens. This can be represented as $p_{project,i} \leq p_{baseline,i}$. The third constraint ensures that the optimization problem remains financially viable by limiting the total cost. This restriction is represented as $B \geq c_n n_j + c_t t_j + c_f f_j + c_s s_j$, where B is the budget for implementing the intervention, and c is the cost – or benefit, for fare – factor for each variable.

2.4 Advances and Limitations of the Proposed Method

The proposed optimization model systematizes two equity principles: Sufficientarianism and Egalitarianism. Sufficientarianism, concerned with ensuring a minimum level of opportunity, shapes the objective function, whereas Rawls's principle of protecting the worst-off is incorporated as a protective constraint. Table 1

summarizes these features and clarifies the specific role of each framework within the optimization model.

Table 1 – Operationalization of Equity Principles in the Optimization Model

Feature	Rawls' Egalitarianism	Sen's Capability Approach, according to Pereira *et al.* (2017)
Role	It is operationalized through a protective constraint that acts as a "do no harm" rule. It ensures that the optimization solution does not decrease the accessibility of anyone who is already in a "problem situation."	It is operationalized through a goal-oriented objective function. The goal is to minimize the number of vulnerable people who fall below a critical accessibility threshold.
Strength	Provides an ethical safeguard for the most vulnerable. It prevents policies that might produce overall good results at the expense of the worst-off.	Presents a practical policy target, which is to elevate as many people as possible to a "sufficient" level of accessibility. It moves beyond abstract equality to tangible adequacy.
Limitation	It can be overly rigid. A policy that massively benefits 99% of the population but slightly harms the absolute worst-off individual would be rejected, which may not always be the most practical outcome.	Its primary challenge is the subjectivity of defining the "minimum acceptable" threshold. What is considered "sufficient" accessibility is context-dependent and can be difficult to justify objectively.

2.5 Validation Method

To validate the proposed optimization problem (scenario A), this research applies it to a case study for the city of Fortaleza, Brazil, and compares it to an alternative optimization problem (scenario B) approach, where this alternative optimal scenario is based only in the Rawls' *maximin* criterion. In transportation equity, the *maximin* principle translates into prioritizing accessibility improvements for individuals with the lowest levels of access (Karner *et al.*, 2024), thus by maximizing the minimum accessibility level. In this case the objective function becomes $min\{a_{project,i}\}$. In this scenario, only the budget constraint applies, as the egalitarian principle is already considered in the objective function. The comparison of scenario A and B is based on two perspectives: sufficientarian and egalitarian. The former examines whether the interventions elevate individuals above a minimum acceptable accessibility threshold, measured by the share of vulnerable individuals who remain below it - a lower share indicating greater effectiveness. The egalitarian perspective evaluates disparities using the Palma Ratio, which compares mean accessibility between the top 10% (better-off) and bottom 40% (worse-off). A higher Palma Ratio reflects greater inequality, signaling that accessibility gains are concentrated among the most advantaged.

3. EQUITABLE PUBLIC TRANSPORT INTERVENTION IN FORTALEZA

In Fortaleza, jobs are concentrated in central areas, forcing long commutes on low-income residents from peripheral neighborhoods. The public transport system's overcrowding, delays, and need for multiple transfers worsen this spatial inequity. The interventions formulated for Fortaleza address two major challenges faced by low-income individuals: long travel times and high transit costs. Thus, policy objectives focus on reducing trip durations and travel costs for low-income individuals by balancing fare levels with transit service supply. Additionally, a 25% fare subsidy was implemented as a complementary measure.

3.1 Solution Search Algorithm

This research uses a genetic algorithm to solve the optimization problem, employing the GA package. The process began with an initial population of 100 random solutions, where each "individual" is a different GTFS (General Transit Feed Specification) file, and ran for 15,000 generations. The coding of specific interventions was handled by using the package GTFSwizard. The following interventions were simulated: BRT corridors by changing speeds on the network; frequency changes by duplicating or removing trips; splitting of some routes; and the insertion of express services by removing stops and dwell times. The GTFSwizard package was also used to perform the mutation (probability set to 25%) and crossover (probability set to 80%) operations by altering and combining different GTFS files. The performance of each solution was then evaluated from the travel times estimated using the R5R package, which calculates door-to-door journey times by integrating transit schedules with pedestrian routes. All computation was performed in R language.

3.2 Accessibility Measure

Ferreira (2023) argues that most accessibility measures fall short on representing accessibility as a capability

and proposes a novel accessibility-as-capability measure, adapting the cumulative opportunities measure to incorporate individual constraints. Unlike traditional accessibility indicators, the proposed approach considers individual affordability, avoiding biases that overestimate accessibility for the least advantaged. This paper uses an adaptation of the proposed by Ferreira (2023), as follows.

$$A_i = \frac{\sum_k jobs_k W_{ik}}{\sum_k jobs_k} b_i \;\; given\ that: \begin{cases} W_{ik} = e^{-\frac{(d_{ik}/\sigma)^2}{2}} \\ b_i = min\left\{\frac{i_i . 10\%}{198}, 1\right\} \end{cases} \quad (3)$$

A_i represents the proportion of reachable jobs in a month for individual i, from a given location k, where each job is weighted by the weighting factor W_{ik}, and the total reachable jobs is constrained by the individual's budget factor b_i. W_{ik} follows a Gaussian decay, where travel time d_{ik} is adjusted by a sigma parameter σ to model the influence of distance. The sigma value is chosen such that jobs 60 minutes away receive a weight of 0.5. b_i is the individual's budget constraint that represents whether a person's income can afford the monthly transportation cost for commuting to work. This formula assesses whether an individual's income (i_i) can cover the monthly cost of essential transportation (R$ 198 for two daily trips, and 22 working days) without exceeding the proportion of 10% – a reasonable transport expenditure (Ferreira, 2023). The $a_{critical}$ is defined as the median accessibility for the low-income individuals in the baseline scenario. Freire (2019) argues that using the median as a benchmark ensures a robust evaluation by accounting for existing socio-spatial disparities and setting a threshold that reflects a context-specific, equitable accessibility.

3.3 Problems Solutions

Both optimization problems yielded similar solutions, focusing on fare elimination for vulnerable individuals, service reductions due to revenue cuts, and transit prioritization strategies. The optimal solutions set the fare expenditure factor to R$ 0.00 for all low-income individuals, implementing a fare exemption for this group. Nonetheless, while a 25% public subsidy was included, it was insufficient to fully offset the 62% revenue loss from fare exemptions. To compensate for the remaining 37% cost gap, a corresponding 37% reduction in transit supply was necessitated. This reduction in supply was crucial to maintaining financial viability given the budget constraints. Additionally, BRT corridors and express routes were incorporated into both solutions.

3.4 Scenario Performance

As shown in Table 2, both optimized scenarios noticeably reduce the "problem magnitude" – the proportion of low-income individuals with critically low accessibility – from a baseline of 81.1%. The proposed optimization problem (scenario A) is slightly more effective, lowering the figure to 14.3%, compared to 15.7% in the alternative optimization problem (scenario B). Furthermore, the proposed optimization problem strictly adheres to the equity constraints, with 0% violations for both restrictions. This confirms that the optimization process successfully protects the worst-off, ensuring that no vulnerable individual experiences a decline in accessibility. The alternative optimization problem performed slightly worse, with 5.6% of individuals violating the first restriction and 1.3% violating the second.

Table 2 – Scenarios performance under the sufficientarian perspective.

Scenario	Problem Magnitude	Restriction 1	Restriction 2
Baseline	81.1%	-	-
Scenario (A)	14.3%	0.0%	0.0%
Scenario (B)	15.7%	5.6%	1.3%

Problem magnitude: proportion of low-income individuals below critical accessibility levels. Restriction 1: proportion of individuals that are in problem situation and that have accessibility worsen. Restriction 2: proportion of individuals that are pushed below the critical threshold.

Table 2 reveals an important reduction in inequality. The Palma Ratio is more than halved in the proposed optimization problem, dropping from a baseline of 3.50 to 1.65. This improvement was achieved by more than doubling the job accessibility for the "worse-off" group (from 20.2% to 42.4%), while accessibility for the "better-off" remained stable at approximately 69.9%. This demonstrates that equity-driven optimization successfully closed the accessibility gap by concentrating improvements on the most disadvantaged populations without negatively impacting the most advantaged. The alternative optimization problem shows

similar improvements, The Palma ratio remains low at 1.67, indicating that this scenario also improves accessibility for disadvantaged populations, though slightly less than the proposed optimization problem.

4. CONCLUSION

This research developed and validated a method for formulating public transport interventions based on the equity principles of Rawls' Egalitarianism and Sen's Capability Approach. The methodology systematically designs interventions by operationalizing Sen's Capability Approach into a goal-oriented objective function to prioritize vulnerable populations, and Rawls' Egalitarianism as a protective constraint to ensure the most disadvantaged are protected from accessibility reductions. The model proved effective at improving equity by concentrating improvements on the most disadvantaged populations, reducing the number of individuals with critically low accessibility to 14.3%. Furthermore, it more than halved the inequality gap, dropping the Palma Ratio from 3.50 to 1.65 without negatively impacting the most advantaged group

These findings show that redistributing transit accessibility towards the worst-off significantly improves equity, reduces the number of people in critical accessibility situations, and balances job access across social groups. Also, the study found local-optimal solutions by combining the Genetic Algorithm package for optimization, the GTFSwizard package for creating network scenarios, and the R5R package for evaluation. The primary limitation of the study is that it does not account for behavioral responses to service changes (demand-side), the effects of vehicle occupation, and the dynamic interaction between land use and transport. Future research should explore integrating these factors to enhance the model's robustness.

Acknowledgements
This paper was financed by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Code 001.

REFERENCES

AMORIM, J. e SILVA, J. Abreu e. (2024) Comparing the application of different justice theories in equity analysis of transit projects: a case study of the Lisbon metro circular line. Journal of Transport and Land Use, v. 17, n. 1.
ANTUNES, A.; SECO, A.; PINTO, N. (2002) An accessibility-maximization approach. Journal of Decision Systems, v. 11, n. 3–4, p. 283–296. DOI: 10.3166/jds.11.283-296.
CAVALCANTE, C. B. (2023) Crítica ao planejamento urbano e de transportes em Fortaleza à luz do paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável. Tese de Doutorado, UFC, Fortaleza.
CAGGIANI, L.; CAMPOREALE, R. e OTTOMANELLI, M. (2017) Facing equity in transportation network design problem: a flexible constraints based model. Transport Policy, v. 55, p. 9–17. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.01.003.
DANTZIG, G. D. e THAPA, M. N. (1997) Linear programming: introduction. Springer.
FERREIRA, L. S. (2023) Measuring accessibility as a capability: theoretical and practical implications for transport justice. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
FREIRE, R. M. C. (2019) Proposta metodológica para a avaliação ex-ante dos impactos de intervenções no transporte público nas desigualdades socioespaciais no acesso a atividades. Dissertação de Mestrado. UFC, Fortaleza.
HANDLEY, J. C.; FU, L. e TUPPER, L. L. (2019) A case study in spatial-temporal accessibility for a transit system. Journal of Transport Geography, v. 75, p. 25–36. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.01.005.
KARNER, A.; PEREIRA, R. H. M. e FARBER, S. (2024) Advances and pitfalls in measuring transportation equity. Transportation, v. 51, n. 3, p. 1179–1179. DOI: 10.1007/s11116-024-10474-9.
PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T. e BANISTER, D. (2017) Distributive justice and equity in transportation. Transport Reviews, v. 37, n. 2, p. 170–191. DOI: 10.1080/01441647.2016.1257660.
SEN, A. (2011) The idea of justice. London: Belknap Press.
SOARES, F. D. P. (2022) A problem oriented approach to urban transportation planning. Tese de Doutorado, University of Toronto, Toronto.
WANG, D.; ARALDO, A. e YACOUBI, M. A. A. E. (2024) Acceq-drt: planning demand-responsive transit to reduce inequality of accessibility. Elsevier BV. DOI: 10.2139/ssrn.4773042.
WEE, B. v. e GEURS, K. (2011) Discussing equity and social exclusion in accessibility evaluations. European Journal of Transport and Infrastructure Research, v. 11, n. 4.

Nelson de Oliveira Quesado Filho (nelson.quesado@crateus.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Crateús, Av. Professora Machadinha Lima S/N, Crateús, CE, Brasil.
Maria do Rosário Mauricio Ribeiro Macário (rosariomacario@tecnico.ulisboa.pt)
Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, Lisboa, Portugal.
Francisco Moraes de Oliveira Neto (moares@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, *Campus* do Pici, Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE, Brasil.

INDICADOR DE SUSCETIBILIDADE A ALAGAMENTOS NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO POR ÔNIBUS

Jorge Enrico Ramos Dias, Rodrigo Pina Bluma,
Cassiano Augusto Isler, Liedi Légi Bariani Bernucci
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo apresenta uma análise dos impactos de alagamentos na operação de ônibus urbanos pela proposta de um indicador aplicado a um estudo de caso na cidade de São Paulo. Alagamentos com base em séries temporais de chuva foram simulados através de uma ferramenta computacional e os resultados foram sobrepostos à rede de transporte por ônibus no município, aplicando-se um indicador que compara os tempos de viagem antes e após os alagamentos. Os resultados evidenciam que alagamentos causados por chuvas intensas e de curta duração provocam impactos mais expressivos nos tempos de viagem do que aqueles associados a chuvas moderadas e de maior duração, apresentando maior média, variabilidade e valor máximo do indicador naquele caso. O indicador proposto permite mensurar os impactos de alagamentos na operação por ônibus conforme a intensidade e duração das chuvas, contribuindo como uma ferramenta para a adaptação dos sistemas de transporte a eventos climáticos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado um aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos em escala global. No Brasil, episódios como chuvas intensas têm se tornado cada vez mais recorrentes e severos. Em 2023, o Litoral Norte de São Paulo foi gravemente afetado por alagamentos provocados por fortes chuvas, causando impactos significativos no ambiente urbano. Em 2024, chuvas intensas no Rio Grande do Sul resultaram em alagamentos de extensas áreas urbanas, comprometendo infraestruturas e gerando sérios transtornos à mobilidade, como desvios de trajeto e interrupções nos serviços de transporte. Esses episódios evidenciam a urgência de políticas de adaptação e estratégias de resiliência frente aos impactos crescentes das mudanças climáticas sobre as cidades e suas infraestruturas.

No setor de transporte de passageiros, os impactos dos eventos climáticos extremos são particularmente expressivos, afetando desde a infraestrutura e a operação das redes até o comportamento dos usuários (He *et al.*, 2024). A literatura destaca a importância de analisar os efeitos dos alagamentos na operação do transporte público como subsídio à formulação de políticas públicas voltadas à mitigação de seus impactos. Abenayake *et al.* (2022) propuseram uma abordagem baseada em medidas de centralidade da rede para avaliar falhas em sistemas de transporte. He *et al.* (2021) verificaram que interrupções causadas por inundações resultam em aumento nos intervalos dos serviços de transporte público, mudanças de rota e diminuição de velocidade, traduzindo-se em atrasos nas viagens e perda de acessibilidade a empregos. Colon *et al.* (2021) estimaram os custos econômicos associados às perturbações no tráfego e nas redes de transporte, reforçando a necessidade de estratégias preventivas e adaptativas.

Apesar das pesquisas recentes, nota-se ainda a necessidade da proposta de medidas quantitativas que evidenciem os impactos de alagamentos derivados de chuvas na operação de transporte público por ônibus. Neste contexto, o objetivo deste artigo é analisar quantitativamente os impactos dos alagamentos na operação do transporte público por ônibus. Para isso, propõe-se um indicador que compara os tempos de viagem das linhas de ônibus urbanos em condições normais e sob ocorrência de alagamentos em um estudo de caso na cidade de São Paulo. Os tempos de viagem sob impacto do fenômeno analisado são estimados pela interseção entre as linhas de ônibus e áreas de alagamentos estimadas através de simulações.

2. MÉTODO

O método é composto por três etapas: (i) simulação de alagamentos; (ii) estimativa de tempos de viagem das linhas de ônibus sem ocorrência do fenômeno analisado e considerando alagamentos; (iii) estimativa do impacto dos alagamentos nos tempos de viagem das linhas de ônibus urbanos.

2.1 Simulação de alagamentos

Nesta pesquisa, utilizou-se a ferramenta computacional de código aberto *SynxFlow* (Xia e Ming, 2025) para simular alagamentos na área de estudo, com base em dados de chuva registradas em uma série temporal horária de dias específicos. O software, desenvolvido em Python, integra módulos de modelagem hidrológica e hidráulica, permitindo a representação de eventos de chuva, escoamento superficial, fluxos em rios e canais, além da propagação da água em áreas urbanas inundadas.

A aplicação do *SynxFlow* exige a coleta e o processamento de dados meteorológicos e hidrológicos (chuva horária, vazão dos rios e escoamento superficial). Nesta pesquisa considerou-se um modelo validado pelo grupo de pesquisa dos autores no contexto estudado, em que as simulações de alagamentos resultaram em arquivos *rasters* georreferenciados, cujos pixels contém valores de altura de lâmina d'água.

2.2 Estimativas de tempos de viagem

Os tempos de viagem previstos para a operação regular do transporte público, na ausência de eventos que provoquem distúrbios ou interrupções na circulação dos ônibus, podem ser obtidos a partir das tabelas de horários programadas pelas operadoras, disponíveis publicamente em arquivos no formato *General Transit Feed Specification* (GTFS, 2024). Ressalta-se que tais dados refletem valores programados, não necessariamente os realizados em campo, podendo apresentar variações. Ainda assim, são considerados adequados para fins comparativos, já que o indicador proposto avalia diferenças relativas entre cenários.

Por outro lado, para avaliar o impacto dos alagamentos causados por chuvas nos tempos de viagem dos ônibus, é necessário estabelecer uma relação entre a altura da lâmina d'água e a velocidade dos veículos. Essa relação pode ser obtida por meio do modelo proposto por Pregnolato et al. (2017), que define a velocidade (v) como função da altura da lâmina d'água (w), conforme apresentado na Equação (1). Nesse modelo, a altura da lâmina d'água, expressa em milímetros, determina a velocidade máxima praticável pelo veículo.

$$v(w) = 0{,}0009w^2 - 0{,}5529w + 86{,}9448 \quad (1)$$

Nota-se que o modelo assume velocidade máxima de 86,95 km/h em trechos de via sem alagamentos. Entretanto, nesta pesquisa considera-se a premissa de que a velocidade máxima pratica pelos ônibus é equivalente a 20 km/h nas condições estudadas (OlhoVivo, 2025). Portanto, tem-se que lâminas d'água inferiores a 125 mm (12,5 cm) não causam redução de velocidade dos veículos. Por outro lado, lâminas d'água acima de 300 mm (30 cm) impõem velocidade nula aos ônibus, ou seja, considera-se que a via está totalmente alagada inviabilizando o tráfego dos veículos.

Assim, com base no modelo que estima a velocidade dos ônibus afetados por alagamentos, o tempo de ciclo de uma viagem típica é calculado pela razão entre o comprimento da rota da linha e a velocidade estimada conforme a Equação (1).

2.3 Indicador de impacto de alagamentos

O Indicador de Suscetibilidade a Alagamentos do Transporte Público por Ônibus da linha l ($ISA\text{-}TPO_l$) é apresentado na Equação (2), em que TCA_l é o tempo de uma viagem na linha l potencialmente impactada por alagamentos e TCL_l é o tempo de ciclo em uma viagem na respectiva linha em condições de fluxo livre. O indicador varia no intervalo entre zero e um ($0 \leq ISA\text{-}TPO_l \leq 1$) tal que, se uma linha não sofre nenhum impacto de alagamentos em sua rota para uma dada condição de chuva, então $TCA_l = TCL_l$ e o indicador tem o menor valor possível ($ISA\text{-}TPO_l = 0$). Por outro lado, se uma viagem é altamente afetada por alagamentos, então $TCA_l \to \infty$ e o indicador converge para o maior valor possível ($ISA\text{-}TPO_l \to 1$).

$$ISA\text{-}TPO_l = 1 - \frac{TCL_l}{TCA_l} \quad (2)$$

Assim, o indicador pode ser interpretado como a variação do tempo de viagem de uma linha de ônibus sob condição de alagamento, sendo aplicável tanto à análise de uma linha específica afetada por alagamentos decorrentes de diferentes intensidades de chuva quanto à avaliação de múltiplas linhas operando sob as mesmas condições de alagamento em um determinado período. Neste artigo, analisam-se os impactos de alagamentos em todas as linhas de uma rede de ônibus com base nos resultados de simulações realizadas em dias distintos, com o intuito de avaliar os efeitos da intensidade e duração das chuvas e dos consequentes alagamentos sobre a operação do transporte público.

3. Estudo de caso

3.1 Área de estudo

Nesta pesquisa foi considerada a rede de transporte por ônibus da cidade de São Paulo. Atualmente, o sistema conta com cerca de 1.320 linhas, operadas por 13.340 ônibus que transportam 6,3 milhões de passageiros em um dia típico, aproximadamente (SPTrans, 2025a). A operação é realizada por empresas privadas sob regulação da São Paulo Transporte S/A – SPTrans, empresa de economia mista cujo acionista majoritário é a Prefeitura Municipal de São Paulo. A SPTrans é responsável pelo gerenciamento dos itinerários e das tabelas de horários conforme diretrizes e políticas públicas estabelecidas (SPTrans, 2025b). As informações de planejamento operacional das linhas são disponibilizadas pela SPTrans por meio de arquivos no formato *GTFS*, acessíveis ao público mediante cadastro no site da empresa. Neste estudo, foram consideradas as 1.282 linhas extraídas dos arquivos *GTFS* de 2023 conforme ilustrado na Figura 1.

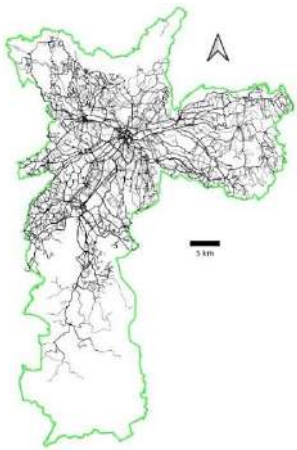
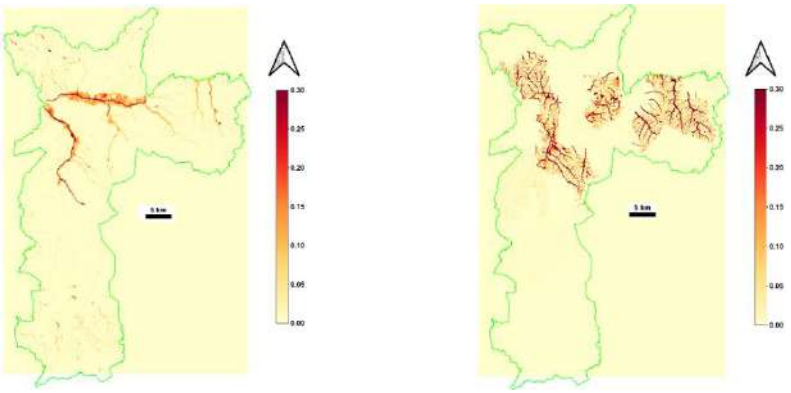


Figura 1: Linhas de transporte público por ônibus na cidade de São Paulo em 2023.

3.2 Resultados de simulações de alagamentos

Simulações de alagamentos foram executadas no software *Synxflow* (Xia e Ming, 2025). O software considera dados de topografia e pluviometria que resultam na estimativa de lâminas d'água em pixels na área de estudo. A Figura 2 representa os alagamentos simulados em função de chuvas registradas na cidade de São Paulo nos dias 04 de fevereiro de 2023, Figura 2(a), e 14 de março de 2023, Figura 2(b), escolhidos como dias típicos em São Paulo a partir de um banco de dados disponível aos autores. A Figura 2(a) apresenta os alagamentos resultantes de uma chuva de baixa intensidade horária e longa duração, em que a água se acumula gradativamente nos pontos mais baixos da cidade onde estão situados os principais rios paulistanos (Pinheiros e Tietê). Por outro lado, a Figura 2(b) indica o os alagamentos derivados de uma chuva de alta intensidade horária, mas de curta duração, em que a água se acumula em bacias localizadas.



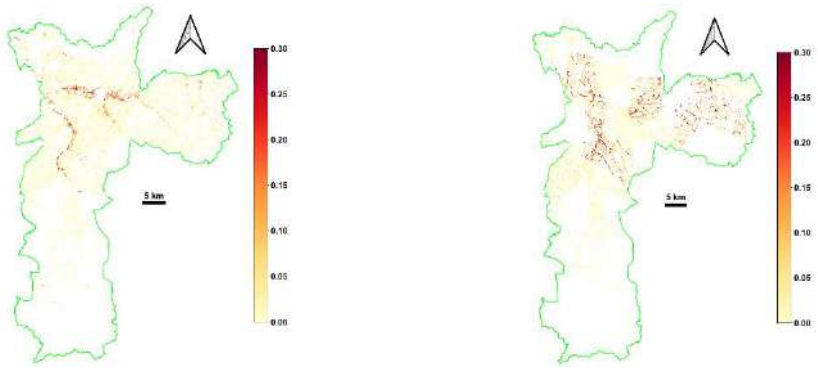
(a) (b)

Figura 2: Resultados das simulações de alagamentos na cidade de São Paulo a partir de chuvas em 04 de fevereiro de 2023 (a), menos intensa e de longa duração, e 14 de março de 2023 (b), mais intensa e de menor duração.

3.3 Resultados do indicador de impactos de alagamentos

A sobreposição das linhas de ônibus com os resultados das simulações de alagamentos nos dias analisados

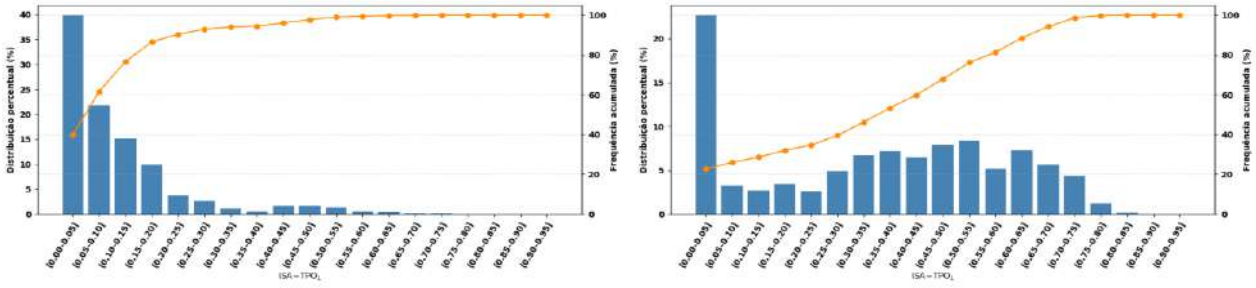
resultou na representação da Figura 3. Nota-se na Figura 3(a) que os trechos das linhas mais afetadas se concentram nas margens dos principais rios paulistanos e de alguns afluentes, sobretudo nas regiões central e leste, como resultado de uma chuva menos intensa, mas de longa duração. Por outro lado, a Figura 3(b) apresenta maior concentração dos trechos afetados à medida que a chuva de maior intensidade, porém de menor duração, resulta em alagamentos em áreas específicas da cidade.



(a) (b)

Figura 3: Trechos das linhas de ônibus afetados pelos alagamentos na cidade de São Paulo resultantes dos alagamentos causados por chuvas em 04 de fevereiro de 2023 (a) e 14 de março de 2023 (b).

Com base nas alturas das lâminas d'água obtidas nos trechos das rotas das linhas de ônibus, foi possível aplicar o modelo da Equação (1) para calcular a velocidade máxima praticável em cada trecho afetado. A partir dessas velocidades e das extensões dos trechos, estimaram-se os tempos de viagem nos segmentos impactados pelos alagamentos (TCA_l). Para fins de simplificação, os tempos de ciclo em viagens não afetadas foram estimados pela razão entre a extensão de cada linha e uma velocidade média padrão de 20 km/h. Com isso, foram calculados os valores do indicador $ISA\text{-}TPO_l$ para cada linha de ônibus considerando os alagamentos simulados nas diferentes datas, cujos resultados são apresentados nos histogramas da Figura 4. As estatísticas descritivas do indicador para os dias analisados são apresentadas na Tabela 1, com o percentual de valores nulos e, separadamente, as estatísticas calculadas apenas para os valores maiores que zero.



(a) (b)

Figura 4: Histogramas dos valores de $ISA\text{-}TPO_l$ calculados em função dos alagamentos simulados a partir das chuvas registradas nos dias 04 de fevereiro de 2023 (a) e 14 de março de 2023 (b).

Tabela 1: Estatísticas descritivas dos valores de $ISA\text{-}TPO_l$ para os dias simulados.

Data	% nulos	Média*	Máximo*	Desvio Padrão*	1º Quartil*	Mediana*	3º Quartil*
04/02/2023	26,0	0,10	0,72	0,12	0,00	0,07	0,15
14/03/2023	14,5	0,35	0,82	0,24	0,09	0,38	0,54

*excluindo as linhas não impactadas pelos alagamentos

No caso estudado, os resultados indicam que alagamentos causados por chuvas intensas e de curta duração, como os simulados em 14/03/2023, causam maiores impactos nos tempos de viagem dos ônibus do que aqueles devidos a chuvas moderadas e mais duradouras simuladas em 04/02/2023. Nessas últimas condições, 26,0% das linhas não apresentaram alterações, ao passo apenas 14,5% permaneceram sem impacto devido à ocorrência de chuvas intensas. A análise dos histogramas e estatísticas descritivas revela que os efeitos das chuvas na operação dos ônibus variam conforme a intensidade e duração do evento. Considerando apenas as linhas afetadas, o valor médio do indicador $ISA\text{-}TPO_l$ foi de 0,10 (desvio padrão de 0,12) nas chuvas

moderadas, e de 0,35 (desvio padrão de 0,24) nas chuvas intensas, evidenciando maior magnitude e variabilidade do impacto à medida que as chuvas se intensificam com menor duração. O valor máximo do indicador atingiu 0,82 sob as chuvas mais intensas e de curta duração.

4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma análise dos impactos de alagamentos na operação de transporte público por ônibus pela proposta de um indicador que considera os impactos desses fenômenos nos tempos de viagem das linhas que atendem a população de São Paulo.

Os resultados demonstram que chuvas com diferentes intensidades e durações impactam de forma distinta a operação dos ônibus na cidade de São Paulo, evidenciando a suscetibilidade do sistema à ocorrência de alagamentos. A análise dos cenários simulados indica que uma mesma rede de transporte público por ônibus pode responder de maneiras variadas a eventos de alagamento, demandando intervenções específicas conforme a gravidade e a duração das chuvas. Nesse contexto, o indicador proposto é eficaz ao identificar as linhas mais suscetíveis a esses eventos, contribuindo para o planejamento de ações direcionadas à operação do transporte público. Assim, a aplicação do indicador apoia estratégias de mitigação dos efeitos negativos de eventos climáticos sobre o transporte coletivo, especialmente diante do cenário crescente de mudanças climáticas.

Embora a pesquisa tenha abordado os impactos de alagamentos nos cenários analisados, sua aplicação do indicador proposto se restringiu a apenas dois eventos de chuva, podendo ser ampliada para análises mais abrangentes em diferentes condições climáticas. Também não se considerou o efeito indireto do congestionamento gerado por outros veículos, o que pode ampliar os atrasos em situações reais. Além disso, o indicador pode ser aprimorado com a incorporação de variáveis operacionais, como a frequência de viagens, dados de demanda – incluindo o número de passageiros embarcados por ponto –, e aspectos de infraestrutura, como a presença de soluções voltadas à melhoria da drenagem urbana.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Universidade de São Paulo pela bolsa de Iniciação Científica no Programa Unificado de Bolsas (PUB-USP), o segundo autor agradece a FAPESP pela bolsa de Mestrado (Processo 2025/11865-0). Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio no projeto CCD Cidades Carbono Neutro (Processo 2024/01115-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abenayake, C.; A. Jayasinghe; H. N. Kalpana; E. E. Wijegunarathna e P. K. S. Mahanama (2022) An innovative approach to assess the impact of urban flooding: Modeling transportation system failure due to urban flooding. *Applied Geography*, v. 147, 102772. DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102772

Colon, C.; S. Hallegatte e J. Rozenberg (2021) Criticality analysis of a country's transport network via an agent-based supply chain model. *Nature Sustainability*, v. 4, n. 3, p. 209–215. DOI: 10.1038/s41893-020-00649-4

GTFS (2024) *General Transit Feed Specification*. Disponível em: www.gtfs.org (acesso em 14/04/2025).

He, Y.; S. Thies; P. Avner e J. Rentschler (2021) Flood impacts on urban transit and accessibility—A case study of Kinshasa. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 96, 102889. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102889

He, S. Y.; S. Tao e K. K. Sun (2024) Attitudes towards public transport under extended disruptions and massive-scale transit dysfunction: A Hong Kong case study. *Transport Policy*. DOI: 10.1016/j.tranpol.2024.02.008

OlhoVivo (2025) *Sistema de Monitoramento do Transporte – SPTrans*. Disponível em: https://olhovivo.sptrans.com.br/ (acesso em 12/07/2025).

Pregnolato, M.; A. Ford; S. M. Wilkinson e R. J. Dawson (2017) The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 55, p. 67–81. DOI: 10.1016/j.trd.2017.06.020

SPTrans (2025a) *Indicadores do Sistema de Transporte*. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/web/mobilidade/w/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/152415 (acesso em 12/07/2025).

SPTrans (2025b) *São Paulo Transporte S/A*. Disponível em: https://www.sptrans.com.br/sptrans/ (acesso em 12/07/2025).

Xia, X. e X. Ming (2025) SynxFlow: A GPU-accelerated Python package for multi-hazard simulations. *Journal of Open Source Software*, v. 10, n. 111, 7586. DOI: 10.21105/joss.07586

Jorge Enrico Ramos Dias (jorgeenricoramosdias@usp.br), *Rodrigo Pina Bluma* (rodrigopinabluma@usp.br), *Cassiano Augusto Isler* (cassiano.isler@usp.br), *Liedi Légi Bariani Bernucci* (liedi@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, Butantã, São Paulo, SP, Brasil

INFERÊNCIA DA OCUPAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS COM BASE EM PADRÕES COMPORTAMENTAIS E OPERACIONAIS

Gustavo Balieiro[1], Marco Littig[1], Renata Machado[1], Leonardo Bernardinelli[1], Leise Kelli de Oliveira[2]
[1]Bus2, [2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este artigo propõe um método para estimar a contagem de passageiros e os níveis de ocupação em sistemas de transporte público, considerando dados de bilhetagem eletrônica e pagamento em dinheiro. O método é composto por quatro etapas complementares: encadeamento de viagens, identificação de viagens virtuais com transferência não registrada, inferência de destino com base em padrões comportamentais dos usuários e nas viagens espelho. A aplicação do método no sistema de ônibus de Vitória (ES) permitiu estimar os embarques, desembarques e a ocupação dos veículos em cada ponto de parada, com cobertura de 100% da amostra, incluindo os pagantes em dinheiro. A abordagem proposta supera limitações de métodos baseados apenas em dados de cartões, ao integrar múltiplas estratégias de inferência. Os resultados fornecem subsídios valiosos para o planejamento e a operação do transporte público, permitindo ajustes mais precisos na oferta de serviços e melhoria da experiência do usuário.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A estimativa confiável da ocupação de veículos de transporte público é fundamental para o planejamento e a operação eficiente dos sistemas de transporte urbano. Com o avanço dos Sistemas de Bilhetagem Eletrônica (SBE), da geolocalização e da tecnologia embarcada, tornou-se possível analisar o comportamento dos usuários em larga escala, substituindo gradualmente métodos manuais de contagem, como as tradicionais pesquisas de "sobe-e-desce". No entanto, apesar dos avanços metodológicos, ainda persistem lacunas relevantes na literatura.

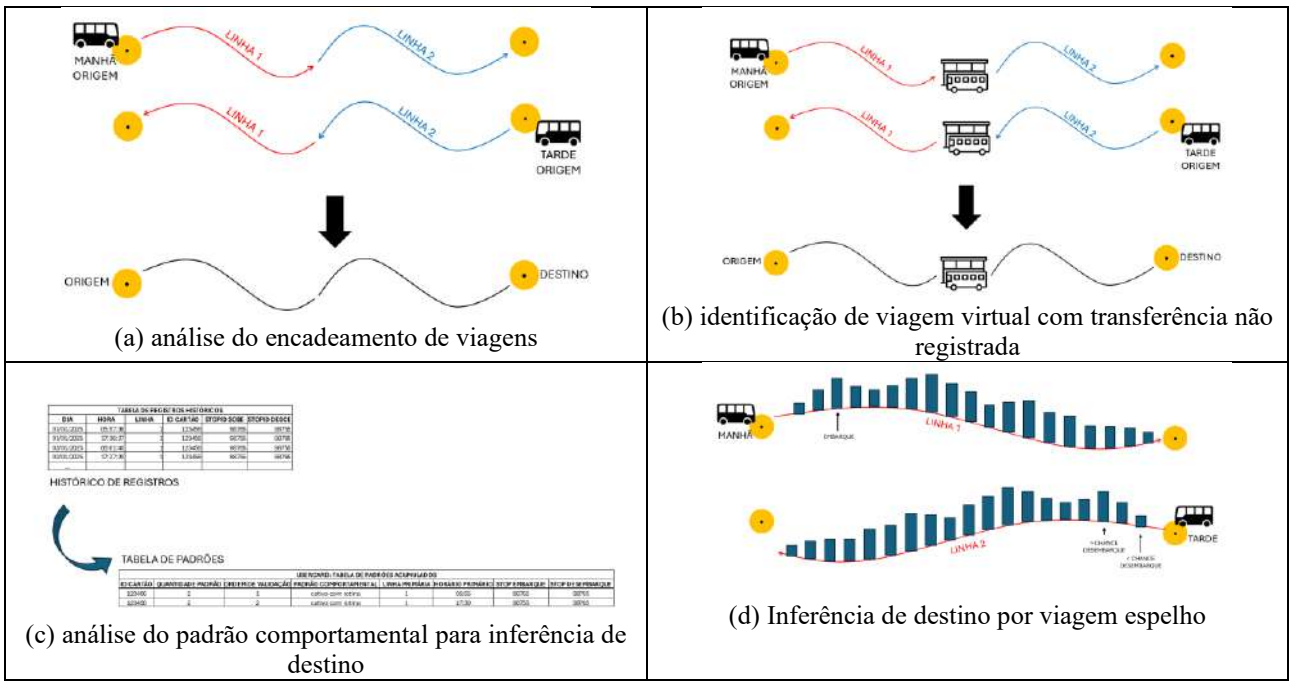
Estudos anteriores têm proposto diferentes abordagens para inferência de origem e destino, a partir de dados de SBE, seja por estimativas baseadas em áreas de influência e matrizes semente (Guerra; Barbosa; Oliveira, 2014), encadeamento de viagens (Arbex; Cunha, 2020), clusters de embarque e direção da viagem (Chen; Fan, 2020) ou probabilidades de desembarque por ponto (Li; Cassidy, 2007). Outras abordagens mais recentes incluem o uso de dados operacionais e aplicativos móveis (Jenelius, 2020) ou algoritmos de máxima entropia (Guex; Loup; Bavaud, 2023). Apesar dos avanços, esses métodos apresentam limitações importantes, como a exclusão dos pagantes em dinheiro, a dependência de múltiplas validações no mesmo dia, e a necessidade de expansão amostral, o que pode introduzir erros na contagem e afetar a confiabilidade das estimativas.

Diante desse cenário, este artigo propõe um método integrado para a estimativa de embarques, desembarques e ocupação de veículos, aplicável a 100% dos usuários, independentemente da forma de pagamento. A proposta é composta por quatro etapas complementares: (i) encadeamento de viagens, (ii) identificação de transferências não registradas (viagem virtual), (iii) inferência de destino por padrão comportamental, e (iv) inferência por viagem espelho, com base no comportamento operacional das linhas. Essa combinação de estratégias permite reconstruir trajetos completos mesmo com registros parciais, superando as restrições dos métodos tradicionais. Aplicado ao sistema de transporte público de Vitória (ES), o método demonstrou capacidade de estimar com precisão o fluxo de passageiros e os níveis de ocupação, oferecendo subsídios práticos para a gestão e otimização da oferta de transporte.

Como contribuição, a contagem de embarque e desembarque é usualmente baseada em encadeamento de viagens, que tem como deficiência a impossibilidade de inferir sobre os destinos das transações com exatamente uma viagem por dia (Hussain; Bhaskar; Chung, 2021; Ma *et al.*, 2013; Özgün *et al.*, 2023). Para contornar esta limitação, Özgün *et al.* (2023) propuseram um método que utiliza a viagem reversa para determinar destinos potenciais dos usuários. Neste estudo, a viagem reversa foi denominada de viagem espelho. No entanto, este artigo vai além e incorpora todos os usuários do transporte público por meio da inferência do destino baseado no padrão comportamental do usuário e na identificação de viagem virtual com transferência não registrada. Não foi identificado na literatura procedimento similar, que contemple todos os usuários. O método proposto está descrito na etapa 2, cujos resultados da aplicação são brevemente apresentados e discutidos na seção 3. A conclusão e sugestão de futuros trabalhos estão apresentados na seção 4.

2. METODOLOGIA

Conforme mencionado, o método é composto de quatro etapas: (i) análise do encadeamento de viagens, (ii) identificação de viagem virtual com transferência não registrada, (iii) análise do padrão comportamental para inferência de destino e (iv) viagem espelho, conforme ilustrado na Figura 1. Por meio dessas quatro etapas, contempla-se todas as possibilidades de validação da viagem, seja usando SBE ou pagamento em dinheiro para estimar os embarques e desembarques de uma linha de transporte público. Ao expandir o procedimento de uma linha para um sistema, elimina-se a necessidade de expansão da amostra, à medida que se alcança a totalidade dos usuários do sistema. Por consequência, tem-se a redução dos erros de expansão e uma melhor aferição sobre a usabilidade do sistema.



(a) análise do encadeamento de viagens

(b) identificação de viagem virtual com transferência não registrada

(c) análise do padrão comportamental para inferência de destino

(d) Inferência de destino por viagem espelho

Figura 1: Ilustração das etapas de análise dos dados

Na etapa de encadeamento de viagem, o destino da primeira viagem do dia é considerado como a origem da última validação do cartão do dia, conforme explorado por Guerra, Barbosa e Oliveira (2014) e Arbex e Cunha (2020). Para garantir a coerência espacial dessa suposição, verificou-se se o local da última validação se encontra dentro do raio de abrangência da linha referente à primeira viagem do dia. Para isso, foi criado um buffer de 500 metros ao redor da localização da primeira validação, sendo então verificado se a coordenada da última validação está contida nesse perímetro.

Na etapa de identificação de viagem virtual com transferência não registrada, buscou-se identificar casos em que o passageiro realizou uma transferência entre linhas de transporte público sem que esta fosse registrada por uma nova validação no SBE. Essa situação ocorre quando há integração física entre itinerários, como em terminais ou pontos de conexão entre linhas, onde a troca de veículo não exige nova validação do cartão. Para tanto, as validações são organizadas cronologicamente para cada cartão e para cada dia, de modo a identificar pares consecutivos de viagens. A seguir, é identificado incompatibilidade direta entre linhas, sendo analisado se a segunda linha validada no dia (e as subsequentes) não possui cobertura direta (isto é, itinerário comum ou sobreposição espacial) com a linha anterior. Se não houver sobreposição, considera-se que a transferência direta entre os pontos A e B não seria possível sem integração. A seguir, faz-se o mapeamento de pontos de integração, utilizando base de dados geoespacial da rede de transporte público para identificar terminais, estações ou paradas comuns onde as duas linhas poderiam se conectar fisicamente, mesmo sem gerar nova validação. Esses locais são considerados como potenciais pontos de integração não registrados. A seguir é realizado a verificação de Conectividade Física, isto é, se existe um ponto de conexão espacial entre as duas linhas no tempo estimado de deslocamento entre a primeira e a segunda validação, considerando o horário de operação das linhas, tempo de percurso e distância entre os pontos. Quando as condições acima foram

satisfeitas, ou seja, inexistência de conexão direta entre os pontos A e B, mas presença de ponto de integração viável entre as linhas, a segunda viagem foi classificada como trecho complementar de uma única viagem virtual com transferência não registrada, sendo classificada como viagem virtual com transferência.

Na etapa de análise do padrão comportamental para inferência de destino, buscou-se inferir o provável destino da viagem nos casos em que não há uma segunda validação no mesmo dia (por exemplo, em deslocamentos com apenas uma etapa registrada). Para isso, foram analisados os padrões temporais e espaciais de uso do transporte público por parte dos usuários ao longo de um período de observação. Assim, as validações foram agrupadas por identificador do cartão e classificadas segundo horário de realização, dia da semana e sequência no dia. Essa classificação permitiu separar contextos recorrentes, como validações matinais em dias úteis associadas a deslocamentos para o trabalho ou estudo. A seguir, a partir das séries temporais de validação, foram identificados locais com alta frequência de validação em horários semelhantes. Considerou-se que, quanto maior a recorrência de um ponto em um determinado horário e dia, maior a probabilidade de ele representar um destino típico, como local de trabalho, escola ou residência. Para os dias com apenas uma validação registrada, foi inferido o provável destino do passageiro com base na probabilidade condicional de ocorrência anterior, considerando a Equação (1), em que $P(D_i|H, D_s)$ representa a probabilidade do destino D_i, dado o horário H e o tipo de dia D_s; nD_i representa o número de vezes que o ponto D_i foi registrado como validação secundária em dia de validações múltiplas e $n(H, D_s)$ representa o total de dias com características semelhantes. Nos casos em que o passageiro apresentou apenas uma validação no dia, e esta ocorreu em um horário similar ao de validações anteriores recorrentes, foi assumido que a viagem teve como destino o ponto com maior probabilidade de ocorrência para aquele contexto.

$$P(D_i|H, D_s) = nD_i/n(H, D_s) \quad (1)$$

Por fim, a etapa de viagem espelho busca inferir o provável ponto de desembarque de passageiros com apenas uma validação registrada, com destaque para os pagantes em dinheiro, cujas viagens normalmente não permitem rastreamento de origem-destino. Ao contrário das etapas anteriores, que se baseiam no comportamento individual dos usuários, esta fase explora padrões operacionais simétricos das linhas de ônibus. Para tanto, parte-se da premissa de que nos sistemas de transporte público organizados radialmente ou com linhas bidirecionais, cada viagem em um determinado sentido possui uma viagem correspondente (espelho) no sentido oposto, conforme explorado por Özgün *et al.* (2023). Assim, ao observar um número de embarques recorrentes na linha A, as 7h, no sentido bairro-centro, espera-se encontrar um padrão similar de desembarques na mesma linha (ou em outra linha de retorno), por volta das 17h, no sentido centro-bairro. Para tanto, inicialmente faz-se o mapeamento das linhas espelhos, identificando para cada linha e sentido, a linha ou sentido oposto correspondente, com base na codificação do sistema de transporte e no itinerário georreferenciado. Para estabelecer pares temporais representativos de viagens espelho, o dia foi dividido em faixas horárias típicas de ida e volta. Para observar os padrões de embarque da linha espelho, foi construída uma matriz origem-horário para identificar os pontos de embarque frequentes nas viagens de retorno (linha espelho), assumindo que esses locais correspondem aos destinos prováveis das viagens de ida. A seguir, para cada ponto de embarque observado na viagem de ida (em horário de pico), foi atribuída uma probabilidade de desembarque com base na frequência relativa de embarques na linha espelho no período de retorno, conforme Equação 2, em que $P(D_i|E_j)$ é a probabilidade do ponto D_i ser o destino da viagem com embarque E_j; $n(Espelho = D_i)$ representa o número de embarques na linha espelho no ponto D_i e $\sum n(E_{espelho})$ representa o total de embarques observados na linha espelho.

$$P(D_i|E_j) = n(Espelho = D_i)/\sum n(E_{espelho}) \quad (2)$$

Esse padrão operacional permite inferir o destino da viagem de ida a partir do embarque da viagem de retorno, mesmo quando o destino real não é registrado, como no caso dos pagantes em dinheiro. Ainda, como não há histórico de trajetos para passageiros que pagam em dinheiro, assumiu-se que o comportamento espacial e temporal desses usuários é semelhante ao dos usuários com cartão. Assim, os embarques em dinheiro foram associados aos prováveis destinos utilizando a matriz de viagens espelho, com base nas probabilidades calculadas.

Com a obtenção da contagem dos embarques e desembarques em cada PEDs, calculou-se a ocupação do veículo como a diferença acumulada entre o número de embarques e desembarques ao longo do trajeto em

determinada direção F, seguindo o procedimento proposto por Özgün *et al.* (2023). Ao repetir este procedimento para todas as linhas que compõe o sistema de transporte público, tem-se a matriz origem-destino dos deslocamentos por ônibus, bem como a ocupação dos ônibus, em cada linha, em cada intervalo de horário.

3. RESULTADOS

O método proposto foi aplicado no sistema de transporte público de transporte por ônibus em Vitória, Espírito Santo, permitindo a estimativa de sobe e desce de passageiros. O método apresentou resultados progressivamente mais completos. A aplicação da primeira etapa, de encadeamento de viagens, permitiu a identificação dos pares para 51,7% da amostra. Com a viagem virtual, o percentual de identificação subiu para 62,1%, ao considerar integrações não registradas por validação. A análise do padrão comportamental contribuiu para elevar a cobertura a 67,9%, por meio da inferência baseada em hábitos recorrentes de uso do sistema. Por fim, com a aplicação da viagem espelho, foi possível alcançar 100% da amostra, permitindo uma completa identificação dos embarques e desembarques, inclusive para os passageiros que pagam a tarifa em dinheiro.

Como forma de validar os resultados do método, na Figura 2 é ilustrado os resultados para uma linha (010I_A) em Vitória. Além de identificar o sobe desce para cada ponto, de cada linha, o método ainda permite o cálculo da ocupação do ônibus. No caso, observa-se um padrão espacial típico de deslocamentos pendulares, com predominância de embarques nas regiões mais ao norte do trajeto e desembarques concentrados nas porções centrais e sul da cidade. A ocupação dos veículos, representada por círculos verdes, apresenta um crescimento progressivo ao longo do percurso, atingindo o pico próximo ao centro expandido de Vitória, seguido de uma redução à medida que os passageiros desembarcam.

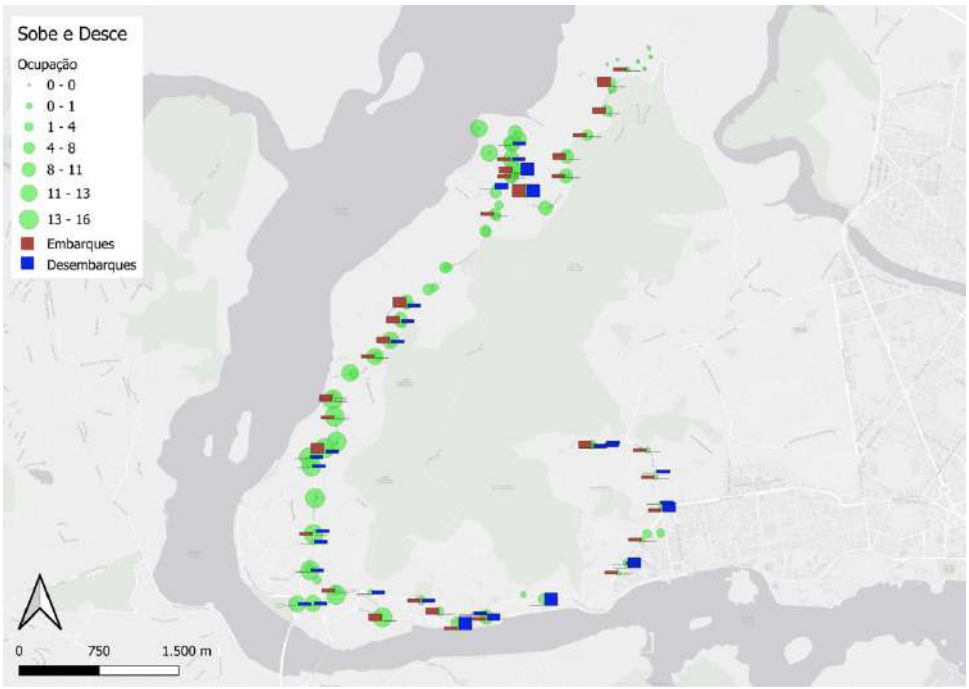


Figura 2: Resultados da aplicação do método proposto.

A aplicação do método proposto em contextos urbanos brasileiros pode gerar impactos significativos na gestão do transporte público. Ao possibilitar a estimativa precisa da ocupação dos veículos e do padrão de embarques e desembarques com base em dados já disponíveis, inclusive de usuários que pagam em dinheiro, o método elimina a necessidade de pesquisas de campo custosas e amostragens parciais com expansão. Isso permite que prefeituras, operadoras e órgãos gestores tenham uma visão contínua e abrangente da demanda, apoiando decisões como o redimensionamento de frota, ajustes de frequência e a identificação de trechos críticos com maior ocupação do veículo. Em cidades com recursos técnicos e financeiros limitados, essa abordagem representa uma alternativa viável, escalável e de baixo custo, promovendo uma gestão mais eficiente, transparente e responsiva às necessidades da população usuária do transporte coletivo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estimação precisa dos níveis de ocupação em veículos de transporte público é um pilar fundamental para a oferta de serviços eficientes e de alta qualidade. A capacidade de determinar com exatidão a quantidade de passageiros, identificar os trechos com maior utilização e avaliar o desempenho de cada viagem individualmente permite um gerenciamento operacional proativo e adaptado às reais necessidades dos usuários. Neste contexto, foi proposto o método, que se destaca por superar limitações significativas encontradas em abordagens anteriores, que frequentemente dependem de encadeamento de viagens e não conseguem inferir o destino de passageiros com uma única validação diária. Ao integrar progressivamente as etapas, o método alcançou uma cobertura de análise de 100% dos usuários do transporte público, conforme demonstrado pela aplicação no sistema de transporte público de Vitória (Espírito Santo). O método permite a geração de indicadores cruciais para a gestão do transporte coletivo. A determinação da ocupação e do trecho crítico de cada viagem oferece aos operadores uma visão clara dos pontos de maior demanda, possibilitando ajustes na frequência e na alocação de veículos para mitigar a elevada ocupação dos veículos e melhorar o conforto dos passageiros. Adicionalmente, o cálculo da ocupação de cada linha, viabilizado pela contagem dos embarques e desembarques em todos os pontos, revela a dinâmica de rotatividade de passageiros ao longo do percurso da linha. Este indicador é vital para entender se uma linha atende predominantemente viagens de longa distância ou se funciona como um distribuidor ao longo de seu trajeto. Por fim, a capacidade de avaliar o desempenho de cada viagem de forma isolada transforma a gestão de reativa para proativa, permitindo que os órgãos gestores identifiquem e corrijam falhas operacionais pontuais antes que se tornem problemas crônicos.

Para futuros trabalhos, sugere-se comparar os resultados do método proposto com contagem de campo a fim de verificar a acurácia do modelo em diferentes contextos operacionais. Ainda, sugere-se testar o método em sistemas com outras configurações de rede, como redes circulares, radiais, alimentadoras ou linhas de BRT, para verificar sua adaptabilidade e robustez frente a diferentes estruturas operacionais. Por fim, sugere-se explorar a aplicação dos dados gerados pelo método em políticas de tarifação baseada em uso, horários ou rotas, promovendo maior equilíbrio entre oferta e demanda.

REFERÊNCIAS

Arbex, R.; Cunha, C.B. Estimating the influence of crowding and travel time variability on accessibility to jobs in a large public transport network using smart card big data. Journal of Transporte Geography, v. 85, p. 102671, 2020. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102671

Chen, z.; Fan, W. Extracting Bus Transit Boarding and Alighting Information Using Smart Card Transaction Data. Journal of Public Transportation, v. 22, n. 1, p. 40–56, 2020. DOI: 10.5038/2375-0901.22.1.3

Guerra, A. L.; Barbosa, H. M.; Oliveira, L. K. Estimativa de matriz origem/destino utilizando dados do sistema de bilhetagem eletrônica: proposta metodológica. Transportes, v. 22, n. 3, p. 26–38, 2014. DOI: 10.14295/transportes.v22i3.789

Guex, G.; Loup, R.; Bavaud, F. Estimation of flow trajectories in a multi-lines transportation network. Applied Network Science, v. 8, n. 1, p. 44, 2023. DOI: 10.1007/s41109-023-00570-7.

Jenelius, E. Personalized predictive public transport crowding information with automated data sources. Transportation Research Part C, v. 117, p. 102647, 2020. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102647

Li, Y.; Cassidy, M. J. A generalized and efficient algorithm for estimating transit route ODs from passenger counts. Transportation Research Part B, v. 41, n. 1, p. 114–125, 2007. DOI: 10.1016/j.trb.2006.04.001

Özgün, K.; Günay, M.; Basaran, D.; Ledet, J. Estimation of alighting counts for public transportation vehicle occupancy levels using reverse direction boarding. Journal of Public Transportation, v. 25, p. 100070, 2023. DOI: 10.1016/j.jpubtr.2023.100070

Xue, Y.; Zhong, M.; Xue, L.; Zhang, B.; Tu, H. Tan, C.; Kong, Q.; Guan, H. Simulation Analysis of Bus Passenger Boarding and Alighting Behavior Based on Cellular Automata. Sustainability, v. 14, n. 4, p. 2429, 2022. DOI: 10.3390/su14042429

MODELAGEM DE TENDÊNCIAS E EMISSÕES EVITADAS POR SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS NO BRASIL

Bruno Rodamilans Lowe Stukart[1], **Filipe de Pádua Fernandes Silva**[1], **Leonardo Gandelman Freire**[1], **Patrícia Feitosa Bonfim Stelling**[1]
[1]Empresa de Pesquisa Energética

RESUMO
A expansão dos sistemas metroferroviários representa, no Brasil, uma das maneiras mais eficientes de evitar a emissão de gases de efeito estufa ligadas ao transporte de passageiros. Entretanto, os altos custos de investimento necessários tornam essencial a avaliação de demanda de uso e de energia para a tomada de decisões de investimentos. Este estudo tem como objetivo apresentar uma metodologia para previsões de atividade, consumo energético e emissões evitadas pelo setor. Os resultados mostram uma redução significativa de emissões em relação ao modo rodoviário, o sucesso dos sistemas de veículos leves sobre trilhos (VLT), a gradual recuperação dos sistemas de metrô, duramente impactados pela pandemia e os impactos duradouros da COVID-19 no setor. Por fim, destaca-se a importância da disponibilização de dados padronizados pelas operadoras e governos estaduais, além da colaboração com órgãos federais, autoridades civis e investidores durante a tomada de decisões sobre projetos de transporte urbano metroferroviário.

1. INTRODUÇÃO

Desde os anos de 1950, o desenvolvimento brasileiro tem estado associado à forte dependência do transporte rodoviário, com destaque para o transporte individual motorizado. Embora essa configuração tenha contribuído para o rápido crescimento econômico do País, o expressivo aumento da população urbana, a partir da segunda metade do século XX, evidenciou diversas consequências negativas dessa dependência, dentre as quais a emissão de poluentes locais e gases de efeito estufa e elevado número de acidentes com impactos no sistema de saúde nacional. Diante da grande relevância dada à mitigação das mudanças climáticas no cenário atual, o transporte ferroviário de passageiros tem um potencial de assumir um papel fundamental devido, sobretudo, à sua baixa quantidade de emissões associadas, com reflexos na segurança e saúde da população. Entretanto, os altos custos financeiros, desafios temporais e operacionais inerentes à expansão de sistemas ferroviários urbanos fazem com que investimentos no setor apresentem riscos e devam ter sua viabilidade econômico-financeira devidamente avaliada. Em vista dessas dificuldades, uma modelagem baseada em dados apresenta-se crucial para subsidiar a tomada de decisões por investidores e agentes públicos.

Um dos principais entraves à construção de modelos em escala nacional para o setor ferroviário é a baixa integração entre os dados das distintas operadoras atuantes no Brasil. Para enfrentar esse desafio, propõe-se uma metodologia voltada para a padronização das informações referentes aos sistemas metroferroviários presentes nas diversas regiões do País. Essa abordagem busca viabilizar estimativas unificadas de demanda de passageiros e de consumo energético, promovendo uma visão integrada do transporte sobre trilhos no Brasil. Através do uso desses dados, pode-se quantificar a atividade dos sistemas em âmbito nacional e, com base nas estimativas obtidas, calcular as emissões evitadas em comparação a um volume equivalente de viagens realizadas por veículos com motores a combustão interna.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada baseia-se em metodologia apresentada pela IEA (2019) e é alicerçada no cálculo da utilização das linhas ferroviárias a partir de dois indicadores-chave: a atividade anual e a intensidade de uso médio. A atividade quantifica o desenvolvimento de um sistema ferroviário e é calculada pelo produto entre o número de passageiros transportados e a distância média percorrida por cada passageiro. Esse valor é dado em milhões de passageiros-quilômetro (Mpkm) e representa um indicador chave que, por sua vez, é utilizado para calcular a intensidade de uso média de uma linha ferroviária conforme a Equação 1.

$$Intensidade = \frac{Atividade\ (Mpkm)}{Extensão\ total\ (km)} \quad (1)$$

A estimativa de demanda futura baseou-se na projeção de uma taxa anual para a evolução da intensidade de uso a partir de tendências históricas de cada sistema de transporte. A partir de projetos previstos ou em andamento divulgados por operadoras e governos regionais, o desenvolvimento da malha foi mapeado a nível nacional e, a partir disso, a atividade e o consumo energético foram estimados. A demanda de energia é dada

em toneladas equivalentes de petróleo (tep) e é calculada em função da intensidade energética (tep/Mpkm), que por sua vez, é obtida a partir dos consumos reportados por operadoras utilizadas como referência, nominalmente Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP), Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), MetrôRio, SuperVia (Trens Urbanos – RJ), VLT Carioca, Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) e Trensurb (Trens Urbanos – RS). Os dados de consumo total das companhias foram usados e, quando não disponíveis, correlações foram feitas com dados de sistemas similares. O fluxograma da Fig. 1 representa a metodologia empregada para os cálculos.

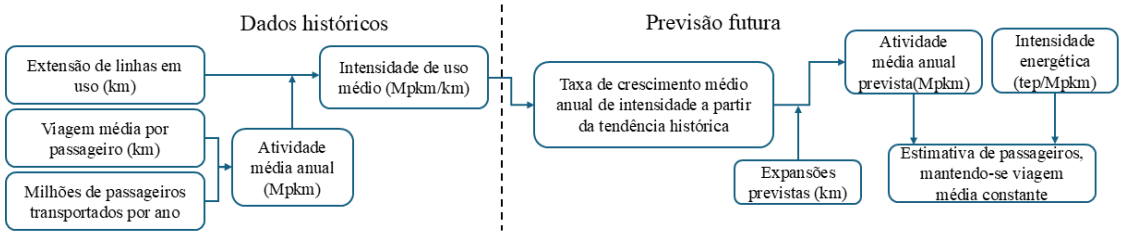


Figura 1: Fluxograma representando a metodologia empregada

Um desafio crucial neste processo é consolidar informações acerca de sistemas de transporte distintos, tendo-se em vista que os perfis de utilização variam significativamente não apenas por modo de transporte, como também por cidade ou região. De forma a contabilizar essas incertezas, a atividade média e intensidade de uso foram discriminadas em oito categorias distintas, com ênfase em sistemas de maior atividade, particularmente aquelas localizadas no Estado de São Paulo. Foram considerados o Metrô de São Paulo (CMSP), trens urbanos de São Paulo (CPTM), metrô do Rio de Janeiro, demais sistemas de metrô, trens urbanos do Rio de Janeiro (SuperVia), demais trens urbanos, VLTs de tração elétrica e veículos ferroviários urbanos a diesel. A intensidade de uso média das linhas de cada uma das categorias analisadas é apresentada na Fig. 2.

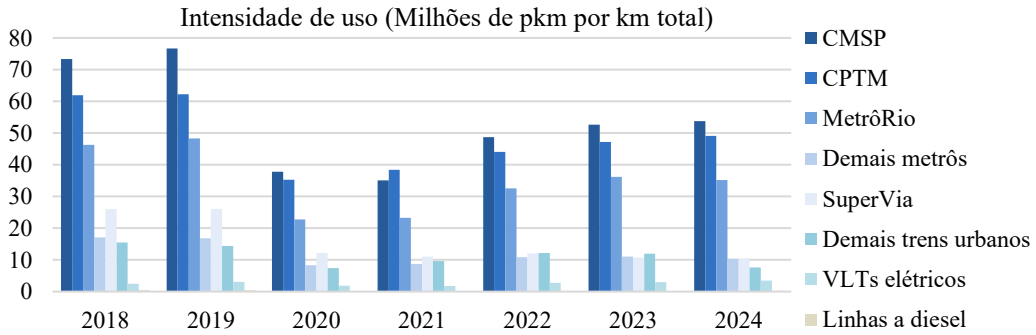


Figura 2: Intensidade de uso média estimada por sistema

Pode-se perceber que os sistemas de metrô e trens urbanos de São Paulo e, em menor grau, o metrô do Rio de Janeiro, apresentam alta intensidade de uso, o que pode ser explicado por se tratar das duas maiores metrópoles do país em termos populacionais. De maneira geral, para as demais regiões do país, os sistemas de trens urbanos apresentam menor intensidade de uso que os metropolitanos, uma vez que possuem linhas mais extensas, as quais atravessam regiões periféricas e, usualmente, menos povoadas.

Em relação ao consumo de energia, a intensidade energética também foi definida para cada uma das categorias de transporte listadas, e um fator de evolução foi estimado em função do comportamento histórico da intensidade energética em cada sistema. Para fins de precisão, uma redução gradual no consumo específico de energia foi considerada para contabilizar a implementação de medidas técnicas ou operacionais que permitam ganhos cumulativos de eficiência energética. Os valores obtidos são apresentados na Fig. 3, na qual destaca-se a alta intensidade energética das linhas a diesel. Ao longo da pandemia, o indicador para os sistemas ferroviários com uso de combustível fóssil cresceu significativamente, não aparentando existir uma tendência imediata de redução. De maneira geral, os valores notoriamente altos para esse modo são resultado do pequeno número de passageiros transportados somado à baixa eficiência energética de veículos a diesel quando comparados aos equivalentes elétricos.

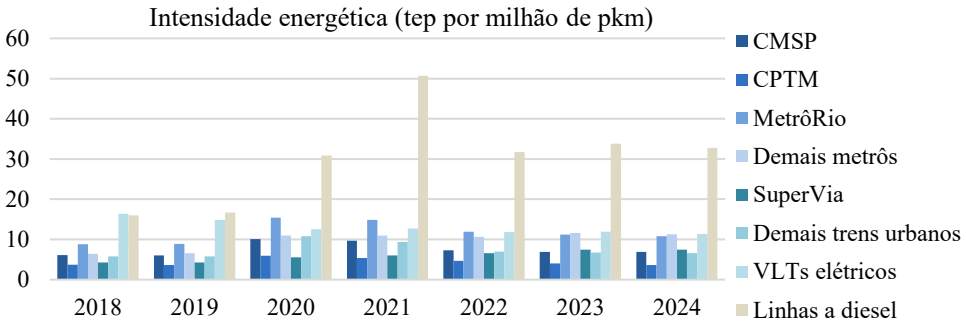


Figura 3: Intensidade energética estimada por sistema

A partir da atividade e do consumo energético, as emissões evitadas podem ser contabilizadas através da diferença entre os gases de efeito estufa emitidos pelos sistemas de transporte ferroviários analisados e as emissões médias para um modo de transporte de referência (rodoviário). Portanto, as emissões produzidas pelos trens elétricos foram estimadas usando o fator de 0,6 $tCO_2eq./tep$ (EPE, 2024), enquanto para os veículos ferroviários a diesel o fator de 2,64 $tCO_2eq./tep$ foi considerado, assumindo-se o uso de diesel B. Esses valores foram comparados com as emissões provocadas pela mesma atividade em veículos a combustão interna (automóveis e ônibus), aplicando fatores de emissões referentes ao óleo diesel B e gasolina C, equivalentes a 2,03 $tCO_2eq./tep$ e 2,64 $tCO_2eq./tep$, respectivamente. Considerou-se que o óleo diesel B possui 15% de biodiesel frente a 30% de etanol anidro na gasolina C ao longo de todo o período observado. As emissões geradas na queima de biocombustíveis foram consideradas nulas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Atividade das linhas

Utilizando a metodologia citada, foram elaboradas projeções para os próximos anos. Em relação à atividade, observou-se que a maior parte se concentra nos sistemas de metrô e trens urbanos de São Paulo, conforme apresentado na Fig. 4. Em contraste, os sistemas de metrô e trens urbanos das demais regiões apresentam participação consideravelmente inferior, enquanto a utilização de sistemas de veículos leves a tração elétrica e diesel foi pouco significativa frente aos demais. Os valores referentes aos trens regionais do Rio de Janeiro foram agrupados aos demais trens urbanos para facilitar a visualização.

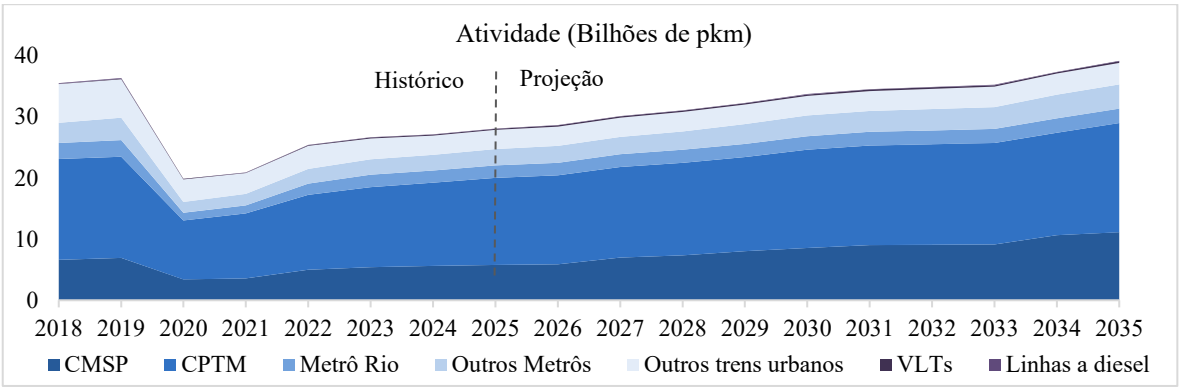


Figura 4: Distribuição da atividade de uso por sistema

Os trens urbanos sofreram queda significativa na atividade desde a pandemia, com a interrupção permanente do sistema de Salvador em 2021 e declínio no número de passageiros da SuperVia, o qual aparenta ter retomado o crescimento apenas em 2024 (Lobo, 2024). Os trens urbanos de São Paulo (CPTM) destoaram dessa tendência, tendo apresentado recuperação constante nos últimos anos, embora ainda abaixo do nível de atividade de 2019. De forma geral, os sistemas de metrô do país têm recuperado parcialmente os passageiros perdidos durante a pandemia, embora ainda estejam abaixo do patamar de 2019. Os sistemas de VLT elétricos tiveram adoção recente no Brasil, com os sistemas do Rio de Janeiro e Santos, respectivamente inaugurados em 2016 e 2017, sendo hoje seus principais representantes. Contando com diversos projetos e expansões em estudo em âmbito nacional, o VLT pode se consolidar como uma solução robusta para a mobilidade urbana na

próxima década. De maneira geral, pode-se inferir que os custos de investimento e operação relativamente baixos frente aos demais modos de transporte tornam os VLTs sistemas atrativos e resilientes, mesmo em cenários econômicos desfavoráveis. Essas observações evidenciam a sensibilidade de sistemas ferroviários de passageiros a impactos sociais e econômicos que afetem a atividade de transporte. Nos próximos dez anos, espera-se que a atividade evolua em taxas a de 3,4% a.a., alavancado pelo metropolitano de São Paulo, que deve crescer em taxas de cerca de 6,8% no período, devido às obras de expansão em andamento e previstas para o sistema. Espera-se também crescimento significativo para os trens urbanos de São Paulo e para o metrô de Fortaleza, o qual apresenta tendência de crescimento com a entrada em operação da linha leste. Espera-se expansão dos sistemas de VLT em taxas também de 6,8% a.a., com a entrada em operação prevista para o sistema de Salvador nos próximos anos (Secretaria de Comunicação Social da Bahia, 2025).

3.2. Consumo de energia

Conforme metodologia ilustrada na Fig. 1, foi estimado o consumo de energia total do modo metroferroviário no Brasil foi estimado. Em relação à atividade, a demanda energética do setor sofre variações menos significativas, o que pode ser explicado pela necessidade do sistema de permanecer em operação mesmo durante períodos de pouca atividade. No longo prazo, espera-se que ganhos de eficiência amortizem o consumo energético para uma mesma quantidade de viagens realizadas.

Prevê-se crescimentos de consumo energético a nível nacional em taxas de 2,9% a.a. no setor, em função das expansões previstas, com o consumo de energia acompanhando o aumento na atividade, ainda que a taxas inferiores devido a ganhos na eficiência energética. Dessa forma, o metrô de São Paulo e os sistemas de VLT devem impulsionar o crescimento com taxas de 6,2% e 5,8%, respectivamente. Em relação ao consumo total de energia, os sistemas paulistanos demonstram boa eficiência operacional, o que pode ser atribuído à concentração populacional na metrópole; o maior poder aquisitivo *per capita* frente a outras regiões, possibilitando maior facilidade de deslocamento; e a maior abrangência e cobertura territorial da rede férrea, fatores que podem inviabilizar a obtenção de resultados semelhantes em outras regiões do País. Os trens da SuperVia foram agregados aos demais trens urbanos do país na Fig. 5.

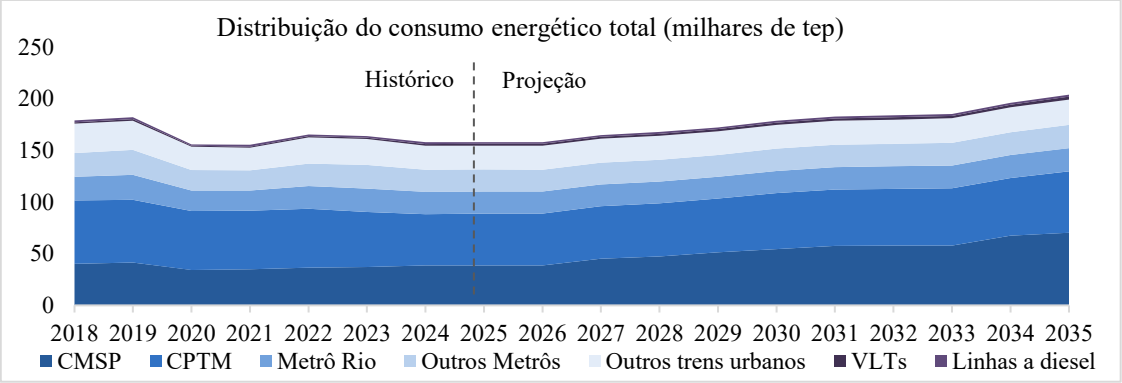


Figura 5: Consumo de energia distribuídos entre os sistemas estudados

3.3. Emissões evitadas

A partir do consumo energético estimado para a malha ferroviária nacional e dos fatores de emissão para cada combustível, foram calculadas as emissões evitadas pelo transporte metroferroviário em relação a dois cenários distintos: um em que a atividade é substituída pelo uso de ônibus, e outro em que é inteiramente substituída por automóveis. Estas projeções foram estimadas com base nas médias históricas para atividade e na intensidade energética de cada um desses modos.

Segundo a Pesquisa Origem-Destino 2023 da CMSP, cerca de 90% das viagens de trem e metrô na região metropolitana de São Paulo tiveram como motivo trabalho, educação ou saúde, com os 10% restantes sendo referentes a compras, lazer e assuntos pessoais (Metrô de São Paulo, 2025). Como essas atividades geralmente não podem ser facilmente substituídas por atividades locais, é razoável supor que a maior parte desses deslocamentos ocorreria através de outros modos motorizados caso o sistema metroferroviário não estivesse disponível. Nos dois anos anteriores à pandemia, foram evitadas cerca de 1 tCO_2eq. por ano em relação ao uso de ônibus, enquanto 2,88 $MtCO_2eq$. e 2,94 $MtCO_2eq$. foram evitadas em 2018 e 2019, respectivamente, quando comparados ao transporte individual. Em 2020 e 2021, a diferença entre os dois cenários de referência diminuiu

significativamente. Isso porque os abatimentos relativos a automóveis sofreram redução, enquanto os relativos aos ônibus aumentaram. Esse comportamento se explica porque, embora o número total de passageiros tenha se reduzido, a intensidade energética dos ônibus aumentou devido à operação com níveis de ocupação reduzidos no período. A partir das premissas e hipóteses adotadas, as curvas referentes às emissões evitadas nos dois cenários podem ser observadas na Fig. 6.

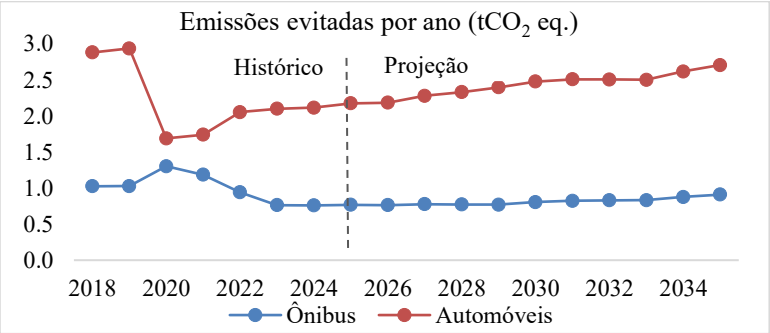


Figura 6: Previsão de emissões anuais evitadas pelo transporte metroferroviário em relação a outros modos de transporte

Assim como no histórico, as emissões evitadas substituindo o transporte rodoviário individual representam mais que o dobro das emissões evitadas quando comparada à migração de passageiros do ônibus para o modo ferroviário. Em 2030, as emissões evitadas seriam da ordem de 0,81 MtCO2eq. em relação aos ônibus e de 2,48 MtCO2eq. em relação ao cenário de substituição de automóveis.

4. CONCLUSÃO

Esse estudo possui o objetivo de apresentar a implementação, no contexto brasileiro, de uma metodologia internacionalmente consolidada para a previsão da demanda energética e do número de passageiros em redes ferroviárias urbanas. A partir dessa modelagem, quantificaram-se as emissões de CO_2 evitadas por esse modo de transporte quando comparado a alternativas rodoviárias. A abordagem evidenciou a necessidade de maior integração dos dados estaduais, de forma a viabilizar sua padronização para estudos a nível nacional, enquanto, em relação ao impacto ambiental, destaca-se a mitigação de emissões de CO_2, com reduções de aproximadamente 1 milhão de toneladas por ano quando comparado ao transporte por ônibus, e de 2,5 milhões de toneladas em relação ao uso de automóveis a combustão interna. Para estudos futuros, pode-se aprofundar no detalhamento das especificidades de cada sistema metroferroviário regional, favorecendo a identificação de desafios locais e o desenvolvimento de soluções direcionadas. Por fim, a incorporação das emissões de escopo três (associadas aos diferentes modos de transporte) seria essencial para o aprimoramento das estimativas de emissões evitadas pelo transporte sobre trilhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Empresa de Pesquisa Energética. (2024). *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf

International Energy Agency. (2019). *The future of rail: Opportunities for energy and the environment*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail

Lobo, R. (2024, 11 de abril). *Após anos de queda, SuperVia volta a ter aumento no número de passageiros*. Via Trolebus. https://viatrolebus.com.br/2024/04/apos-anos-de-queda-supervia-volta-a-ter-aumento-no-numero-de-passageiros/

Metrô de São Paulo. (2025). *Pesquisa Origem e Destino 2023: relatório síntese*. Companhia do Metropolitano de São Paulo. Portal da Transparência do Metrô de São Paulo

Secretaria de Comunicação Social da Bahia. (2025). *Obras do VLT de Salvador atingem 18% de execução e mantêm ritmo acelerado*. Governo do Estado da Bahia. https://www.ba.gov.br/comunicacao/noticias/2025-04/367785/obras-do-vlt-de-salvador-atingem-18-de-execucao-e-mantem-ritmo-acelerado

Bruno Rodamilans Lowe Stukart (bruno.stukart@epe.gov.br)
Filipe de Pádua Fernandes Silva (filipe.silva@epe.gov.br)
Leonardo Gandelman Freire (leonardo.freire@epe.gov.br)
Patrícia Feitosa Bonfim Stelling (patricia.stelling@epe.gov.br)
Empresa de Pesquisa Energética, Endereço físico (Praça Pio X, 54 - Centro, Rio de Janeiro - RJ, 20091-040)

MODELOS COMPUTACIONAIS DE APOIO À DECISÃO NO ATENDIMENTO PRÉ-HOSPITALAR

Luís Felipe Pereira Barroso[1], **Gildenor de Souza Amorim Cavalcante**[1], **Maria José Pereira Dantas**[1]
[1]Pontifícia Universidade Católica de Goiás

RESUMO
Este estudo teve como objetivo aplicar e avaliar modelos computacionais para otimizar o despacho e a realocação de ambulâncias em Serviços Médicos de Emergência, visando reduzir os tempos de resposta. Primeiro, o problema foi formulado como um modelo de Programação Inteira Mista (MIP) e comparado a heurísticas (Algoritmo Genético e *Pilot Method*) e a uma política tradicional (ambulância mais próxima), utilizando um cenário de simulação para a cidade de Goiânia. Os resultados indicam que o modelo MIP oferece o melhor desempenho operacional em cenários de até 1.500 chamados, com os menores tempos de resposta. Em contrapartida, a heurística *Pilot* se mostrou uma alternativa computacionalmente mais rápida e viável para decisões em tempo real. O significado do estudo reside na demonstração de que a integração do despacho com a realocação proativa melhora a robustez do sistema de atendimento pré-hospitalar, evidenciando o conflito entre a otimalidade da solução e o tempo computacional.

1. INTRODUÇÃO

O Atendimento Pré-Hospitalar (APH) é definido como o conjunto de cuidados médicos emergenciais prestados a uma vítima antes de sua chegada a um hospital, sendo um fator crítico para aumentar as chances de sobrevivência e recuperação (Hospital Israelita Albert Einstein, 2023). A crescente demanda por esses serviços, como os oferecidos pelo Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU), pressiona a eficiência do sistema. Dados apontam um aumento de 28,5% nos procedimentos do SAMU entre 2015 e 2019, um crescimento desproporcional ao aumento da população coberta no mesmo período, que cresceu 9,7% (Malvestio e Sousa, 2024). Esse cenário agrava um desafio central: o tempo de resposta, cuja redução está diretamente associada a maiores taxas de sobrevivência (Byrne *et al.*, 2019; Stoesser *et al.*, 2021).

A eficiência de um Serviço Médico de Emergência (SME) depende de decisões complexas em níveis estratégico, tático e operacional (Bélanger *et al.*, 2019). Dentre as decisões mais críticas estão o despacho, que é a seleção da ambulância para um chamado, e a realocação, que consiste no reposicionamento estratégico das unidades ociosas para otimizar a cobertura e futuros atendimentos (Carvalho *et al.*, 2020). Tradicionalmente, a decisão de despacho se baseia na proximidade geográfica, uma abordagem que nem sempre garante a otimização do sistema como um todo (Jagtenberg *et al.*, 2017). A gestão de recursos exige, portanto, a adoção de uma política de preparação, que envolve o posicionamento prévio das ambulâncias para assegurar uma capacidade de resposta adequada em todas as regiões atendidas (Lee, 2017).

A simplicidade dos métodos tradicionais justifica a busca por alternativas mais robustas. Diante disso, este trabalho aborda a seguinte questão de pesquisa: Como aplicar modelos computacionais para auxiliar a tomada de decisão no despacho e realocação das ambulâncias em um Serviço Médico de Emergência? Para responder a essa questão, o objetivo deste estudo é aplicar e avaliar modelos computacionais que auxiliem na tomada de decisão para despacho e realocação de ambulâncias em um SME, com foco na otimização dos tempos de resposta. Como objetivos específicos têm-se:

- Realizar uma revisão da literatura sobre abordagens computacionais para APH.
- Modelar algoritmos de despacho baseados em múltiplos critérios.
- Propor mecanismos de realocação estratégica considerando a previsão de demanda e políticas de preparação.
- Simular e comparar o desempenho dos modelos propostos com os métodos tradicionais.

2. MÉTODO

2.1. Formulação do problema

O modelo de otimização para o despacho e realocação de ambulâncias é formulado como um problema de Programação Inteira Mista (MIP). A formulação a seguir é uma adaptação do modelo proposto por Carvalho *et al.* O objetivo é minimizar um custo agregado que considera a qualidade da resposta às emergências atuais e a preparação para chamadas futuras.

2.1.1. Conjuntos e Índices

- I: conjunto de ambulâncias livres ($i \in I$).
- E: conjunto de emergências ($j \in E$).
- B: conjunto de bases ($l \in B$).
- Q: conjunto de zonas ($q \in Q$).

2.1.2. Parâmetros

- d_{ij}, d_{il}: Tempo de viagem da ambulância i para a emergência j e para base l, respectivamente.
- d'_{lq}: Tempo de viagem da base l para o centroide da zona q.
- λ_q: Demanda futura esperada na zona q.
- B_i: Base original da ambulância i.
- R_{MAX}: Limite de tempo de resposta desejado.
- π_{resp}, π_{unc}, π_{move}: Custos de penalidade por atraso, não cobertura de emergência e realocação.
- N_{MAX}: Número máximo de realocações permitidas.
- M: Coeficiente de penalidade "Big-M".

2.1.3. Variáveis de decisão

- $x_{ij} \in \{0,1\}$: 1 se a ambulância i atende à emergência j.
- $y_{il} \in \{0,1\}$: 1 se a ambulância i é posicionada na base l.
- $u_j \in \{0,1\}$: 1 se a emergência j não for atendida.
- $r_j \geq 0$: Atraso no tempo de resposta para a emergência j.
- $z_i \in \{0,1\}$: se a ambulância i for realocada.
- $v_l \in \{0,1\}$: 1 se a base l estiver ocupada.
- $z_q \geq 0$: Distância mínima de uma base ocupada à zona q.
- $w_q \in \{0,1\}$: 1 se a zona q for inalcançável.
- $\delta_{lq} \in \{0,1\}$: Variável auxiliar para selecionar a base mais próxima da zona q.

2.1.4. Modelo matemático

A função objetivo (eq. 1) minimiza a soma do custo de preparação para o futuro, o custo de resposta atual e as penalidades por atrasos, emergências não cobertas e realocações.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I, j \in E} d_{ij}\, x_{ij} + \pi_{resp} \sum_{j \in E} r_j + \pi_{unc} \sum_{j \in E} u_j + \pi_{move} \sum_{i \in I} z_i + \sum_{q \in Q} \lambda_q (z_q + M w_q) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in E} x_{ij} + \sum_{l \in B} y_{il} = 1 \qquad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} + u_j = 1 \qquad \forall j \in E \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} d_{ij}\, x_{ij} \leq R_{MAX} + r_j + M_{uj} \qquad \forall j \in E \quad (4)$$

$$z_i = \sum_{l \in B, l \neq B_i} y_{il} \qquad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} z_i \leq N_{MAX} \quad (6)$$

$$v_l \leq \sum_{i \in I} y_{il} \leq |I| \cdot v_l \qquad \forall l \in B \quad (7)$$

$$\sum_{l \in B} \delta_{lq} + w_q = 1 \qquad \forall q \in Q \quad (8)$$

$$\delta_{lq} \leq v_l \qquad \forall l \in B, q \in Q \quad (9)$$

$$z_q = \sum_{l \in B} d'_{lq}\, \delta_{lq} \qquad \forall q \in Q \qquad (10)$$

A restrição (2) garante que cada ambulância seja despachada ou realocada. A restrição (3) assegura que cada emergência seja atendida ou marcada como não coberta. A restrição (4) mede o atraso no tempo de resposta, usando um termo Big-M para desativá-la caso a emergência não seja coberta. As restrições (5) e (6) controlam a realocação, identificando quando uma ambulância muda de base e limitando o número total de movimentações. A restrição (7) ativa a variável v_l se a base l for ocupada. Finalmente, o conjunto de restrições (8)-(10) calcula o custo de preparação, garantindo que z_q represente o tempo de viagem da zona q para a base ocupada ($v_l = 1$) mais próxima, enquanto w_q identifica zonas inalcançáveis.

2.2. Heurísticas de Otimização

Para obter soluções rápidas, foram implementadas e avaliadas heurísticas que operam em duas fases sequenciais: despacho e realocação. Esta abordagem permite tomar decisões operacionais complexas em um tempo computacional compatível com aplicações em tempo real.

A primeira fase trata do despacho, onde se decide qual ambulância atenderá a cada emergência. Foram contrastadas duas políticas: uma que envia a ambulância mais próxima em tempo de viagem (*Closest)*, simulando uma estratégia não otimizada; e uma estratégia otimizada baseada em preparação. Esta última seleciona a ambulância que, ao ser despachada, causa o menor impacto negativo no custo de preparação do sistema – uma métrica que representa a distância ponderada pela demanda às zonas de atendimento, priorizando assim a capacidade de resposta futura.

A segunda fase consiste na realocação proativa das ambulâncias que permaneceram ociosas, visando melhorar a cobertura para a próxima janela de tempo, que será contrastado com a política de enviar a ambulância de volta para sua base de origem, sem passar por realocações (*Home-Base)*. Para esta tarefa, duas abordagens foram comparadas:

- O *Pilot Method*, adaptado de Carvalho *et al.* (2020), funciona como uma busca local iterativa. A cada passo, ele avalia todas as possíveis realocações individuais e aplica aquela que resulta na maior redução do Custo de Preparação, repetindo o processo até que nenhuma melhoria seja possível.
- Um Algoritmo Genético (GA), meta-heurística adaptada de Lambora *et al.* (2019) para este trabalho. Nesta abordagem, uma solução é representada por um vetor (cromossomo) que define a base de destino para cada ambulância ociosa. A qualidade (aptidão) de cada solução é avaliada por uma função que minimiza o Custo de Preparação, ao mesmo tempo em que penaliza o número de movimentações para evitar instabilidade na frota.

2.3. Coleta e preparação de dados

A simulação considerou a cidade de Goiânia, onde as coordenadas geográficas de 33 bases de ambulâncias foram extraídas de dados públicos do DataSUS, enquanto 399 bairros foram mapeados para servirem como zonas de demanda. As matrizes estáticas de tempo de viagem (d_{il}, d_{iq}) foram obtidas com a *API openrouteservice*, que usa a malha viária real para estimar os tempos de viagem (em segundos). Por serem estáticas, refletem deslocamentos médios e não capturam a variabilidade horária típica do tráfego urbano.

Diferente de outros estudos, a demanda foi modelada a partir de dados demográficos locais. O vetor λ_q, usado no cálculo da preparação do sistema, foi definido de forma proporcional à população de cada um dos 399 bairros. De maneira análoga, o fluxo de chamados de emergência foi gerado seguindo a distribuição populacional das 7 zonas administrativas de Goiânia, concentrando os eventos nas áreas mais populosas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foi comparado o modelo proposto às quatro políticas-referência – despachar a ambulância mais próxima e mantê-la em sua base de origem, do inglês *Closest*/*Home-Base* (C/HB), *Pilot* e GA (meta-heurísticas) e Programação Inteira Mista (MIP) – em quatro cenários que variam a carga de chamadas em 24 horas ($500 \rightarrow 2\,500$) com janelas de 5 minutos. Os experimentos foram feitos em um *notebook* com processador Intel Core i5-10210U (4 núcleos, 8 threads, até 4.2GHz), 8GB de RAM, sistema operacional Windows 11 Home. A implantação foi feita em Python 3.11.5.

3.1. Análise Comparativa dos Métodos

A Tabela 1 consolida os resultados obtidos para cada método nos diferentes cenários. A análise subsequente detalha a performance de cada abordagem em relação aos indicadores de desempenho mais relevantes: tempo de resposta (*mean_rt*), movimentações (*moves*), custo de preparação do sistema (*prep_avg*), tempo computacional (*cpu_avg*) e porcentagem de chamados respondidos antes de 8 minutos ($\% \leq 8\,min$).

Tabela 1: Comparativo de desempenho dos métodos por cenário

Cenário	Método	mean_rt (s)	moves	prep_avg	cpu_avg (s)	% ≤ 8 min
500	C/HB	752.58	0	2 649	0.00	31 %
	MIP	**713.72**	22	**2 395**	10.70	**33 %**
	GA	1 334.68	2	2 399	0.16	11 %
	Pilot	1 355.47	206	2 399	0.12	9 %
1000	C/HB	749.29	0	3 307	0.00	31 %
	MIP	**699.12**	70	**2 795**	12.94	**34 %**
	GA	1 320.17	147	2 861	0.19	11 %
	Pilot	1 340.09	244	2 875	0.09	11 %
1500	C/HB	769.29	0	3 878	0.00	30 %
	MIP	**696.08**	183	**2 904**	13.81	**34 %**
	GA	1 332.42	137	56 917	0.16	10 %
	Pilot	1 343.64	341	56 903	0.07	9 %
2500	C/HB	**934.79**	0	**118 642**	0.00	15 %
	MIP	1 061.77	205	119 121	14.24	**16 %**
	GA	1 364.09	48	159 061	0.06	3 %
	Pilot	1 350.98	94	161 079	0.03	3 %

3.1.1. Qualidade da resposta

Para todos os cenários até 1 500 chamados o MIP apresentou o menor tempo médio de resposta e a maior proporção de atendimentos dentro da meta de 8 min, confirmando o ganho já observado por Carvalho *et al.* (2020) quando se utiliza a política de preparação durante o despacho.

No cenário extremo (2 500 chamados) o baseline C/HB manteve o menor mean_rt, mas sem qualquer realocação, revelou limitação de escalabilidade: apenas 15 % dos chamados cumpriram o alvo de 8 min, contra 16 % do MIP.

3.1.2. Custos de preparação e realocação

O custo médio de preparação é significativamente menor nas abordagens que consideram explicitamente essa parcela na função-objetivo (MIP, GA, *Pilot*). Entretanto, o *Pilot* e o GA requerem muitas mudanças de base em cenários leves (500–1 000 chamadas), enquanto o MIP realiza realocações mais parcimoniosas, sugerindo melhor relação custo–benefício.

3.1.3. Desempenho computacional

Os heurísticos GA e principalmente *Pilot* resolvem cada janela em frações de segundo, independentemente da carga. O MIP manteve tempo inferior a 15 s por janela, o que ainda é aceitável para estudos em lote, mas pode ser inviável para tomada de decisão on-line conforme a demanda cresce.

3.2. Efeito do aumento de demanda

Conforme o volume de chamadas aumentam o tempo de resposta que tende a crescer em todos os métodos, mas de forma mais acentuada nos heurísticos GA e *Pilot*, e as movimentações, sobretudo no MIP – estratégia que explora relocação proativa para compensar a sobrecarga.

Esses resultados reforçam a conclusão de Carvalho *et al.* (2020) de que integrar despacho e relocação com uma métrica de preparação melhora a robustez do sistema, mas revela um trade-off entre performance operacional e esforço computacional.

3.3. Síntese dos achados

Até 1 500 chamadas, o MIP entrega os melhores tempos de resposta e maior percentual ≤ 8 min, mas com maior custo computacional. O *Pilot* quase iguala o MIP em qualidade, resolve instantaneamente e, apesar de mais realocações, é a escolha prática quando TI ou tempo de decisão são restritos. O GA fica em posição intermediária, e o *baseline* C/HB só se destaca em cargas extremas, quando evitar deslocamentos adicionais é relativamente vantajoso, mas com baixa taxa de cumprimento da meta de oito minutos.

4. CONCLUSÕES

Este estudo comparou quatro políticas de despacho-realocação em serviços de APH. O MIP ofereceu melhor desempenho até 1 500 chamados, enquanto o *Pilot* surge como alternativa mais leve para decisões em tempo real. O GA mostrou desempenho intermediário, e o baseline C/HB apenas em cenários extremos. Esses resultados sugerem que integrar realocação proativa com métrica de preparação aumenta a cobertura sem onerar excessivamente o sistema, desde que haja poder computacional suficiente.

Como limitações, todo o experimento utilizou demandas simuladas, pois não foi encontrado dados históricos de chamados para Goiânia; também se fixou uma única janela de 5 min e uma malha viária média. Trabalhos futuros podem incorporar dados reais, testar outras cidades e janelas variáveis, além de explorar modelos de machine learning para prever a demanda futura e alimentar em tempo real os algoritmos de realocação, permitindo ajustes mais precisos ao perfil de chamadas esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrew, E.; Z. Nehme; P. Cameron, e S. K. (2020) Drivers of Increasing Emergency Ambulance Demand. *Prehospital Emergency Care*, *24*(3), 385–393. DOI:10.1080/10903127.2019.1635670

Bélanger, V.; A. Ruiz; e P. Soriano. (2019) Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles. *European Journal of Operational Research*, *272*(1), 1–23. DOI:10.1016/j.ejor.2018.02.055

Byrne, J. P.; N. C. Mann; M. Dai; S. A. Mason; P. Karanicolas; S. Rizoli; e A. B. Nathens. (2019) Association between emergency medical service response time and motor vehicle crash mortality in the United States. *JAMA surgery*, *154*(4), 286–293. DOI:10.1001/jamasurg.2018.5097

Carvalho, A. S.; M. E. Captivo e I. Marques. (2020) Integrating the ambulance dispatching and relocation problems to maximize system's preparedness. *European Journal of Operational Research*, *283*(3), 1064–1080. DOI:10.1016/j.ejor.2019.11.056

Hospital Israelita Albert Einstein. (2023) Qual a importância do atendimento pré-hospitalar? Disponível em: https://vidasaudavel.einstein.br/qual-a-importancia-do-atendimento-pre-hospitalar/ (acesso em 22/05/2025)

Jagtenberg, C. J.; S. Bhulai e R. D. van der Mei. (2017b) Dynamic ambulance dispatching: is the closest-idle policy always optimal? *Health care management science*, *20*, 517–531. DOI:10.1007/s10729-016-9368-0

Lambora, A., K. Gupta e K. Chopra. (2019) Genetic Algorithm- A Literature Review. *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)* (p. 380–384). Apresentado em 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon). DOI:10.1109/COMITCon.2019.8862255

Lee, S. (2017) A new preparedness policy for EMS logistics. *Health care management science*, *20*, 105–114. DOI:10.1007/s10729-015-9340-4

Malvestio, M. A. A. e R. M. C. de Sousa. (2024) Produção de procedimentos pelo SAMU 192 no Brasil: performance, \emphbenchmarking e desafios. *Ciência & Saúde Coletiva*, *29*(1), e18482022. DOI:10.1590/1413-81232024291.18482022

Stoesser, C. E.; J. J. Boutilier; C. L. F. Sun; S. C. Brooks; S. Cheskes; K. N. Dainty; M. K. Feldman; T. D.; S. Lin; L. J. Morrison; D. C. Scales e T. C. Y. Chan. (2021) Moderating effects of out-of-hospital cardiac arrest characteristics on the association between EMS response time and survival. *Resuscitation*, *169*, 31–38. DOI:10.1016/j.resuscitation.2021.10.014

Luís Felipe Pereira Barroso (20212003300183@pucgo.edu.br)
Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola Politécnica e de Artes, Praça Universitária, 2-102, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO, Brasil
Gildenor de Souza Amorim Cavalcante (gildenor.souza@gmail.com)
Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola Politécnica e de Artes, Praça Universitária, 2-102, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO, Brasil
Maria José Pereira Dantas (mjdantas@pucgoias.edu.br)
Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola Politécnica e de Artes, Praça Universitária, 2-102, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO, Brasil

SUBSTITUIÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO PELO RIDESOURCING: UMA ANÁLISE SOBRE A MOBILIDADE URBANA DE JOÃO PESSOA

Fabrícia Rodrigues Pereira, Camila Gonçalves Luz Nunes, Pablo Brilhante de Sousa
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

RESUMO
Este estudo teve como objetivo analisar o efeito de substituição do Transporte Público (TP) pelos serviços de *ridesourcing*, com ênfase nas modalidades por carro e por motocicleta, em João Pessoa. Utilizou-se um questionário com seções de Preferência Revelada (PR) e Preferência Declarada (PD), aplicado a usuários de TP e de *ridesourcing*. Os dados coletados foram analisados por meio do modelo Logit Multinomial (MNL), com atributos definidos a partir do algoritmo CART. Dessa forma, os resultados obtidos indicaram que o *ridesourcing* por moto tem se tornado uma alternativa frequente ao TP, especialmente entre usuários de baixa renda e com propósitos de viagem relacionados ao cotidiano, sendo a escolha modal fortemente influenciada por fatores como conforto, preço, segurança e qualidade do serviço. Portanto, o estudo destaca a necessidade de melhorias no TP para conter a migração a modos menos seguros e socialmente onerosos.

1. INTRODUÇÃO

O surgimento dos serviços de *ridesourcing*, caracterizados pela solicitação de viagens por meio de aplicativos, tem provocado uma mudança disruptiva no transporte urbano. Isso se deve, principalmente, à ampla adesão desses serviços por usuários do Transporte Público (TP), somada à recente introdução da motocicleta como uma opção modal mais acessível. Sob essa ótica, conforme a linha de estudo de Irawan et al. (2019), embora o uso da motocicleta no contexto do *ridesourcing* demonstre estar fortemente ligada à complementação do TP, é inevitável reconhecer que sua atuação pode ser altamente ameaçadora para substituí-lo, tendo em vista, estudos desenvolvidos na Indonésia, os quais apontam que o principal objetivo da viagem usando o *ridesourcing* baseado em moto é para trabalho, com uma pequena parcela usada para atividades discricionárias (Muchlisin et al., 2024; Irawan et al., 2019b; Suatmadi et al., 2019). No entanto, apesar do uso da motocicleta ter se tornado uma solução recorrente nos últimos tempos, especialmente entre as camadas mais vulneráveis, é importante frisar que seu custo social é elevado, refletido no aumento de acidentes, lesões e mortes no trânsito (Irawan et al., 2019; Vasconcellos, 2013).

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar o efeito de substituição do *ridesourcing* em relação ao transporte público (TP), com base no contexto da cidade de João Pessoa, com foco no comportamento da mobilidade urbana diante da recente inserção da motocicleta nesse cenário. Para isso, usuários de TP e de serviços de *ridesourcing* (carro e moto) responderam a um questionário composto por seções de Preferência Revelada (PR) e Preferência Declarada (PD). Os dados obtidos foram utilizados para estimar um modelo Logit Multinomial (MNL), que possibilitou identificar as variáveis que influenciam a substituição do TP pelos serviços de *ridesourcing*. Os resultados visam oferecer subsídios para a tomada de decisão no campo da mobilidade urbana.

2. MÉTODO DE TRABALHO

A Figura 1 apresenta as etapas metodológicas deste trabalho. Inicialmente, elaborou-se um questionário com seções de Preferência Revelada (PR) e Preferência Declarada (PD). A seção de PR abordou o comportamento de viagem dos usuários de TP, enquanto a de PD apresentou cenários com as opções: TP, *ridesourcing* por carro e por moto. Os atributos dessas alternativas foram definidos com base na literatura, e seus níveis determinados qualitativamente e quantitativamente, sendo estes últimos obtidos por meio do algoritmo CART *(Classification and Regression Tree*). Com os atributos e níveis estabelecidos, foi construído o projeto experimental utilizando o método Fatorial Completo (*Full Factorial*).

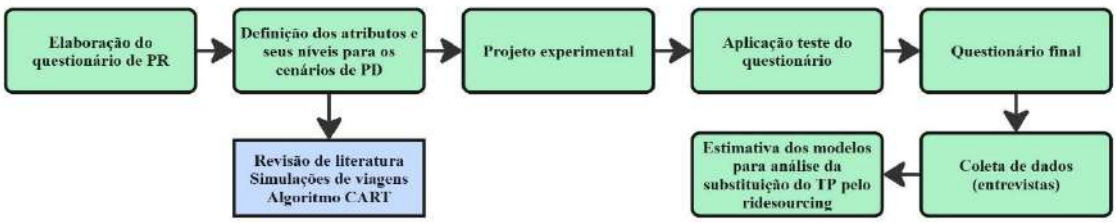


Figura 1: Representação do fluxograma metodológico

2.1. Preferência Revelada (PR)

O questionário de Preferência Revelada (PR) foi dividido em seis seções: 1) Perfil socioeconômico; 2) Utilização do *ridesourcing*; 3) Uso do *ridesourcing* por carro; 4) Uso do *ridesourcing* por moto; 5) Avaliação da qualidade do transporte público (TP); e 6) Viagem mais frequente. Elaborado no Google Forms, contou com perguntas condicionais que direcionavam os respondentes com base em suas respostas.

2.2. Preferência Declarada (PD)

Nesta seção, foram apresentados cenários hipotéticos nos quais os respondentes indicaram sua preferência entre transporte público (TP), *ridesourcing* por carro e por moto. O objetivo foi avaliar o efeito substitutivo do *ridesourcing* sobre o TP, com base em atributos que influenciam a escolha modal, como conforto, tempo e preço de viagem (Rayle et al., 2016; Sá, 2020). O conforto foi definido qualitativamente ("sentado" ou "em pé"), enquanto o tempo e o preço foram definidos quantitativamente, com base nas viagens mais frequentes dos respondentes. Quanto ao *ridesourcing*, para as modalidades carro e moto, foram determinados níveis realistas para os atributos "preço" e "tempo de viagem". Os atributos foram estimados a partir de 189 simulações realizadas via Google Maps, utilizando origem e destino gerados com base na matriz O/D de João Pessoa (JOÃO PESSOA, 2014). A análise dos dados foi feita por meio do algoritmo CART (Árvore de Decisão), semelhante ao procedimento de Sá (2020), com uso do software R (pacote *Rpart*). A distância foi usada como variável independente e o preço como dependente. Desse modo, estabeleceu-se um limite para a distância nos cenários de PD e a árvore gerada definiu os níveis para o atributo "preço" do *ridesourcing* (carro) para duas faixas de distâncias. Os níveis de tempo de viagem e preço do *ridesourcing* por moto foram obtidos pela média dos valores em cada nó terminal da árvore. Com os atributos e níveis definidos, foi construído o projeto experimental com base no fatorial completo, conforme a Equação 1:

$$C = N^A \quad (1)$$

C: quantidade de cenários; N: quantidade de níveis dos atributos; e A: quantidade de atributos

O questionário foi submetido ao Comitê de Ética da UFPB para aprovação da aplicação e foi previamente aplicado aos alunos da disciplina de Análise de Sistemas de Transporte da UFPB, sem que esses tivessem conhecimento precedente acerca do seu conteúdo, com o intuito de analisar apenas a clareza das perguntas. É importante destacar que as respostas da turma não foram consideradas na calibração do modelo, tendo em vista seu caráter voltado somente para possíveis adequações das perguntas para melhor entendimento dos respondentes. Posteriormente, ele foi aplicado de forma presencial, através de entrevistas, em locais com grande circulação de usuários de TP, como terminais de integração e paradas próximas a shoppings e à UFPB, entre março e maio de 2025, destacando que nenhum entrevistado relatou problemas em relação ao entendimento do questionário, ou deixou de respondê-lo por essa falha na compreensão. Sequencialmente, os dados foram utilizados para estimar o modelo Logit Multinomial (MNL), permitindo analisar o impacto dos atributos na substituição do TP pelo *ridesourcing* (carro e moto).

3. RESULTADOS

Foram obtidas 286 respostas válidas a partir das aplicações presenciais e após a filtragem no banco de dados obtido para retirada de inconsistências. De acordo com os resultados da seção de PR, quanto ao perfil socioeconômico dos usuários, a maior parte das pessoas entrevistadas são do sexo feminino (57,49%) com uma faixa etária entre 18 a 25 anos (49,48%), estudaram no mínimo até o ensino médio (34,84%) e possuem uma faixa de renda mensal de até 1 salário mínimo (49%.) Além disso, boa parte dos entrevistados possuem desconto de 50% na tarifa do ônibus (47,39%), mas, grande parte relatou não possuir nenhum (43,21%), pagando o valor integral do TP (R$ 5,20). Paralelamente, no que concerne à posse de automóveis, a maioria relatou não possuir nenhum automóvel em casa (56,79%), ou pelo menos um (29,27%). Quanto aos principais propósitos de viagem associados ao *ridesourcing* por motocicleta, estes estão diretamente relacionados ao trabalho (39,15%) e ao estudo (31,22%), totalizando 70,37% das viagens voltadas para atividades do cotidiano. Esses dados estão em consonância com a literatura, pois reforçam a associação do *ridesourcing* por motocicleta às atividades rotineiras dos usuários (Muchlisin et al., 2024; Irawan et al., 2019b; Suatmadi et al., 2019), fortalecendo a hipótese de que esse modo vem se tornando mais competitivo em relação ao transporte público, uma vez que ambos são utilizados para finalidades semelhantes. Além disso, nesta pesquisa, o "lazer" aparece

como um propósito de viagem mais expressivo na modalidade por carro (30,15%), em contraste com a modalidade por motocicleta, na qual esse percentual é de apenas (10,69%). Esse resultado, segundo Benita (2023), é coerente, considerando que os modos baseados em automóvel são frequentemente utilizados para atividades recreativas e sociais. Quanto ao modo de transporte que seria utilizado caso o *ridesourcing* por motocicleta não estivesse disponível, observou-se uma maior propensão ao uso do TP (61,90%), seguido pelo *ridesourcing* por carro (25,40%). Por outro lado, na hipótese de indisponibilidade do *ridesourcing* por carro, os modos mais mencionados foram o TP (45,41%) e o *ridesourcing* por motocicleta (36,64%). Nota-se, portanto, que a substituição do TP pelo *ridesourcing* tem sido crescente, sobretudo, em relação à sua modalidade por moto, haja vista percentuais muito próximos de escolha.

Os resultados da composição dos cenários de PD foram definidos a partir da árvore de decisão gerada no software R, utilizando o algoritmo CART e os dados de preço e tempo de viagem provenientes de 189 simulações. Os níveis do atributo "preço do *ridesourcing* (carro)" foram diretamente extraídos da estrutura da árvore, enquanto os níveis dos atributos "tempo de viagem" (carro e moto) e "preço do *ridesourcing* (moto)" foram definidos com base na média dos valores em cada nó terminal. A segmentação permitiu a definição de duas faixas de distância: até 6,4 km, com preços de R$ 4,90 e R$ 8,90, e entre 6,4 km e 8,9 km, com preços de R$ 10,00 e R$ 12,00 para o *ridesourcing* por carro. Para viagens de até 6,4 km, os níveis de preço do *ridesourcing* por moto foram R$ 3,29 e R$ 5,93, e para distâncias entre 6,4 km e 8,9 km, os preços variaram entre R$ 3,30 e R$ 6,89. Em consonância, para viagens de até 6,4 km, os níveis de tempo de viagem foram definidos como 10 e 17 minutos para o *ridesourcing* por carro, e 8 e 15 minutos para o *ridesourcing* por moto. Já para distâncias entre 6,4 km e 8,9 km, os tempos variam entre 20 e 25 minutos para o *ridesourcing* por carro e entre 18 e 22 minutos para o *ridesourcing* por moto.

Com a definição dos níveis correspondentes a cada atributo, foi possível aplicar o método do Fatorial Completo para o desenvolvimento dos cenários de PD. Com base na Equação 1, apresentada anteriormente, e considerando um total de cinco atributos - conforto para o TP, além de preço e tempo de viagem para o *ridesourcing* por carro e para o *ridesourcing* por moto -, cada um com dois níveis, foram gerados 32 cenários possíveis. A partir desse conjunto, foram excluídos os cenários considerados "irreais", e definiu-se uma amostragem final composta por 8 cenários para cada faixa de distância considerada, que integraram o questionário aplicado. Dessa forma, para chegar ao modelo Logit Multinomial deste trabalho, vários modelos foram calibrados no *software* R, com o auxílio do pacote *Apollo*, utilizando os dados de PR e PD coletados. Esses modelos contemplaram diferentes variáveis e suas combinações foram feitas até chegar a um modelo em que todos os parâmetros fossem significativos com nível de confiança de pelo menos 95%. Os modelos estimados foram comparados ao modelo nulo por meio do teste de razão de verossimilhança, para avaliar se as variáveis explicativas incluídas melhoraram significativamente a precisão do modelo na perspectiva de escolha modal. A Tabela 1 apresenta os parâmetros estimados pelo modelo MNL para as variáveis explicativas incluídas nas funções de utilidade de cada alternativa de transporte.

Dessa forma, o teste de razão de verossimilhança (p-valor < 0,01) confirmou a contribuição significativa das variáveis explicativas em relação ao modelo nulo. Conforme a Tabela 1, para o TP, foram incluídas: uma constante, a variável conforto, as variáveis de PD (preço e tempo de viagem), a qualidade do serviço e a segurança pessoal. No *ridesourcing* por moto, consideraram-se preço, segurança viária, propósito da viagem (trabalho) e renda. E, por fim, para o *ridesourcing* por carro, destacaram-se a constante, preço e desconto tarifário. Dessa forma, é importante destacar que as variáveis qualitativas foram codificadas como binárias (0 e 1), e as quantitativas utilizaram os níveis definidos. Assim, os coeficientes estimados apresentaram sinais coerentes, como o efeito negativo do preço sobre a escolha modal, em que foi possível observar maior sensibilidade ao preço no *ridesourcing* por carro (-0,3599) e moto (-0,3869), em comparação ao transporte público (-0,1831), indicando que variações tarifárias no *ridesourcing* influenciam mais a substituição modal do que alterações no preço do TP, corroborando a perspectiva de Sá e Pitombo (2021).

A variável "conforto", relacionada à lotação, mostrou-se significativa para a escolha do transporte público (TP), com coeficiente positivo (1,1650), indicando que a possibilidade de viajar sentado aumenta a preferência por esse modo. Em contrapartida, o tempo de viagem (-0,5540), a qualidade do serviço (-0,8781) e, sobretudo, a segurança pessoal (-0,9792) exerceram influência negativa, demonstrando maior resistência dos usuários ao TP, especialmente frente à segurança pessoal. No caso do *ridesourcing* por motocicleta, a segurança viária

também influenciou negativamente, embora o propósito de viagem "trabalho" (com coeficiente positivo) tenha revelado forte tendência de escolha desse modo para deslocamentos frequentes.

Tabela 1: Estimativa do modelo MNL para os usuários de transporte público

Variável	**Alternativa**	**Coeficiente**	**p-valor**	**Razão de Chances**
Constantes				
Constante Transporte Público	Transporte Público	-1,7120	0,03900**	-
Constante *ridesoucing*	*Ridesourcing* (carro)	0,9585	0,00410***	-
Atributos dos cenários de PD				
Conforto	Transporte Público	1,1650	0,00029***	3,206
Preço do transporte público	Transporte Público	-0,1831	0,00335***	0,833
Tempo de viagem por TP	Transporte Público	-0,5540	0,00125***	0,575
Preço do *ridesourcing* (carro)	*Ridesourcing* (carro)	-0.3599	<0,00001 ***	0,698
Preço do *ridesourcing* (motocicleta)	*Ridesourcing* (motocicleta)	-0,3869	<0,00001***	0,679
Avaliação da Qualidade				
Qualidade Geral do TP (1- muito ruim; 2- ruim; 3- regular)	Transporte Público	-0,8781	0,04400**	0,416
Segurança pessoal no TP (1-muito ruim)	Transporte Público	-0,9792	0,00288***	0,376
Segurança viária (*ridesourcing* motocicleta)	Motocicleta	-0,8484	0,00168***	0,428
Características Socioeconômicas				
Renda	*Ridesourcing* (motocicleta)	0,3212	0,03980**	0,725
Desconto na Tarifa do TP	*Ridesourcing* (carro)	-0,3714	0,01490**	0,690
Motivo da viagem mais frequente				
Trabalho	*Ridesourcing* (motocicleta)	0,4144	0,00695**	1,513
Estatísticas do Modelo				
Número de indivíduos = 116				
Número de observações = 928				
Akaike Information Criterion (AIC) = 1756,44				
pseudo R^2 = 0,1513				
Log-Verossimilhança inicial = -1019,51				
Log-Verossimilhança final = -865,22				
p-valor (teste de razão de verossimilhança) = 0,000000				

Significância: ***p < 0,01; ** p < 0,05
Configuração das variáveis no banco de dados:
Conforto do TP - variável binária, onde 1 = viagem sentado; 0 = viagem em pé;
Preço do TP- variável quantitativa, onde os valores foram os níveis desses atributos;
Tempo de viagem por TP – variável binária, onde 1 = viagens com duração acima de 30 minutos; 0 = viagens com duração abaixo de 30 minutos.
Preço do *ridesourcing* (motocicleta) - variável quantitativa, onde os valores foram os níveis desse atributo;
Preço do *ridesourcing* (carro) - variável quantitativa, onde os valores foram os níveis desse atributo;
Qualidade Geral do TP = variável binária, onde 1 = avaliação muito ruim (1), ruim (2) ou regular (3); 0 = avaliação boa (4) ou muito boa (5);
Segurança viária (*ridesourcing* motocicleta) = variável binária, onde 1 = avaliação muito ruim (1), ruim (2) ou regular (3); 0 = avaliação boa (4) ou muito boa (5);
Segurança Pessoal no TP = variável binária, onde 1 = avaliação muito ruim (1); 0 = outras avaliações;
Renda = variável binária, onde 1 = renda de até um salário mínimo; 0 = para rendas acima de um salário mínimo;
Desconto na Tarifa do TP = variável binária, onde 1 = possui desconto na tarifa; 0 = não possui desconto;
Trabalho = variável binária, onde 1 = o propósito da viagem mais frequente é o trabalho; 0 = outros.

Sendo assim, isso sugere que, mesmo os usuários avaliando negativamente a segurança viária do *ridesourcing* por moto, essa modalidade tem substituído o TP em atividades cotidianas, o que pode ser explicado pela maior competitividade entre as suas tarifas, ao passo que a variável renda, mostrou-se, positivamente, influenciar a escolha dos usuários pelo *ridesourcing* na modalidade moto, sobretudo, entre aqueles com faixa de renda de até um salário mínimo. Dessa forma, observa-se que o *ridesourcing* por moto tem sido preferido por usuários de classes mais baixas. Paralelamente, o uso do *ridesourcing* por carro é menos frequente entre aqueles que possuem desconto na tarifa do TP, já que suas tarifas são mais elevadas e menos competitivas, tornando-o uma opção inviável, em alguns casos, para perfis de baixa renda. Compreende-se, portanto, que a escolha dos usuários pelos diferentes modos de transporte está diretamente relacionada à sua condição socioeconômica e, principalmente, à experiência com o transporte público (TP). Assim, diante de um TP com baixa qualidade e segurança, os usuários tendem a migrar para alternativas mais acessíveis, ainda que apresentem alto grau de insegurança.

4. CONCLUSÃO

Destarte, a análise do efeito de substituição do transporte público (TP) pelos serviços de *ridesourcing*, tanto na modalidade carro, como também na modalidade moto, revelou transformações significativas no padrão de mobilidade urbana em João Pessoa. A partir da aplicação de um modelo Logit Multinomial (MNL), foi possível identificar que fatores como conforto, preço, tempo de viagem, percepção de segurança e características socioeconômicas influenciam diretamente a escolha modal dos usuários. Os resultados indicam uma crescente competitividade do *ridesourcing* por moto em relação ao TP, sobretudo entre usuários de baixa renda e com viagens frequentes para trabalho. Essa preferência está relacionada principalmente à maior acessibilidade tarifária, mesmo diante da percepção de menor segurança viária. Por outro lado, a escolha pelo transporte público está fortemente condicionada à possibilidade de conforto (viajar sentado), sendo negativamente impactada por avaliações ruins de segurança pessoal e qualidade do TP em geral. Diante do supracitado, é válido pontuar que a substituição do TP por modos de *ridesourcing*, ainda que represente uma resposta prática à deficiência do sistema público, evidencia um cenário preocupante de vulnerabilidade social, no qual usuários recorrem a alternativas potencialmente mais perigosas para garantir mobilidade. Portanto, este estudo reforça a necessidade de políticas públicas voltadas à qualificação do transporte público, com foco na melhoria da segurança, do conforto e da qualidade do serviço, especialmente para os segmentos mais vulneráveis da população. Apenas com um sistema de transporte público atrativo e eficiente será possível conter o avanço de alternativas que, embora viáveis no curto prazo, acarretam externalidades negativas significativas para a mobilidade urbana.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho através do projeto 403508/2023-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benita, F., 2023. Exploring non-mandatory travel behavior in Jakarta City: Travel time, trip frequency, and socio-demographic influences. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives 21, 100896. https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100896

Irawan, M., Belgiawan, P., Tarigan, A., Wijanarko, F., 2020. To compete or not compete: exploring therelationships between motorcycle-based ride-sourcing, motorcycle taxis, and public transport in the Jakartametropolitan area. Transportation 47, 1–23. https://doi.org/10.1007/s11116-019-10019-5

Irawan, M.Z., Belgiawan, P.F., Joewono, T.B., Simanjuntak, N.I.M., 2020. Do motorcycle-based ride-hailing apps threaten bus ridership? A hybrid choice modeling approach with latent variables. Public Transp 12, 207– 231. https://doi.org/10.1007/s12469-019-00217-w

João Pessoa (2014). Apoio à estratégia de mobilidade urbana na cidade de João Pessoa. Disponível em: http://www.planmob.joaopessoa.pb.gov.br/wp-content/uploads/2017/06/RF-07-S%C3%ADntese.pdf. Acesso em: 07 de julho de 2025.

Muchlisin, M., Soza-Parra, J., Susilo, Y.O., Ettema, D., 2024. Unraveling the travel patterns of ride-hailing users: A latent class cluster analysis across income groups in Yogyakarta, Indonesia. Travel Behaviour and Society 37, 100836. https://doi.org/10.1016/j.tbs.2024.100836

Rayle, L., Dai, D., Chan, N., Cervero, R., Shaheen, S., 2016. Just a better taxi? A survey-based comparison of taxis, transit, and ridesourcing services in San Francisco. Transport Policy 45, 168–178. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.004

Suatmadi, A.Y., Creutzig, F., Otto, I.M., 2019. On-demand motorcycle taxis improve mobility, not sustainability. Case

Studies on Transport Policy 7, 218–229. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.04.005
Sá, A.L.S. de, 2020. Análise exploratória dos fatores que influenciam a escolha do ridesourcing como modo de transporte de substituição ou de complementaridade do transporte público (text). Universidade de São Paulo. https://doi.org/10.11606/D.18.2020.tde-26112020-202418
Sá, A.L.S., Pitombo, C.S., 2021. Methodological proposal for stated preference scenarios regarding an exploratory evaluation of ride-hailing implications on transit: A Brazilian context analysis. Case Studies on Transport Policy 9, 1727–1736. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.07.020
Vasconcellos, E.A. de, 2013. Road safety impacts of the motorcycle in Brazil. International Journal of Injury Control and Safety Promotion 20, 144–151. https://doi.org/10.1080/17457300.2012.696663

Fabrícia Rodrigues Pereira (fabricia.pereira@academico.ufpb.br)
Camila Gonçalves Luz Nunes (camilanunes.engcivil@hotmail.com)
Pablo Brilhante de Sousa (pablo.brilhante@academico.ufpb.br)
Campus I, Lot. Cidade Universitaria, 58051-900 – João Pessoa, PB, Brasil

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Passageiros

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO TRANSPORTE PÚBLICO NA REGIÃO DO ITAQUI-BACANGA EM SÃO LUIS-MA ATRAVÉS DO MÉTODO LITA

João Otávio Araújo de Sá, Mariana Brito Ribeiro, Harryson Patrick Soares da Silva, Ana Beatriz Pereira Segadilha Dos Santos
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

RESUMO
A mobilidade urbana é um dos principais desafios enfrentados pelas cidades brasileiras, sobretudo nas periferias urbanas, onde a oferta de transporte coletivo não acompanha a demanda populacional. Este estudo aplicou o método LITA *(Local Index of Transit Availability)* para avaliar a disponibilidade do transporte coletivo na região Itaqui-Bacanga, em São Luís (MA), com base nos indicadores de cobertura, capacidade e frequência de 6 (seis) linhas de ônibus: T019 - Cajueiro, T312 - Gapara, T310 - Gancharia, T016 - Vila Maranhão, A327 - Piancó e A311 - Campus, dentre as 18 linhas que operam nesta região. Os resultados demonstraram disparidades significativas entre as linhas, revelando zonas com baixa acessibilidade e necessidade de intervenção. A análise evidencia a utilidade do LITA como ferramenta técnica para subsidiar o planejamento urbano e orientar políticas públicas que visem à equidade e à eficiência na mobilidade urbana.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana configura-se como um dos principais desafios enfrentados pelas cidades brasileiras, especialmente nos grandes centros urbanos, onde o crescimento populacional acelerado e a expansão desordenada dificultam o acesso eficiente e equitativo ao transporte coletivo (Sousa, 2024). A precariedade dos sistemas de transporte público compromete a qualidade de vida, afeta a produtividade econômica e amplia desigualdades socioespaciais, sobretudo em áreas periféricas e de alta densidade populacional (Villaça, 2011).

A região de estudo está localizada na zona noroeste de São Luís, Maranhão, conhecida como Eixo Bacanga ou região Itaqui-Bacanga. Composta por cerca de 60 bairros, divide-se em cinco microrregiões: Anjo da Guarda, Vila Maranhão, Vila Ariri, Vila Bacanga e Vila Embratel (Morais, 2016). Trata-se de uma área com forte presença industrial e portuária, abrigando empresas como Vale S.A., Alumar e o Porto do Itaqui, além de um campus da Universidade Federal do Maranhão - UFMA, que atrai diariamente grande fluxo de pessoas.

A região é atendida pelo Lote I da licitação do transporte público municipal, operado pelo Consórcio Central, composto pelas empresas Viação Estrela e Rio Anil Transporte e Logística. Com uma população estimada em 110.150 habitantes distribuídos em aproximadamente 2.540 hectares (IBGE, 2022; Google Maps,2025). A área apresenta características típicas de regiões urbanas periféricas brasileiras, onde a oferta de transporte coletivo é insuficiente frente à demanda local (LABCIT,2018).

Diante disso, métodos de avaliação da oferta de transporte tornam-se ferramentas estratégicas para o planejamento urbano. Entre eles, destaca-se o Método LITA - *Local Index of Transit Availability* - que foi elaborado a partir de pesquisas na Austrália (Murray, 1998). Desenvolvido para mensurar a disponibilidade do transporte coletivo local com base em três dimensões: cobertura, frequência e capacidade das linhas de ônibus (Shelton et al., 2018). O método LITA foi escolhido para este cálculo por ser simples, didaticamente acessível e eficiente para avaliação do uso de transporte. Este método já foi aplicado também nas cidades de Uberlândia/MG (Deus e Sanches, 2009) e Belo Horizonte/MG (Couto,2011).

2. METODOLOGIA

O método LITA considera três indicadores: Cobertura, Capacidade e Frequência. Sendo necessário a obtenção de dados para execução da classificação das linhas pelo método as seguintes informações: população, área da zona, quilometragem da linha na zona, número de paradas no trajeto e capacidade dos veículos (Shelton et al., 2018). Das 18 linhas de ônibus que operam na região, 6 foram selecionadas de acordo com a demanda da proximidade da UFMA, de forma aleatória para compor a amostra e subsidiar a nota final de um trabalho acadêmico. As linhas escolhidas foram: T019 – Cajueiro, T312 – Gapara, T310 – Gancharia, T016 – Vila Maranhão, A327 – Piancó e A311 – Campus.

A área da zona e população foram obtidos com o auxílio da página do IBGE (2022), ao passo que informações referentes ao número de paradas, quilometragem total da linha, número de viagens diárias e capacidade dos veículos foram extraídos do *Sistema M2M Sonda* utilizado pelo sindicato das empresas de transporte coletivo municipal e pela SMTT – Secretaria Municipal de Transporte e Trânsito de São Luís. A quilometragem e número de paradas de cada linha foram limitadas à zona específica do Itaqui-Bacanga, com o auxílio do

software QGIS e Google Maps, como demonstra a figura 1.

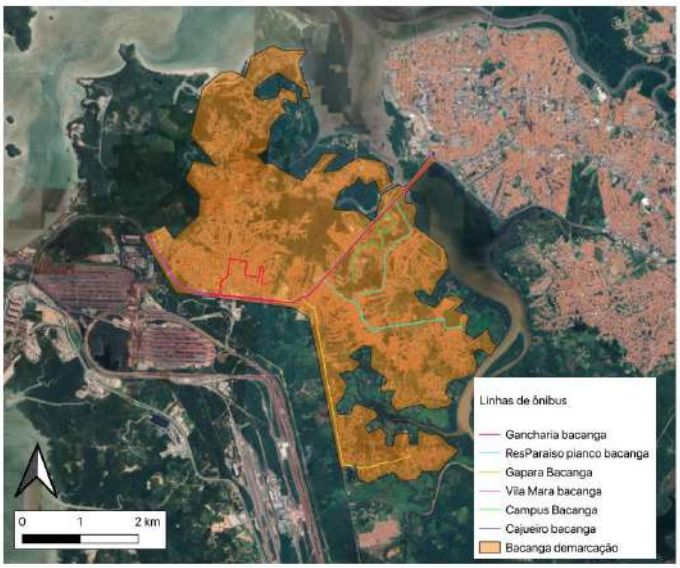


Figura 1: Mapa da região de análise e rotas do transporte coletivo por ônibus
Fonte: próprios autores, software QGIS e Google Maps

Inicialmente formatou-se uma tabela com os valores respectivos e dados correspondentes de: Linha, Km da rota, nº Paradas, nº Viagens. Esses valores foram alimentados para encontrar insight de dados como: frequência, capacidade e cobertura, média dos valores e desvio padrão. Em seguida foi feita a normalização dos valores para uma escala única (valor padrão - ux), calculado pela equação (1):

$$ux = \frac{x + \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

Onde: ux: valor normalizado; x: valor original; $\bar{x}$: média dos valores; σ: desvio padrão dos valores.

Por fim, foram analisados os valores de ux, onde cada valor foi convertido em escore (z-score) para possibilitar comparação entre linhas. A Oferta do Transporte Coletivo (OTC) se dá pela soma dos escores da cobertura, capacidade e frequência, que são avaliados na escala apresentada na tabela 1.

Tabela 1: Relação do Intervalo de OTC com o Nível

Intervalo do OTC	Nível	Satisfação
OTC ≥ 2,0	A	Ótimo
1,0 ≤ OTC < 2,0	B	Bom
0,0 ≤ OTC < 1,0	C	Regular
-1,0 ≤ OTC < 0,0	D	Ruim
-2,0 ≤ OTC < -1,0	E	Muito Ruim
OTC < -2,0	F	Péssimo

3. RESULTADOS

Segundo Ferraz (2004) uma rede de transporte com excesso de linhas a sobreposição de trajetos e linhas muito próximas entre si, podem comprometer a eficiência operacional do sistema. Na região em questão, a configuração da rede requer uma melhor organização do desenho das linhas, pois mostram percalços na qualidade do atendimento, mesmo com a integração entre os bairros da zona e a cidade, sendo:

- T019-Cajueiro: Linha Troncal, que percorre todo o trajeto da via principal da zona a Avenida dos Portugueses;
- A311-Campus: Linha Alimentadora, essencial para o deslocamento direcionado do terminal de integração praia grande a Universidade Federal do Maranhão e bairros ao entorno como Sá Viana e Vila Bacanga;
- T310-Gancharia: Linha Troncal, que interliga os bairros Gancharia e Alto São Sebastião, contribuindo assim para alimentação eficiente da rede;

- T312-Gapara: Linha Troncal, que interliga os bairros da zona como Gapara e Sá Viana e contribui para alimentação eficiente da rede;
- A327-Residencial Piancó/Jambeiro: Linha Alimentadora da região periférica da Vila Embratel, Piancó, Residencial Paraíso, fazendo a interligação desses bairros;
- T016-Vila Maranhão: Linha Troncal, que assim como a linha Cajueiro percorre todo o trajeto da via principal da zona na Avenida dos Portugueses.

Inicialmente formatou-se uma tabela com os dados correspondentes de cada linhas: km da rota, número de paradas, número de viagens, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Dados correspondentes das linhas

Linhas	km da rota	nº Paradas	nº Viagens
T019	13,035	82	8
A311	5,137	32	101
A310	14,054	92	35
A312	11,71	84	38
A327	11,922	72	52
T016	13,021	74	9

Após aplicação do método, os resultados do nível de serviço estão apresentados na Tabela 3. Onde se pode considerar que linhas com OTC próximos de zero ou negativos indicam a baixa disponibilidade de transporte.

Tabela 3: Dados para Cálculo de OTC e Nível.

Linhas	ux cobertura	ux capacidade	ux frequência	OTC	Nível - Satisfação
T019	0,500	-1,278	-0,947	-1,725	E - Muito Ruim
A311	-2,000	0,626	1,764	0,390	C – Regular
A310	1,000	0,506	-0,16	1,346	B – Bom
A312	0,625	0,291	-0,072	0,844	C – Regular
A327	0,000	1,094	0,335	1,429	B – Bom
T016	0,125	-1,215	-0,918	-2,008	F - Péssimo

A linha A327-Residencial Piancó/Jambeiro, apresentou o maior valor de OTC (1,429), situando-se na categoria B, o que indica um bom nível de serviço considerando os três critérios avaliados. Essa linha apresentou a maior capacidade (ux cap = 1,094), refletindo uma oferta significativa em termos de lugares disponíveis em relação à população atendida. A linha T310 - Gancharia obteve um OTC de 1,346, também classificada como nível B, impulsionada especialmente pelo melhor desempenho em cobertura (ux cob = 1,000). Ambas as linhas revelam uma oferta mais equilibrada, indicando maior potencial de atendimento às demandas locais.

Por outro lado, linhas como T019-Cajueiro e linha T016-Vila Maranhão apresentaram os piores resultados, com OTCs de -1,725 e -2,008, respectivamente. Classificadas nos níveis E e F, esses valores refletem severas deficiências na prestação do serviço, com valores normalizados negativos em todos os critérios. A linha T016-Vila Maranhão, por exemplo, apresentou a pior frequência (ux freq = -0,918) e uma das menores capacidades da amostra, o que pode indicar falhas estruturais na distribuição dos recursos de transporte.

As linhas A311-Campus e T312-Gapara, com OTCs intermediários (0,390 e 0,844, respectivamente), foram classificadas no nível C, revelando condições medianas de oferta. A linha A311-Campus, apesar da baixa cobertura (ux cob = -2,000), foi compensada por uma excelente frequência (ux freq = 1,764), o que sugere uma operação mais concentrada em áreas específicas, porém com regularidade elevada. A linha Gapara, com ux freq = -0,072, mostra uma fragilidade na frequência, mas o valor final do serviço é melhorado por possuir uma cobertura razoável de 0,625.

Esses resultados evidenciam a efetividade do método LITA na identificação de desigualdades na oferta de transporte urbano, permitindo diagnósticos mais precisos. Ao padronizar os dados e gerar índices comparáveis, o método oferece subsídios concretos para a formulação de políticas públicas mais equitativas, promovendo melhorias direcionadas àquelas linhas ou regiões com pior desempenho.

4. CONCLUSÕES

A aplicação do método LITA na região do Itaqui-Bacanga revelou diferenças importantes na oferta do

transporte coletivo urbano, mostrando que aspectos como cobertura, capacidade e frequência precisam ser considerados para compreender melhor a realidade local. As variações nos valores de OTC entre as linhas indicam que o serviço não é uniforme, deixando parcelas significativas da população, especialmente nas áreas mais vulneráveis, com acesso limitado à mobilidade.

Para as linhas com desempenho insatisfatório, como a T019-Cajueiro (nível E) e a T016-Vila Maranhão (nível F), é fundamental a adoção de medidas corretivas que melhorem significativamente sua eficiência. Essas linhas apresentaram baixos índices em todos os critérios avaliados, o que evidencia uma oferta de transporte insuficiente frente à demanda da população atendida. Recomenda-se, o aumento no número de viagens, redistribuição de veículos, reavaliação das rotas e inclusão de novas paradas estratégicas, especialmente em regiões de alta densidade populacional. A linha A327-Residencial Piancó/Jambeiro com nível B pode ter seu nível melhorado, aumentando a cobertura com mais locais de paradas. A linha T310-Gancharia com igual nível B, para alcançar melhor performance, incrementando mais frequência. As linhas A311-Campus e T312-Gapara, precisam ampliar suas coberturas e frequências, para obter níveis mais elevados de OTC.

Embora o método LITA não seja uma solução completa, ele se mostra uma ferramenta eficiente e confiável para comparar a oferta entre diferentes linhas. Seu uso permite uma análise organizada do sistema de transporte, auxiliando gestores públicos e operadores a tomar decisões mais informadas, como ampliar a cobertura, aumentar a capacidade e melhorar a frequência das linhas.

Por se tratar de um trabalho acadêmico de graduação, esta pesquisa possui limitações, entre elas a análise focada em apenas seis linhas de ônibus e a dependência dos dados disponíveis no período estudado. Ainda assim, os resultados demonstram a relevância do uso de métodos técnicos como o LITA para apoiar o planejamento urbano e orientar políticas públicas que busquem um transporte coletivo mais eficiente, acessível e justo para toda a população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Couto, D. M. (2011). *Regulação e controle operacional no transporte coletivo urbano: estudo de caso no município de Belo Horizonte/MG*. Dissertação (mestrado). Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8NWFJY/1/disserta__o_danielmarx050911.pdf (acesso em 06/07/2025).

Deus, L. R., e Sanches, S. P. (2009). *Influência da Forma Urbana Sobre o Comportamento de Viagens Urbanas1*. *Caminhos da Geografia*, v.9, n.29, p.1-17. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/download/15890/8968/59542 (acesso em 06/07/2025).

Ferraz, A. C. (2004). Coca; Pinto; Torres, Isaac Guillermo Espinoza Torres. *Transporte Público Urbano*. Rima. São Carlos. Disponível em: https://editorarima.com.br/wp-content/uploads/2023/11/Transporte-Publico-Coletivo-Urbano.pdf (acesso em 06/07/2025).

LABCIT (2018). *Interações Espaciais e a questão do transporte público: proposições nos municípios da região Metropolitana de São Luis (Ma).* Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://labcit.ufsc.br/interacoes-espaciais-e-a-questao-do-transporte-publico-proposicoes-nos-municipios-da-regiao-metropolitana-de-sao-luis-ma/ (acesso em: 06/07/2025).

Moraes, T. (2016). *Moradores do Itaqui-Bacanga querem emancipação do bairro*. O Imparcial, São Luís, 21 jan. 2016. Disponível em: https://oimparcial.com.br/cidades/2016/01/moradores-do-itaqui-bacanga-querem-emancipacao-do-bairro (Acesso em: 05/07/2025).

Murray, A. T., Davis, R., Stimson, R. J., e Ferreira, L. (1998). Public transportation access. *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 3(5), 319–328. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(98)00010-8.

Souza, M. B. (2024). *Dispersão Urbana e o Impacto Na Mobilidade: Desafios E Oportunidades*. Disponível em: https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/contecc%202024/CIV/DISPERS%C3%83O_URBANA_E_O_IMPACTO_NA_MOBILIDADE__DESAFIOS_E_OPORTUNIDADES.pdf (Acesso em: 19/09/2025).

Shelton, K., Howell, A. e Ghavamian, N. (2018). *Transit accessibility: An evaluation of Richmond, Virginia,* USA, using multiple methods. *Sustainability, 10*(12), 4857. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su10124857 (acesso em: 14/09/2025).

Reis, E., Castellani G. e Véras, M. P. B. (2024). *Desigualdades sociais, territórios da vulnerabilidade e mobilidade urbana. Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 26, n. 60, p. 537–560, maio/ago. 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cm/a/TcBs56trZdkkrMDYLsMR8jn/?format=html&lang=pt (Acesso em: 14/09/ 2025).

João Otávio Araújo de Sá (joao.sa@discente.ufma.br)
Mariana Brito Ribeiro (mariana.br@discente.ufma.br)
Harryson Patrick Soares da Silva (patrickharryson@gmail.com)

Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos (ana.segadilha@ufma.br)
Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Avenida dos Portugueses, número 1966, Vila Bacanga, São Luís - MA, Brasil.

CAMINHOS E DESAFIOS PARA A MOBILIDADE NO ITAQUI-BACANGA: UMA AVALIAÇÃO COM O MÉTODO LITA

Arabela Joana da Luz Santos, Tarcísio Cantanhede Noleto, Vinícius Santos Mafra, Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

RESUMO
A mobilidade urbana é um desafio nas regiões periféricas brasileiras, especialmente em áreas de alta densidade populacional, como a região Itaqui-Bacanga, em São Luís (MA). Este estudo teve como objetivo analisar as condições do transporte coletivo local por meio do método LITA *(Local Index of Transit Availability),* que considera a cobertura, frequência e capacidade dos veículos. Foram analisadas seis linhas de ônibus, com base em dados do IBGE (2022), no aplicativo Meu Ônibus e em mapeamentos realizados com o software QGIS. Os resultados revelaram grandes desigualdades no nível de serviço. As linhas Vila Nova e Alto da Esperança obtiveram melhor desempenho, enquanto Sá Viana e Residencial Paraíso foram classificadas como muito ruins, evidenciando baixa cobertura e pouca frequência. Os resultados mostraram a necessidade de reestruturação do sistema, necessidade de ampliação da cobertura, aumento da frequência e adequação da frota, visando melhoria da mobilidade e acessibilidade na região.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Vasconcellos (2002), o deslocamento das pessoas pelo espaço urbano, realizado a pé, por veículos motorizados ou não motorizados, está diretamente associado às demandas sociais e econômicas de cada localidade. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, os habitantes das áreas urbanas realizam, em média, dois deslocamentos diários — número que representa aproximadamente a metade da média registrada em países desenvolvidos.

A cidade de São Luís, capital do estado do Maranhão, insere-se nesse contexto com particularidades que intensificam os desafios de mobilidade urbana. Caracterizada por um crescimento urbano desordenado e pela expansão de áreas periféricas sem a devida infraestrutura, São Luís apresenta um sistema viário deficiente, baixa integração entre os modos de transporte e precariedade no serviço de transporte coletivo (CUBO, 2022; O Imparcial, 2024). A malha urbana da cidade revela disparidades no acesso à mobilidade, especialmente nas regiões mais afastadas do centro histórico e administrativo, onde a população enfrenta longos tempos de espera e deslocamentos pouco eficientes (Moura et al., 2017; Pereira e Alcântara Júnior, 2017).

No contexto de São Luís -MA, a região Itaqui-Bacanga se destaca como um caso significativo dessa realidade, reunindo, de um lado, comunidades populares de alta densidade, e de outro, importantes instalações portuárias e industriais — como os complexos do Porto do Itaqui e da Ponta da Madeira — cujas atividades logísticas influenciam diretamente as condições de deslocamento, circulação e acessibilidade na área (Moura et al., 2017). Esta região é composta por 70 bairros possuindo população de aproximadamente 110.150 habitantes distribuída em 2.540 hectares, e que enfrentam diariamente desafios de infraestrutura (IBGE, 2025). Essas características conferem à região uma elevada densidade demográfica, associada a importantes atividades econômicas, como a operação portuária e o comércio local, além de problemas estruturais no sistema viário e na rede de transporte coletivo.

Ao longo dos anos, a região do eixo Itaqui-Bacanga tem enfrentado diversas dificuldades relacionadas à mobilidade urbana, como a oferta insuficiente de transporte coletivo, má conservação das vias, falta de integração entre os diferentes modais e a convivência constante entre o tráfego de cargas e o transporte de passageiros (Moura et al., 2017). Essas adversidades comprometem não apenas a circulação eficiente de pessoas e mercadorias, mas também impactam diretamente as dinâmicas sociais, econômicas e a qualidade de vida dos moradores da área (Souza, 2013).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise das condições de oferta do transporte coletivo na região Itaqui-Bacanga, em São Luís - MA, utilizando o método LITA (*Local Index of Transit Availability*) como ferramenta metodológica de sistematização e análise.

2. METODOLOGIA

Este estudo adota como abordagem o método LITA (*Local Index of Transit Availability*), proposto por Rood (1998) para a Comissão do Governo Local de Sacramento, mede a qualidade do serviço de trânsito, a intensidade e disponibilidade de transporte coletivo motorizado sobre pneus em áreas urbanas, a partir da combinação de três parâmetros fundamentais: cobertura do serviço, frequência das viagens e capacidade dos veículos.

Na fase inicial da pesquisa, foram coletadas as informações fundamentais para a aplicação do método e a compreensão da dinâmica urbana da região. Foram reunidos dados demográficos provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), juntamente com informações sobre a oferta de transporte e a estrutura física da região, a fim de subsidiar as análises realizadas no estudo.

Em seguida, realizou-se o mapeamento dos pontos de parada de ônibus e a identificação das principais linhas de transporte coletivo que atendem à região Itaqui-Bacanga. Essa atividade foi executada com o apoio do aplicativo Meu Ônibus, que disponibiliza informações em tempo real sobre a localização de veículos e os pontos de parada cadastrados no sistema de transporte municipal. A Figura 1 representa os itinerários das linhas analisadas.

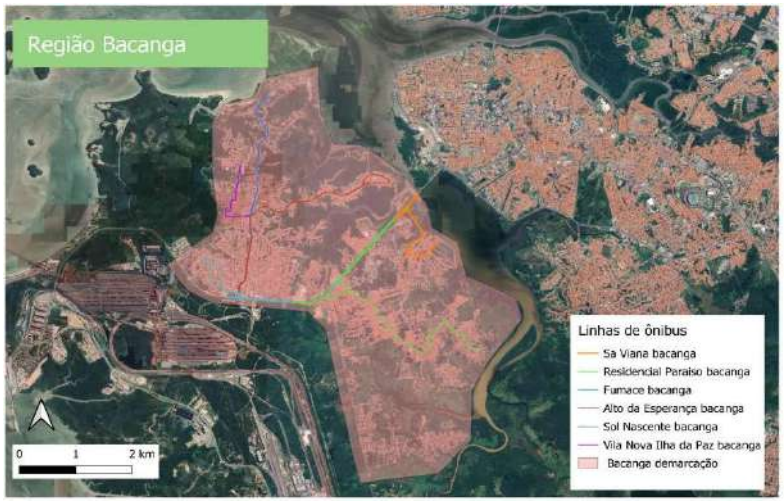


Figura 1: Itinerários das linhas urbanas na região Itaqui Bacanga.

Foram observadas e analisadas as seguintes linhas urbanas que atendem à região: Sá Viana Terminal, Fumacê, Residencial Paraíso, Sol Nascente, Vila Nova–Ilha da Paz e Alto da Esperança. Os dados referentes à frequência diária das viagens, os tipos de veículos utilizados e o itinerário das linhas do serviço foram obtidos com o uso do software de monitoramento M2M, da empresa *M2M Solution*, pertencente ao grupo *SODA.* e complementados com informações do Sindicato das Empresas de Transporte de Passageiros de São Luís – SET (2023). Para o mapeamento e cálculo da extensão das linhas dentro da área de estudo, utilizou-se o software QGIS.

Após a avaliação utilizando o LITA, foram analisados os resultados obtidos e elaboradas recomendações de melhoria do sistema. Com o intuito de contribuir para a melhoria da qualidade do serviço de transporte coletivo na região e para a construção de uma mobilidade urbana mais eficiente, acessível e integrada, adequada à realidade da área

3. RESULTADOS

A aplicação do método LITA às seis linhas de ônibus que operam na região Itaqui-Bacanga permitiu avaliar o nível de serviço (OTC) considerando três variáveis descritas na metodologia. A Tabela 1 apresenta os dados brutos referentes ao número de pontos de parada, tipo de ônibus e sua capacidade (80), a extensão percorrida dentro da zona de estudo, cobertura territorial, frequência de viagens e capacidade operacional de cada linha avaliada.

Tabela 1: Características Operacionais das Linhas de Ônibus na Região Itaqui-Bacanga

Linha	Sá Viana	Fumacê	Residencial Paraíso	Sol Nascente	Vila Nova	Alto da Esperança
Nº de pontos	8	18	17	34	27	31
Tipos de ônibus	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.	Conv.
Km na zona	1,90	4,94	5,46	8,65	7,38	8,13
Cobertura	0,003	0,007	0,006	0,013	0,010	0,012
Frequência	35	31	13	24	61	37
Capacidade	0,048	0,111	0,051	0,150	0,326	0,218

Com base nesses critérios, foram calculados os níveis de serviço das seis linhas analisadas. Os valores padronizados de cada variável e os respectivos somatórios LITA estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Avaliação do Nível de Serviço das Linhas de Ônibus na Região Itaqui-Bacanga

Linha	Sá Viana	Fumacê	Residencial Paraíso	Sol Nascente	Vila Nova	Alto da Esperança
Cobertura	-1,304	-0,333	-0,666	1,666	0,666	1,333
Frequência	0,093	-0,155	-1,277	-0,592	1,713	0,218
Capacidade	-0,952	-0,364	-0,925	0	1,644	0,628
∑ LITA	-2,163	-0,853	-2,869	1,074	4,025	2,18
Nível de Serviço	F	D	F	B	A	A

A linha Vila Nova apresentou o melhor desempenho, atingindo nível A - Excelente, com somatório de nível de serviço igual a 4,025, destacando-se por sua elevada frequência de viagens e grande capacidade dos veículos. A linha Alto da Esperança obteve o segundo melhor resultado, com somatório de 2,18 e classificação nível A, demonstrando desempenho equilibrado, principalmente em termos de capacidade.

Por outro lado, as linhas Sá Viana e Residencial Paraíso apresentaram os piores desempenhos, ambas classificadas como nível F - Muito ruim. A linha Residencial Paraíso registrou o menor somatório (-2,869), seguida pela linha Sá Viana (-2,163). Ambas apresentaram baixos índices em todos os critérios avaliados, o que evidencia uma situação crítica no atendimento à população. A linha Fumacê, classificada no nível D - Ruim, também apresentou deficiências significativas, principalmente na cobertura e capacidade, demonstrando-se insuficiente para atender à demanda da região. A linha Sol Nascente, apesar de apresentar um nível B - Bom, mostrou fragilidade na frequência, mesmo com boa cobertura territorial.

Essa análise reforça as suposições de que a rede de transporte coletivo na região Itaqui-Bacanga é desigual, e que as ofertas do serviço não são homogêneas. Enquanto algumas linhas atendem adequadamente à população, outras apresentam falhas graves, comprometendo o direito à mobilidade de milhares de moradores. Diante desse cenário, reforçam-se as propostas de intervenção, como a requalificação das linhas Sá Viana e Residencial Paraíso como prioridade, sendo fundamental reestruturar seus trajetos para aumentar a cobertura territorial, melhorar a regularidade das viagens e substituir os veículos por modelos com maior capacidade e acessibilidade. Ações urgentes que podem evitar o agravamento da exclusão territorial já existente.

A linha Fumacê, embora com desempenho um pouco melhor, também necessita de ajustes. É recomendável revisar os pontos de parada, redistribuir horários e promover intervenções nas vias utilizadas para garantir fluidez e eficiência. A linha Sol Nascente, apesar do nível regular, deve receber investimentos voltados ao aumento da frequência de viagens, principalmente nos horários de maior fluxo, além de avaliações quanto à lotação dos veículos.

Por outro lado, as linhas Vila Nova e Alto da Esperança, que se destacaram com os melhores níveis de serviço, devem ter suas qualidades preservadas. Para isso, recomenda-se o monitoramento constante de sua operação, a ampliação da frota conforme a demanda e a expansão gradual de sua cobertura para áreas ainda desassistidas.

Além das ações específicas para cada linha, a análise reforça a necessidade de intervenções estruturais em toda a região, incluindo a criação de faixas exclusivas para ônibus ao longo das principais vias de circulação, como a Avenida dos Portugueses que concentram grande parte do tráfego coletivo. Também se recomendam melhorias nas paradas de ônibus localizadas nos bairros de maior demanda, como Vila Nova, Alto da Esperança e Sá Viana, garantindo maior conforto, segurança e acessibilidade.

Por fim, os resultados obtidos segundo o no método LITA confirmam a necessidade de planejamento estratégico e inclusivo para a mobilidade urbana na região Itaqui-Bacanga, principalmente nas linhas que apresentaram o nível de serviço F. A correção das disparidades identificadas contribuirá diretamente para o acesso equitativo à cidade e para a promoção da qualidade de vida nos territórios periféricos de São Luís.

4. CONCLUSÃO

A análise da mobilidade urbana na região Itaqui-Bacanga, por meio do método LITA, evidenciou desigualdades significativas na oferta de transporte coletivo. Os resultados revelaram que, apesar de algumas linhas apresentarem níveis satisfatórios de atendimento, como as linhas Vila Nova e Alto da Esperança, outras, como Sá Viana e Residencial Paraíso, encontram-se em condições críticas, com baixa cobertura, frequência insuficiente e capacidade inadequada dos veículos. Esses dados reforçam a urgência de reestruturação do sistema, especialmente em áreas mais vulneráveis. As propostas de intervenção indicam caminhos para mitigar as disparidades identificadas, como a ampliação da cobertura territorial aliada ao aumento do número pontos dentro do bairro, o aumento da frequência de viagens e a modernização da frota. Além disso, destaca-se a importância de ações integradas entre o poder público, operadores do sistema e a população local para o planejamento de uma mobilidade urbana mais eficiente e acessível. Embora os resultados tenham apresentado uma perspectiva da situação atual do transporte na região, é importante destacar as limitações de prazo, recursos monetários e tecnológicos no decorrer do estudo. Desse modo, recomenda-se que estudos futuros apresentem uma estrutura mais ampla e explorem a aplicação do método LITA em outras regiões periféricas da cidade, de modo a ampliar o diagnóstico da mobilidade urbana de São Luís.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mamun, S. e Lownes, N. E. (2011). Public Transit Accessibility and Need Indices: Approaches for Measuring Service Gap. Disponivel em: https://digitalcommons.lib.uconn.edu/gs_theses/58/. (acesso em 12/09/2024)

Rood, T. (1998). The local index of transit availability: An implementation manual. Local Government Commission, Sacramento, California

CUBO (2022). São Luís é a cidade com pior índice de mobilidade urbana do Brasil: CPI do transporte termina sem grandes desdobramentos. *Cubo*, 22 jun. 2022. Disponível em: https://cubo.jor.br/2022/06/22/sao-luis-e-a-cidade-com-pior-indice-de-mobilidade-urbana-do-brasil-x-cpi-do-transporte-termina-sem-grandes-desdobramentos/. (acesso em: 13/07/2025).

Moura, J. G.; Santos, A. V. e Paula, R. Z. A. De. (2017). Demanda por transporte de passageiros em São Luís–MA: um estudo para o eixo Itaqui-Bacanga. *Revista de Economia da UEG*, v. 11, n. 2, p. 32–53, 2017. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.5540092.

Sá Filho, R. Dos S. (2020). *Transporte alternativo da área Itaqui Bacanga na perspectiva do usuário*. Monografia (graduação). Programa de Administração, Universidade Federal do Maranhão. São Luís. Disponível em: https://tedebc-teste.ufma.br/handle/123456789/5948 (acesso em 04/07/2025).

O Imparcial (2024). Mobilidade urbana em São Luís: desafios e soluções. *O Imparcial*, 25 set. 2024. Disponível em: https://oimparcial.com.br/noticias/2024/09/mobilidade-urbana-em-sao-luis-desafios-e-solucoes/. (acesso em: 14 jul. 2025).

Pereira, I. C. e Alcântara Júnior, J. M. (2017). A mobilidade e a expansão territorial na cidade de São Luís, MA. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 19, n. 40, p. 393–413, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cm/a/cSRhHkDy7Vv4WzM6Ld6b7Fy. (acesso em: 14/07/2025).

São Luís. Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (SMTT). *Dados operacionais do sistema de transporte coletivo urbano*. São Luís: SMTT, 2023. Disponível em: https://www.saoluis.ma.gov.br. (acesso em: 2 jul. 2025).

Souza, M. L (2013). *Os conceitos fundamentais da pesquisa socioespacial*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013. Disponível em: http://hdl.handle.net/123456789/295. (acesso em: 03/07/2025)

Vasconcellos, E. A.; De Carvalho, C. H. R. e Pereira, R. H. M. (2011). *Transporte urbano e trânsito: engenharia e planejamento*. Dissertação 2. ed. São Paulo: Contexto, 2002. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1373. (acesso em: 11/09/2025).

Arabela Joana da Luz Santos (luz.arabela@discente.ufma.br)
Tarcísio Cantanhede Noleto (tarcisio.noleto@discente.ufma.br)
Vinícius Santos Mafra (vinicius.mafra@discente.ufma.br)
Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos (ana.segadilha@ufma.br)
Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Avenida dos Portugueses, número 1966, Vila Bacanga, São Luís - MA, Brasil.

HOW TO USE THE GTFSWIZARD R PACKAGE TO ASSESS TRANSIT PROJECTS: FORTALEZA'S BR-116 BUS RAPID TRANSIT SYSTEM PROPOSAL

Nelson de Oliveira Quesado Filho[1], **Caio Gustavo Coelho Guimarães**[1], **Francisco Moraes de Oliveira Neto**[1]
[1]Universidade Federal do Ceará

ABSTRACT
Effective public transport planning requires accessible tools for analyzing transit data, a current challenge due to fragmented and complex platforms. This paper addresses this gap by demonstrating the GTFSwizard R package as a unified, user-friendly solution to explore and manipulate transit networks from GTFS. It showcases its application through an *ex-ante* evaluation of the proposed BR-116 BRT project in Fortaleza, Brazil, estimating its impact on job accessibility. Results indicate the project yields positive benefits, improving accessibility for over 26,000 residents and reducing critical zones by 3%. However, the impact on city-wide equity was very low, with the Palma Ratio showing change from 1.60 to 1.59.

1. INTRODUCTION

Public transport is crucial to current transport planning because it is efficient, resilient, and equitable, often serving vulnerable groups (Currie, 2010; Hamdouch *et al.*, 2014). It is also the primary system that planners use to improve accessibility and promote spatial development (ITDP, 2017). The balance between public transport supply and demand is critical for effective service and requires accurate models (Hussain, Zhang & Magmood, 2021).

Among supply models, the General Transit Feed Specification (GTFS) is notable for its ease of use, widespread adoption, and detailed representation of transit operations (Nuzzolo, Russo & Crisalli, 2001). The detailed nature of GTFS data allows for analyses of mobility and accessibility issues (Hamdouch *et al*., 2014).

Despite its value (Prommaharaj *et al.*, 2020), there is a significant lack of comprehensive, open-source, and user-friendly platforms to analyze and manipulate GTFS files. Existing tools often require users to write custom scripts and use multiple separate applications for specific tasks like data loading (Herszenhut, Poletti & Padgham, 2024), data exploration (Poletti *et al.*, 2024; Herszenhut *et al.*, 2024;), or route planning (Pereira *et al.*, 2021; Poletti *et al.*, 2024). This fragmentation presents a barrier to using GTFS data in transit planning.

This paper addresses that research gap by showcasing the GTFSwizard R package as a comprehensive tool to explore and manipulate GTFS data and support transit planning, using Fortaleza's announced BR-116 bus rapid transit system as case study.

2. MODELING TRANSIT PROJECTS WITH THE GTFSWIZARD PACKAGE

GTFSwizard is an R package designed to explore and manipulate GTFS (General Transit Feed Specification) files through an intuitive, visual interface. It helps researchers and practitioners analyze and simulate public transport networks by enabling filtering by route, trip, stop, and time. The package supports spatial visualizations and detailed metrics such as travel time matrices, headways, dwell times, frequencies, travel times, corridors, and hubs. Users can edit feeds by delaying, rescheduling, splitting or merging trips, and combining GTFS files, besides changing speed and dwell time.

The GTFSwizard package provides a streamlined interface for processing GTFS (General Transit Feed Specification) data in R. It is structured around five main tasks: conversion, filtering, analysis, editing, and export. The function as_wizardgtfs() converts GTFS data into the internal format used by the package. This format supports validation, shape reconstruction, and compatibility with other operations. Filtering functions (filter_route(), filter_trip(), filter_time(), etc.) allow users to subset data by routes, trips, stops, service IDs, dates, or time ranges.

For analysis and visualization, GTFSwizard includes a rich set of functions to compute operational metrics such as frequencies (get_frequency()), headways (get_headways()), dwell times (get_dwelltimes()), durations (get_durations()), fleet size (get_fleet()), and spatial metrics like distances (get_distances()), hubs (get_hubs()), and corridors (get_corridor()). The package also features an interactive Shiny app (explore_gtfs()) for

exploratory data analysis. Editing tools support simulations by modifying dwell times (edit_dwelltime()), speeds (edit_speed()), or introducing delays (delay_trip()). Users can also split trips or merge feeds. The modified datasets can be exported back to standard GTFS format with write_gtfs() for external use or deployment.

For Bus Rapid Transit (BRT) and exclusive lanes, users can represent faster travel on these corridors by using edit_speed() to adjust travel speeds. In addition, edit_dwelltime() allows for modeling optimized boarding and alighting processes by reflecting reduced dwell times at stations, which can result from level boarding, pre-payment, or higher operational efficiency. Frequency modifications are also possible. Users can represent increased frequencies by using filter_trip() to select trips to be doubled, delay_trip() to change their departure times, and merge_gtfs() to add them to the original schedule. Conversely, filter_trip() can be used to reduce service frequencies to evaluate cost-saving measures or temporary schedule changes. For route segmentation and partial adjustments, the split_trip() function can divide existing routes into smaller segments. This is useful for assessing the feasibility of feeder services, route rationalization, or eliminating service redundancy. To model express services, users can use edit_dwell() to subtract dwell times from total trip durations and filter_stop() to remove unused stops from the route. This represents the introduction of faster services that skip certain stops.

3. *EX-ANTE* ASSESSMENT OF THE BR-116 BUS RAPID TRANSIT IN THE ACCESSIBILITY DISTRIBUTION IN THE CITY OF FORTALEZA

The BR-116 BRT corridor in Fortaleza is inserted in a context of urban restructuring and seeks greater efficiency in mass transit across the Metropolitan Region. Cavalcante (2009) shows that BR-116, a backbone highway under increasing urban pressure, had its municipal section ceded for sustainable mobility policies that redistribute road space in favor of public transport. Netto (2016) argues that interventions prioritizing sustainable modes are transformative, shaping daily routines and encouraging more eco-friendly behaviors when well-integrated into the existing street network.

The design of the BR-116 BRT strictly follows the guidelines of the Ministry of Cities' BRT Manual (2008), which prescribes fully segregated lanes, off-board fare collection, level-boarding stations, accessible and climate-controlled platforms, and intermodal integration. Levinson *et al.* (2003) and Wright (2003) affirm that BRT merges the flexibility of buses with the reliability of rail at a fraction of the cost: according to ITDP, a BRT can cost up to 20 times less than a light-rail or tram system while achieving comparable capacity and comfort.

The proposal for BR-116 includes approximately 9.2 km of central-median busway with five elevated stations spaced to serve within a 600 m pedestrian radius (Braga, 2006). Priority signaling, access control, and standardized sidewalks with dedicated pedestrian and bicycle lanes form the core of the urban-space enhancement strategy, matching the Basic BRT Quality Standard (PQ-BRT, 2014) and lessons learned from the Bezerra de Menezes corridor in Fortaleza (Bessa, 2017).

Expected outcomes include travel-time reductions, improved road safety, and transit-oriented densification along the corridor, in line with Transit-Oriented Development principles. Balbim, Krause & Linke (2016) stress that transport infrastructure must align with land use to ensure spatial equity and urban efficiency. Thus, the BR-116 BRT represents both a mobility solution and an urban-reorganization strategy aimed at socio-spatial equity and sustainability.

3.1 Method for Modeling and Evaluating the BR-116's BRT Impact over Accessibility Distribution

The method began with modeling the BR-116 BRT by modifying a GTFS file using the GTFSwizard R package. To simulate the BRT's operational improvements, travel speeds along the corridor were increased by a factor of 1.1 and station dwell times were reduced to from 30 seconds to 20 seconds. Subsequently, travel time matrices were computed for the morning peak period (6:00 to 8:00 AM), allowing a maximum of two transfers per trip.

Job accessibility was measured using a potential accessibility indicator (Miller, 2020). This method calculates the proportion of jobs reachable from a location, employing a decay function that reduces the value of

opportunities as travel time increases. The function was calibrated so that jobs 60 minutes away are weighted at half.

The project's impact was evaluated using two equity-focused metrics. First, by defining a "critical accessibility" threshold based on the median accessibility of the low-income population in the baseline scenario (Freire, 2019). The analysis then measured the reduction of the population below this threshold. Second, the Palma Ratio was used to assess changes in inequality by comparing the accessibility levels of the best-off 10% and the worst-off 40% of the population (Pereira; Herszenhut, 2022).

3.2 BR-116's BRT Impact over Accessibility Distribution

Given that the intervention consists of an increase in the public transport supply, only positive effects are expected regarding the difference in accessibility (with versus without the BRT). Figures 1a and 1b illustrate these impacts.

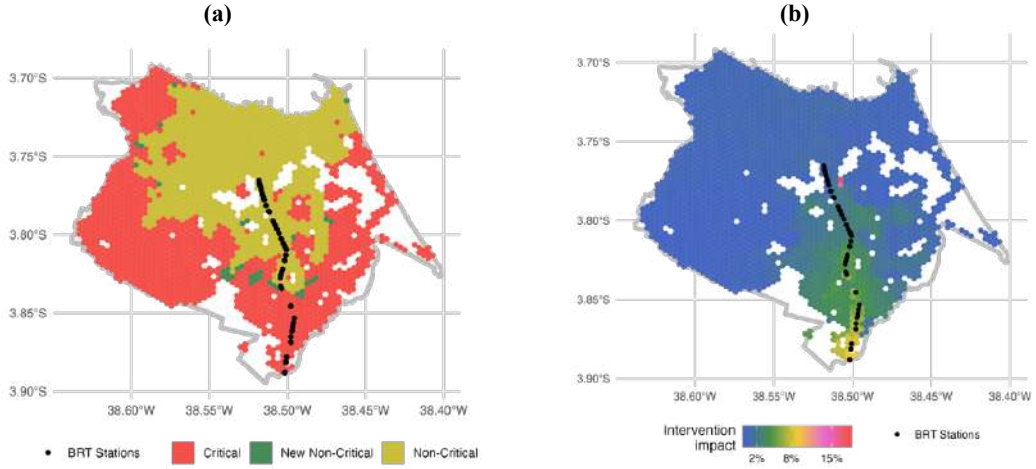


Figure 1a: Critical, non-critical and new non-critical zones. **Figure 1b:** Expected effect from the BRT over access.

The analysis of critical accessibility zones (Figure 1a) shows that, before the BRT implementation, there were 1,183 critical zones and 938 non-critical zones. With the new service, the number of critical zones is projected to fall to 1,148, converting 35 areas into non-critical zones and reducing the total number of critical zones by nearly 3%. As depicted in Figure 1b, the most significant impacts are concentrated in the city's periphery, which is an expected outcome due to the cumulative effect of travel time savings along the corridor.

Regarding the affected population, in the scenario without the BRT, 49.97% of inhabitants (791,774 out of 1,584,487) are in a critical accessibility situation. With the BRT project, this figure is expected to decrease to 48.30%, or 765,535 people. This change represents 26,239 inhabitants who would no longer face critical accessibility problems.

From a distributive perspective, the Palma ratio shows a negligible change, decreasing from 1.60 to 1.59. This minimal improvement suggests that while the BRT provides accessibility gains, its impacts do not prioritize low-income individuals.

4. CONCLUSION

This paper demonstrates the usefulness of the GTFSwizard R package for the *ex-ante* evaluation of transit projects, using the proposed BR-116 BRT in Fortaleza as a case study. The tool provides a streamlined and accessible platform for planners to model and analyze the impacts of transport interventions.

The analysis revealed that the BRT would generate positive accessibility gains, reducing the number of critical zones by 3% and improving conditions for over 26,000 residents. However, the project's impact on equity was found to be minimal, with the Palma Ratio showing a change from 1.60 to 1.59. This highlights that while single-corridor projects can provide localized benefits, they may be insufficient to alter patterns of inequality.

Agradecimentos
This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBIM, Renato; KRAUSE, Cleandro; LINKE, Clarisse Cunha. Cidade e movimento: mobilidades e interações no desenvolvimento urbano. Brasília: Ipea, 2016.

BESSA, Juliana Rocha Sombra. Mobilidade Urbana: Sistema de Bus Rapid Transit (BRT) para BR-116, Fortaleza, CE. Trabalho Final de Graduação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

BRAGA, Milton Liebentritt de Almeida. Infra-Estrutura e Projeto Urbano. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Transporte e Mobilidade Urbana. Manual de BRT – Bus Rapid Transit: guia de planejamento. Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

CAVALCANTE, Antônio Paulo de Hollanda. A arquitetura da cidade e os transportes: o caso dos congestionamentos em Fortaleza – Ceará. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CURRIE, G. (2010) Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs. Journal of Transport Geography, v. 18, p. 31–41. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2008.12.002

HAMDOUCH, A.; HO, H. W.; SUMALEE, A.; WANG, G. e SZETO, W. Y. (2014) Schedule-based modeling of transit operations with uncertainty. Transportation Research Part B: Methodological.

HERSZENHUT, D.; POLETTI, F. e PADGHAM, M. (2024) gtfsio: Read and write General Transit Feed Specification (GTFS) files. R package version 1.2.0. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=gtfsio.

HERSZENHUT, D.; PEREIRA, R.; ANDRADE, P. e BAZZO, J. (2024) gtfstools: General Transit Feed Specification (GTFS) editing and analysing tools. R package version 1.3.0. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=gtfstools.

HUSSAIN, R.; ZHANG, X. e MAHMOOD, A. (2021) Origin-destination based supply model for transit systems. Transportation Research Record.

ITDP (2017) TOD Standard 3.0. Institute for Transportation and Development Policy. Disponível em: https://tod.itdp.org/tod-standard.html.

LEVINSON, Herbert S. et al. Defining BRT: Quality and cost standards for Bus Rapid Transit systems. Washington, DC: Institute for Transportation & Development Policy, 2003.

MILLER, Eric. Measuring Accessibility: Methods and Issues. International Transport Forum Discussion Papers, No. 2020/25. Paris: OECD Publishing, 2020.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Padrão de Qualidade de BRT (PQ-BRT). Brasília: Ministério das Cidades, 2014.

NETTO, Vinicius M. In: BALBIM, Renato; KRAUSE, Cleandro; LINKE, Clarisse Cunha (Org.). Cidade e movimento: mobilidades e interações no desenvolvimento urbano. Brasília: Ipea, 2016. p. 101–116.

NUZZOLO, A.; RUSSO, F. e CRISALLI, U. (2001) A doubly dynamic schedule-based assignment model for transit networks. Transportation Science, v. 35, n. 3, p. 268–285.

PEREIRA, R. H. M.; SARAIVA, M.; HERSZENHUT, D.; BRAGA, C. K. V. e CONWAY, M. W. (2021) r5r: Rapid realistic routing on multimodal transport networks with R5 in R. Findings, p. 21262. DOI: 10.32866/001c.21262.

POLETTI, F.; HERSZENHUT, D.; PADGHAM, M.; BUCKLEY, T. e NORIEGA-GOODWIN, D. (2024) tidytransit: Read, validate, analyze, and map GTFS feeds. R package version 1.7.0. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=tidytransit.

PROMMAHARAJ, P.; PHITHAKKITNUKOON, S.; DEMISSIE, M. G.; KATTAN, L. e RATTI, C. (2020) Visualizing public transit system operation with GTFS data: a case study of Calgary, Canada. Heliyon, v. 6, p. e03729. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03729.

WRIGHT, Lloyd. Urban Bus Rapid Transit–Theory and Practice. Portland: National Bus Rapid Transit Institute, 2003

Nelson de Oliveira Quesado Filho (nelson.quesado@crateus.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Av. Professora Machadinha Lima, S/N, Príncipe Imperial, Crateús, CE, Brasil.
Caio Gustavo Coelho Guimarães (caio.guimaraes@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.
Francisco Moraes de Oliveira Neto (moares@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

IMPACTO DA PANDEMIA DE COVID-19 NA DEMANDA POR TRANSPORTE COLETIVO NA RMSP: UMA ANÁLISE COM MODELOS BINOMIAIS NEGATIVOS E INTERAÇÕES TEMPORAIS

José de França Bueno[1,2], **Alexandre Frazão D´Andre**[1]
[1]Companhia do Metropolitano de São Paulo, [2]Universidade Paulista, Fatec Barueri

RESUMO
Este estudo avalia como as relações entre variáveis socioeconômicas e viagens por modo coletivo (variável resposta) foram alteradas na Região Metropolitana de São Paulo entre 2017 e 2023. Foram utilizados os microdados das Pesquisas OD 2017 e 2023. Foram empregados modelos de regressão binomial negativa conjuntos, com variável dummy para os anos e termos de interação. Tal metodologia permitiu quantificar diretamente as mudanças nos efeitos das variáveis preditoras ao longo do tempo. Os resultados revelam interações estatisticamente significativas entre ano e matrículas particulares (MatPartic) indicando que o impacto dessa variável sobre o transporte coletivo mudou drasticamente após a pandemia. A influência positiva de MatPartic sobre as viagens coletivas caiu entre 2017 e 2023 cerca de 31,1%. Estes achados fornecem insights cruciais para o planejamento da mobilidade urbana e gestão do transporte público.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A pandemia de COVID-19 impactou de forma aguda os transportes públicos globalmente. Padrões de viagens e a interação das pessoas com o tecido urbano foram significativamente modificados por múltiplos fatores: teletrabalho, educação a distância, crescente adoção de compras online, plataformização de trabalhadores em aplicativos (entrega/transporte) etc. Embora a literatura relacionada aos determinantes da demanda por transporte coletivo e a pandemia seja vasta, poucos estudos, em particular sobre metrópoles latino-americanas, quantificaram mudanças estruturais em tal relação em resposta a choques exógenos como a pandemia COVID-19, com modelagem que permita detecção direta de efeitos temporais. Dentre trabalhos publicados relacionando determinantes do transporte coletivo e a pandemia COVID-19 citamos: Buehler et al. (2025), Basunia et al. (2024) e Burris et al. (2023) por exemplo. Enquanto Buehler et al. (2025) observaram quedas generalizadas no transporte coletivo em cidades globais, nosso estudo avança ao quantificar como variáveis específicas tiveram seus efeitos modificados estruturalmente. Esse trabalho busca preencher tal lacuna de pesquisa.

A Companhia do Metropolitano de São Paulo realiza, a cada dez anos, desde 1967, Pesquisas Origem-Destino (POD) com a última pesquisa antes da pandemia ocorrida em 2017. Dado o impacto da pandemia nos padrões de viagem, a empresa decidiu realizar nova pesquisa em 2023. Assim, a RMSP tem uma base de dados abrangente e confiável coletados antes e após a fase mais aguda da Pandemia de COVID-19, permitindo a comparação entre padrões de viagens pré e pós-pandemia. Os microdados das POD são públicos (Cia do Metropolitano de SP, 2025).

Este trabalho busca quantificar como a pandemia de COVID-19 alterou a relação entre variáveis socioeconômicas (renda, educação etc) e a demanda por transporte coletivo na RMSP, utilizando modelos com interação temporal. Os resultados visam subsidiar políticas de mobilidade pós-pandemia, especialmente em contextos de incerteza da demanda. A detecção de significância estatística nestas interações indicaria que o impacto da variável preditora sobre as viagens coletivas é diferente entre os anos, potencialmente refletindo mudanças induzidas pela Pandemia.

Adicionalmente, um objetivo secundário deste estudo é demonstrar a aplicabilidade de modelos de regressão binomial negativa com interações temporais como uma ferramenta adequada para analisar mudanças na demanda por transporte coletivo sob contextos de choques exógenos (como a pandemia), fornecendo assim uma abordagem relativamente simples e facilmente replicável para outros aglomerados urbanos.

2. METODOLOGIA

Este estudo utilizou uma abordagem quantitativa e exploratória constituindo uma análise comparativa entre dois pontos no tempo, a partir dos microdados das POD 2017 e 2023, realizadas na RMSP. A variável resposta é denominada Coletivo, representando a contagem agregada do número total de viagens por transporte coletivo (ônibus, trem, metrô), agregadas por zona OD (a unidade observacional básica), sendo uma contagem com parâmetro de dispersão $\theta = 3.8410$, apresentando superdispersão e indicando que um modelo Poisson seria inadequado neste caso. Na tabela 1 vemos o sumário estatístico da variável resposta Coletivo para os anos 2017 e 2023. Estamos tomando os valores das variáveis resposta e explicativas nos dois anos 2017 e em 2023.

Tabela 1: sumário estatístico da variável Coletivo, 2017 e 2023

	Min.	1º. Quartil	Mediana	média	3º. quartil	Máximo
2017	976.4	15778.7	25711.0	30744.2	41150.1	126279.2
2023	772.1	12277.4	21.883.2	24699.9	34308.0	103836.1

Não temos valores zero para a variável resposta. Assim, adotou-se um modelo de regressão binomial negativo (adequado para dados de contagem com superdispersão e sem excesso de zeros).
As variáveis explicativas (matrículas em escolas particulares, população e ano) utilizadas no modelo deste estudo são adotadas classicamente em estudos de previsão de demanda. Não incluímos variável teletrabalho ou empregos home-office pois estes dados não foram levantados na POD2017, já que tais valores eram muito baixos. Este estudo propõe abordagem replicável para análise de choques em outras metrópoles, combinando dados longitudinais e interações temporais.
No caso de modelos separados por ano não teríamos como capturar efeitos aditivos do tempo, perdendo a capacidade de modelar um efeito global da variável Ano. A POD2017 considerou 517 zonas de pesquisa, com 35 zonas sem população, enquanto a POD2023 considerou 527 zonas (as zonas adicionais resultaram de quebras de 10 zonas da POD2017, detalhando um pouco mais a pesquisa em tais zonas). Como unidade observacional foram consideradas as zonas OD das pesquisas OD 2017 e 2023. As zonas OD 2023 foram compatibilizadas com as zonas 2017 somando-se as correspondentes zonas 2023 que resultaram das quebras das zonas da POD 2017, resultando em 492 zonas para cada ano, e um conjunto final com 984 observações. As operações estatísticas utilizaram o R-Studio (tendo sido utilizadas as bibliotecas car, MASS, lmtest, ggplot2 e readxl).

3. RESULTADOS

As variáveis consideradas no modelo foram: MatPartic para matrículas em escolas particulares em cada zona, População e o quadrado da população para população da zona, Ano (variável dummy) e a interação Matrículas particulares com Ano. Observamos que matrículas particulares inclui ensino fundamental, médio e superior. O modelo binomial negativo com link log é apresentado na equação abaixo:

$$\log\left(\mathbb{E}(Coletivo)\right) = 8.949 - 0.1104 \cdot Ano + 1.288 \cdot MatPartic + 2.493 \cdot 10^{-5} População - 7.247 \cdot 10^{-11} Populacao^2 - 0.4013 \cdot (MatPartic \cdot Ano) \quad (1)$$

Para obter o valor esperado (média) Coletivo, aplicamos a exponencial à equação anterior:

$$\mathbb{E}(Coletivo) = e^{8.949 - 0.1104 \cdot Ano + 1.288 \cdot MatPartic + 2.493 \cdot 10^{-5} População - 7.247 \cdot 10^{-11} Populacao^2 - 0.4013 \cdot (MatPartic \cdot Ano)} \quad (2)$$

Temos que o modelo não apresentou multicolinearidade: vif (Ano) = 2.17, vif (MatPartic) =2.31, vif (Populacao) = 9.46), vif($População^2$) = 8.88) e vif(Ano:MatPartic) = 3.39. Os valores mais elevados para vif(População) e vif($População^2$) não são preocupantes e até esperados dada a inclusão do termo quadrático no modelo. Se o modelo tivesse apresentado multicolinearidade, a interpretação dos coeficientes teria sido prejudicada e as conclusões mais importantes deste trabalho não poderiam ter sido obtidas.
A saída para o modelo está na tabela 2.

Tabela 2: sumário estatístico para o modelo obtido

Term	estimate	std.error	Z value	Pr(>|z|)
(Intercept)	8.949	5.283e-02	169.399	<2e-16
Ano	-0.1104	4.796e-02	-2.302	0.02133
MatPartic	1.2880	7.897e-02	16.304	<2e-16
Populacao	2.493e-05	1.424e-02	17.508	<2e-16
Populacao^2	-7.247e-11	9.877e-02	-7.337	2.18e-13
Ano:MatPartic	-4.013e-01	1.040e-01	-3.857	0.000115

Da tabela 2 vemos que todas as variáveis são altamente significantes ($p < 0.05$), com especial destaque para o termo de interação Ano:MatPartic (-0.4013) estatisticamente significativo ($p = 0.000115$), indicando uma mudança fundamental no comportamento de viagem por Coletivo entre 2017 e 2023. Como o Ano é variável dummy com Ano = 0 para 2017 e Ano = 1 para 2023, em 2017 o impacto de MatPartic = 1.288. Já em 2023 este impacto será 1.288 – 0.4013 = 0.8867, resultando que o impacto de MatPartic muda entre 2017 e 2023, apresentando queda. Em 2023, o efeito de MatPartic é 33,1% $= (1 - e^{-0.4013}) = (1 - 0.669)$ menor daquele em 2017, uma mudança comportamental relevante. Em outras palavras, em 2023, um aumento nas matrículas particulares resulta em incremento significativamente menor no número de viagens por transporte coletivo do que gerava em 2017, mesmo controlando pelo tamanho da população em cada zona OD. Assim, as matrículas particulares aumentam as viagens em ambos os anos, mas este efeito é atenuado em 2023 pela interação negativa com a variável Ano. Consideramos este o principal achado deste estudo. A significância deste termo de interação é extremamente relevante para modelagem de previsão de demanda e sugere aos planejadores de transporte analisar com atenção a presença ou ausência da variável matrículas particulares em modelos de projeção de demanda, principalmente no cenário pós-pandemia.

Tal elemento de interação apresenta a formalização estatística do efeito disruptivo da pandemia. Se tal termo de interação não fosse considerado, a previsão de Coletivo baseada no impacto de MatPartic em 2023 seria superestimada. Das Pesquisas Origem Destino 2017 e 2023 sabemos que ocorreu queda nas matrículas particulares entre os dois anos da ordem de 5%. Como esta queda é pequena para justificar sozinha a significância da interação, propomos a hipótese de que a significância da interação se deva mais a mudanças na relação comportamental entre transporte e educação privada, não à redução do número de matrículas.

O valor do pseudo-R^2de McFadden é igual a 0.4851, considerado um valor muito bom (acima de 0.4), especialmente para modelos de contagem, significando que o modelo consegue explicar quase 49% da deviance da variável resposta Coletivo.

Para possibilitar comparação com modelo Poisson, foram obtidos os valores AIC para este modelo e um modelo Poisson com as mesmas variáveis. $AIC(Poisson) = \infty$ e $AIC(modelo\ binomial\ negativo\ adotado) = 22161$ reforçando a adoção do modelo binomial negativo.

O valor dos resíduos de Pearson foi 1.044 indicando que o modelo está adequadamente ajustado aos dados, sugerindo superdispersão bem controlada.

Na figura 1 temos os gráficos de dispersão dos resíduos para as variáveis População e MatPartic, garantindo que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno do zero e informando que o modelo está capturando bem a relação entre os preditores e a variável resposta, com a forma funcional do modelo adequada.

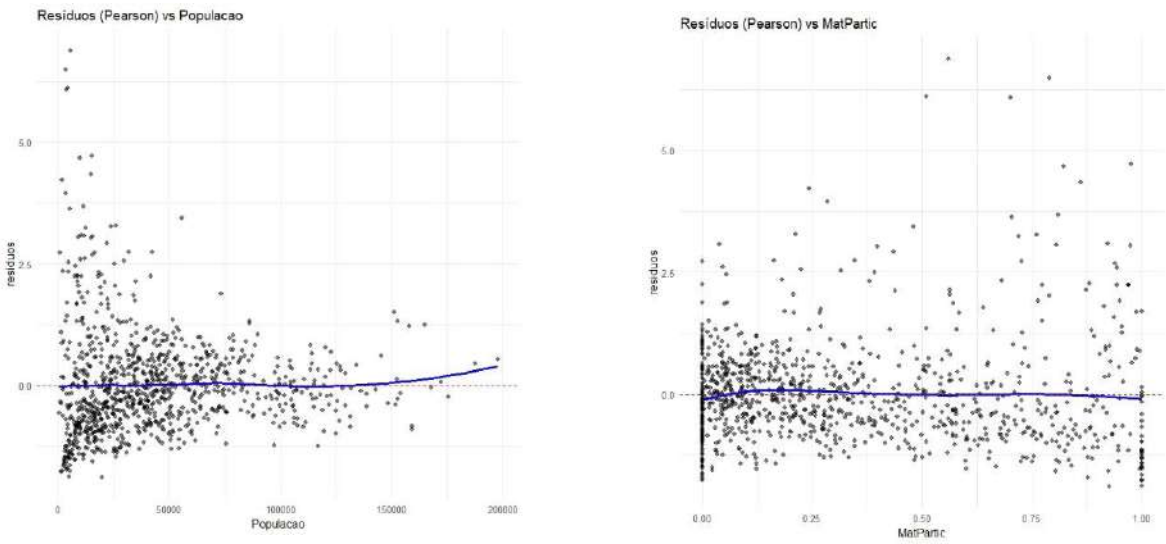


Figura 1: Gráficos de resíduos x População e resíduos x MatPartic

A escolha pelo modelo binomial negativo foi validada por uma série de diagnósticos: (1) a significativa superdispersão dos dados ($\theta = 3.84$) invalidou o uso de um modelo Poisson, cujo AIC foi infinito; (2) após a estimação, o resíduo de Pearson de 1.04 confirmou que a superdispersão foi adequadamente controlada; (3) a ausência de multicolinearidade (com todos os VIF´s < 10) garante a robustez e estabilidade das estimativas dos coeficientes; (4) o pseudo R^2 de McFadden de 0.485 indica um poder explicativo muito bom para o modelo. Por fim, os gráficos de resíduos x valores ajustados e x preditores não revelaram violações graves dos pressupostos do modelo, atestando a qualidade do ajuste final.

É crucial destacar que esta queda de 31,1% no efeito de MatPartic ocorre mesmo após controlarmos estatisticamente para o tamanho da população das zonas OD. Isto indica que a mudança na relação entre matrículas privadas e demanda por transporte coletivo é um fenômeno robusto, não atribuível a simples variações na distribuição populacional da RMSP entre 2017 e 2023. A pandemia parece ter alterado fundamentalmente o comportamento de viagem associado a este segmento´. Contudo, devemos lembrar que recomenda-se investigar, em estudos futuros, a viabilidade de outros modelos controlando-se outras variáveis além da população (Empregos e Renda, por exemplo), para demarcar claramente a variação da influência das matrículas particulares sobre viagens por Coletivo.

4. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Representar o comportamento do transporte coletivo em uma área tão vasta e heterogênea como a RMSP com uma única equação é uma tarefa complexa e desafiadora de ser superada com modelos simples. Vimos neste trabalho que foi necessário considerar um modelo que incluía uma variável e o quadrado da mesma, além da interação entre duas outras variáveis. Modelos mais complexos são mais exigentes quanto à sua interpretação. As limitações aqui identificadas servem de base para as sugestões de pesquisa futura apresentadas na próxima seção.

5. CONCLUSÕES E PRÓXIMOS PASSOS DE PESQUISA

Este estudo quantificou os impactos da pandemia de COVID-19 sobre a demanda por transporte coletivo na RMSP, analisando as mudanças nas relações entre as variáveis socioeconômicas e as viagens modo coletivo entre 2017 e 2023. A metodologia empregada mostrou-se eficaz para detectar e quantificar as dinâmicas temporais nas relações. Como implicação teórica identificamos estatisticamente que a pandemia atuou como um “choque”, alterando relações comportamentais na demanda por transporte. Os principais achados demonstram uma mudança estrutural significativa nos padrões de demanda por transporte coletivo na RMSP:

(1) Impacto dinâmico das matrículas particulares: a interação significativa entre MatPartic e Ano revelou que, embora o aumento de matrículas particulares estivesse associado a um crescimento na demanda por transporte coletivo em 2017, esse efeito positivo diminui substancialmente em 2023, da ordem de 31%. Isso sugere alteração na relação entre o setor de educação privada e a mobilidade urbana, possivelmente devido à maior adesão ao ensino híbrido ou a distância, reduzindo a necessidade de deslocamentos diários.

(2) A técnica aqui apresentada de avaliação de impactos pré e pós-pandemia utilizando variável dummy é facilmente generalizável para outros conjuntos de dados, permitindo a investigação, em outros centros urbanos, da mobilidade em função de variáveis socioeconômicas por meio de modelos de regressão.

Tais achados são relevantes para profissionais que atuam na previsão de demanda por transporte coletivo.

A opção por modelos conjuntos com a inclusão de uma variável dummy para o ano, (Ano = 0 para 2017, Ano = 1 para 2023), e termos de interação com o ano, oferece vantagens sobre a construção de modelos separados para cada ano. Tal abordagem é particularmente vantajosa no estudo de eventos como a pandemia, pois possibilita: (1) detecção e quantificação direta de mudanças nas relações entre variáveis preditoras e variável resposta; (2) aumento do poder estatístico pela combinação dos dados em uma amostra maior, o que não seria possível com a modelagem separada para cada ano; (3) simplificação do modelo pela remoção de interações não significativas (modelos mais parcimoniosos); (4) captura do efeito médio direto da mudança temporal de 2017 para 2023 na variável resposta, ou seja, esta abordagem permite isolar o efeito da passagem do tempo (variável Ano) bem como suas interações com as variáveis socioeconômicas do modelo, o que é fundamental

para a compreensão do impacto de eventos de choque exógenos como a pandemia sobre a variável resposta viagens de transporte Coletivo. Como principal desvantagem desta abordagem temos uma maior complexidade na interpretação na presença de interações significativas, principalmente na hipótese de modelos com interações múltiplas. Esta potencial complexidade também é um dos fatores que nos levam às próximas etapas para esta pesquisa com modelos sub-regionais como será abordado subsequentemente: acreditamos que com o uso de tais modelos a análise das interações seja, por um lado, estatisticamente mais robusta, evidenciando o fenômeno com maior força e clareza ao mesmo tempo em que, por controlar os aspectos socioespaciais, torna sua explicação mais claramente conectada às especificidades de cada trecho do território da RMSP.

Com respeito ao item (1) anterior, no caso deste trabalho foi possível quantificar a queda no efeito da variável MatPart de forma direta (de 1.288 para 0.8867), sendo essa uma das maiores forças desta abordagem. Se tivessem sido adotados modelos separados para 2017 e 2023, teríamos indicações apenas de que teria ocorrido uma mudança, mas não formalizariam a magnitude do choque em uma única equação estatística.

Como próximas etapas para esta pesquisa, sugere-se uma linha de trabalho de criação de modelos sub-regionais que permitirá desdobramentos analíticos para o planejamento de transportes na RMSP. Trata-se de uma abordagem que aprofunda a análise aqui realizada por meio da desagregação espacial. Em vez de utilizar um único modelo para toda a RMSP, propõe-se a construção de modelos separados para cada sub-região (Norte, Sul, Leste, Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Centro).
Com essa estratégia espera-se não apenas aprimorar a aderência aos pressupostos estatísticos, mas também a identificação de padrões de causalidade e comportamento de viagens por modo coletivo que variem significativamente entre as distintas partes da metrópole, melhorando, por conseguinte, a compreensão das mudanças ocorridas na RMSP entre 2017 e 2023.
A adoção de tais modelos regionalizados criará a oportunidade de incluir outras variáveis explicativas que podem ser mais relevantes nesses novos contextos sub-regionais, enriquecendo a análise do impacto da pandemia sobre o transporte coletivo. Tais esforços permitirão uma compreensão mais detalhada das dinâmicas de mobilidade urbana e poderão fornecer subsídios mais específicos para o planejamento de transporte em escala metropolitana e sub-regional.

Neste trabalho identificamos mudança no efeito das matrículas particulares nas viagens por transporte coletivo devido ao choque da pandemia de Covid-19. Cabe também a reflexão para os planejadores de transporte sobre os efeitos futuros de novas regulações (políticas públicas) do Ministério da Educação sobre a educação a distância e seu impacto sobre o uso do transporte coletivo, seja aumentando ou diminuindo a proporção da grade horária dos cursos superiores que pode ser realizada remotamente e em como isso afeta as viagens por transporte coletivo nas metrópoles brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basunia, A.; A. Muttaqi; M. R. H. Bhuiyan e F. A. Badhon (2024) Transportation mobility during COVID-19: a systematic review and bibliometric analysis. *Digital Transportation and Safety*, v. 3, n. 3, p. 169–183.

Buehler, R.; J. Pucher; P. White e G. Currie (2025) Public Transport and the Covid-19 pandemic: a comparative analysis of trends and policies in Great Britain, Germany, the USA, Canada and Australia. *Transportation Research Part* A, v. 199, p. 104549.

Burris, M.; A. Brown; H. Gupta; J. Wang; A. M. Figueroa-Medina; C. A. Valle-Gonzalez e A. F. Valle-Perez (2023) Factors influencing traveler use of transit before, during, and after the COVID-19 Pandemic. *Journal of Public Transportation*, v. 25, p. 100058.

Câmara dos Deputados (2017) Brasil tem 15 milhões de teletrabalhadores. Brasília. Disponível em: https://www.camara.leg.br/noticias/509450-brasil-tem-15-milhoes-de-teletrabalhadores/ (acesso em 04/07/2025).

Goés, G.; F. S. Martins e J. A. S. Nascimento (2022) O trabalho remoto potencial e efetivo no Brasil. Brasília: IPEA. (Texto para Discussão, 2738).

Companhia do Metropolitano de São Paulo (2025) Pesquisas OD 2017 e 2023. Disponível em: https://www.metro.sp.gov.br/pt_BR/pesquisa-od/ (acesso em 02/07/2025).

MOBDATA: SISTEMA DE MONITORAMENTO DO TRANSPORTE PÚBLICO EM TEMPO REAL

Luiz Henrique Freires, Thadeu André Melo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Este estudo apresenta o desenvolvimento do sistema MobData, uma plataforma de monitoramento operacional do transporte coletivo, baseada em dados de bilhetagem eletrônica e rastreamento veicular. O sistema adota arquitetura modular com banco relacional e suporte geoespacial, processando grandes volumes de dados em tempo real. Os resultados demonstram a capacidade de fornecer indicadores como velocidade média, IPK, quilometragem, receita por quilômetro e taxa de ocupação, apoiando a gestão de mobilidade. A ferramenta mostrou-se eficaz para diagnóstico operacional contínuo, com limitações em integração de dados de trânsito e visualização espacial dinâmica em aprimoramento. O estudo reforça o papel dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) na modernização da gestão pública urbana.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

O transporte urbano é vital para o desenvolvimento das cidades. A necessidade de compreensão das relações da demanda, do uso do solo e da infraestrutura é essencial para o reconhecimento de padrões de um ambiente que é dinâmico e mutável (Alcântara *et al*., 2019; UITP, 2018). Os estudos de Silva (2023), Santos (2019) e Freitas (2015) destacam o potencial de construção de informações oriundas dos dados de bilhetagem eletrônica para o planejamento do transporte, análise de oferta e demanda, arrecadação e qualificação do sistema.

Nesse cenário, torna-se essencial a integração entre dados de bilhetagem e de posicionamento para ampliar a capacidade de monitoramento e análise operacional (Yang & Zhang, 2014). O sistema MobData foi desenvolvido justamente para atender a essa necessidade, consolidar informações de localização, operação e finanças em um único ambiente. Sua aplicação é avaliada frente aos desafios contemporâneos da gestão do transporte coletivo, incluindo monitoramento em tempo real, racionalização da oferta, melhoria da qualidade do serviço, controle da relação receita–custos e promoção da transparência na utilização dos recursos públicos.

Sua arquitetura *web* assegura acessibilidade em múltiplos dispositivos, escalabilidade para diferentes contextos municipais e metropolitanos, e flexibilidade na visualização dos dados. A capacidade de converter grandes volumes de dados em indicadores analíticos de desempenho gera inteligência aplicada ao planejamento, regulação e avaliação da qualidade do serviço. O MobData configura-se como ferramenta estratégica no contexto dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), em consonância com as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012).

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento consistiu na criação de uma arquitetura modular para integrar e processar dados em tempo real de bilhetagem eletrônica e rastreamento veicular, coletados a partir do validador, instalado nos veículos das operadoras de transporte coletivo que trafegam na Baixada Fluminense – RJ. As etapas incluíram: i) estruturação da base de dados em módulos funcionais, ii) modelagem das relações entre entidades com suporte geoespacial e iii) definição de indicadores técnicos para avaliação da eficiência operacional.

A arquitetura baseia-se em banco de dados relacional PostgreSQL com extensão PostGIS para garantir indexação e consultas espaciais eficientes, em consonância com as boas práticas de SIGWeb aplicados à mobilidade urbana (Aragão, 2020).

2.1. Estruturação da base de dados em módulos funcionais

Os dados foram organizados em quatro módulos principais:

- Módulo Operacional: Gerencia viagens realizadas (*trip*), trajetórias (*path*), períodos de trabalho (*workPeriod*) e estado em tempo real (*carViewData*).
- Módulo de Bilhetagem: Consolida embarques (*rider, riderSummary*) e classifica bilhetes (*ticketType*).
- Módulo de Infraestrutura: Descreve itinerários através de linhas (*line*), pontos (*checkpoint*) e horários (*lineTime*).
- Módulo de Apoio: Reúne informações cadastrais de operadores (*company*), veículos (*car*), motoristas (*driver*) e usuários (*user, role, access, issuer*).

2.2 Modelagem das relações entre entidades com suporte geoespacial

Chalegre (2011), descreve a integração entre Sistema de Informação Geográfica e Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados com extensões espaciais. A estrutura lógica dessa integração permite representar os dados de forma clara. As dependências entre entidades estão representadas em diagramas relacionais, facilitando a compreensão sistêmica e contribuindo para manutenção e expansão do sistema. A Figura 1 apresenta a estrutura relacional da base de dados.

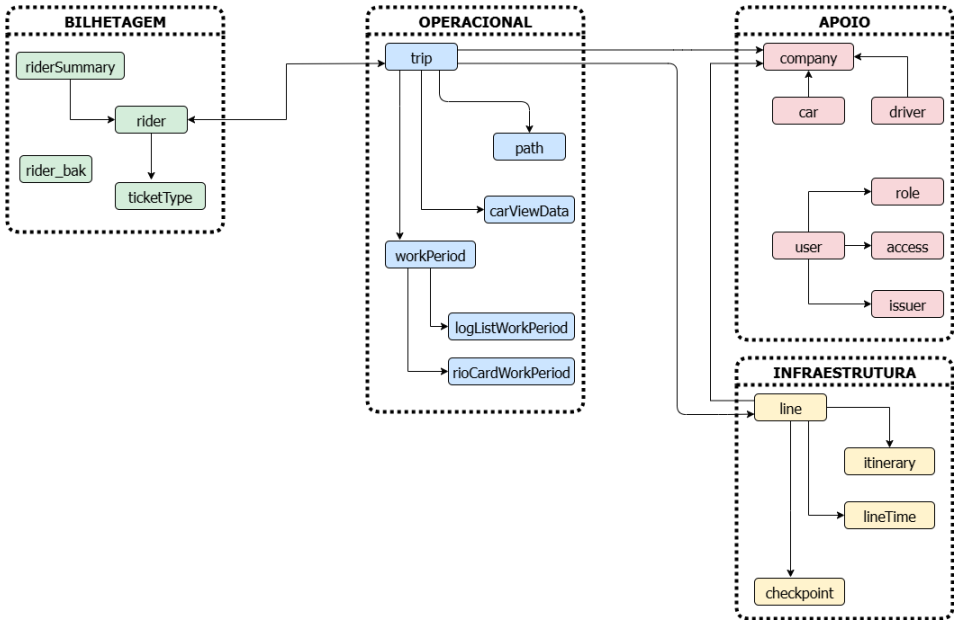


Figura 1: Diagrama da estrutura lógica do Banco de Dados

2.3. Definição do conjunto de indicadores técnicos

Os indicadores exercem papel fundamental no suporte ao gerenciamento do transporte e permitem avaliar variáveis de eficiência operacional, acessibilidade e qualidade do serviço (ITDP, 2017). A seleção (Tabela 1) fundamentou-se em normas técnicas nacionais e internacionais (ITDP, 2017; *European Commission*, 2019).

Tabela 1: Indicadores de Desempenho Operacional

Velocidade média	IPKe - Índice de passageiros equivalentes por quilômetro
Quilometragem percorrida	Oferta e demanda
Tempo médio de viagem	Receita por quilômetro
Receita bruta estimada	Taxa de ocupação
IPK - Índice de passageiros por quilômetro	Mapa de calor da demanda

A estrutura do banco de dados permite estratificar os indicadores por linha, veículo, sentido, faixa horária e condutor. Essa granularidade aprimora a capacidade analítica da plataforma e qualifica sua aplicação no planejamento, regulação e avaliação da operação.

Cabe ressaltar que a inexistência de registros de desembarque nos sistemas de bilhetagem é superada, conforme prática consolidada na literatura (Guerra *et al.,* 2014; Ferreira; Barbosa, 2016), pela inferência do destino a partir do ponto de embarque da viagem seguinte do mesmo usuário, o que permite estimar os fluxos de saída ao longo da linha. Dessa forma, é possível construir a matriz Origem-Destino e, a partir dela, calcular a taxa de ocupação dos veículos entre pontos consecutivos, mediante a calibração entre embarques registrados e desembarques estimados.

3. RESULTADOS

A aplicação demonstrou capacidade de consolidar dados em indicadores operacionais estratégicos. As telas do sistema (Figura 2) demonstram as ferramentas disponíveis, o total de passageiros segmentados entre os tipos de gratuidades e passageiros pagantes, receita acumulada, valor a receber do Bilhete Único Estadual (BUE), quantitativo de carros e linhas em operação, além de permitir comparativo histórico de operação.

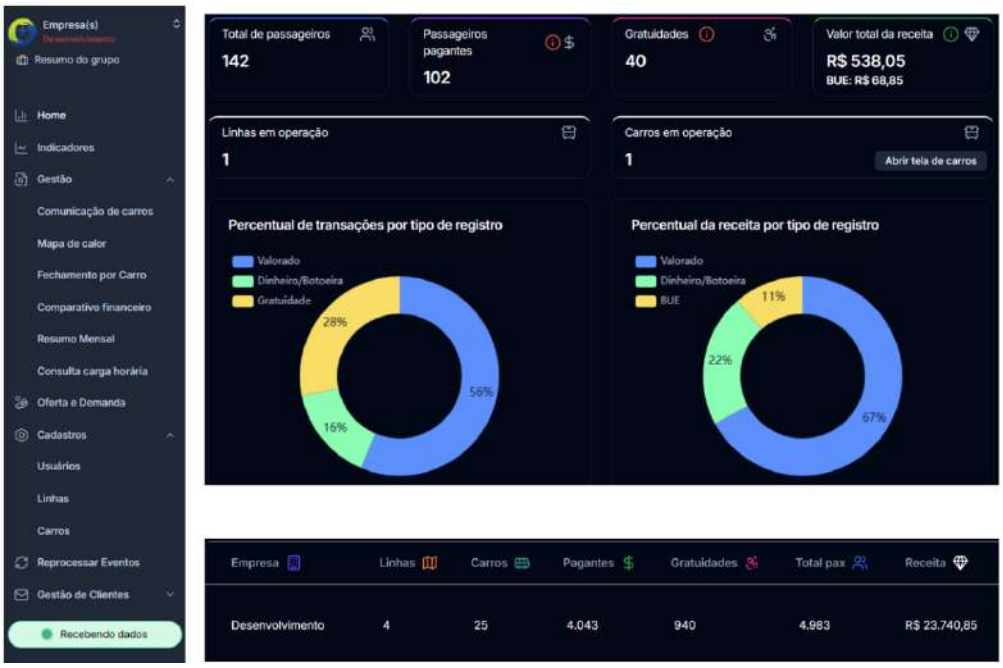


Figura 2: Telas do sistema MobData - Apresentação de dados em tempo real

A Figura 3 apresenta o mapa de calor que representa, em tempo real, a ocupação dos veículos. A variação da intensidade das cores evidencia os locais e períodos de maior concentração de embarques, bem como os trechos com maior fluxo de passageiros. Essa forma de visualização contribui para a identificação de padrões espaciais e temporais da demanda, apoia o planejamento operacional e a adequação da oferta. A correlação entre os dados de bilhetagem e o posicionamento dos veículos permite uma análise dinâmica da demanda e revela variações sazonais e impactos decorrentes de eventos específicos.

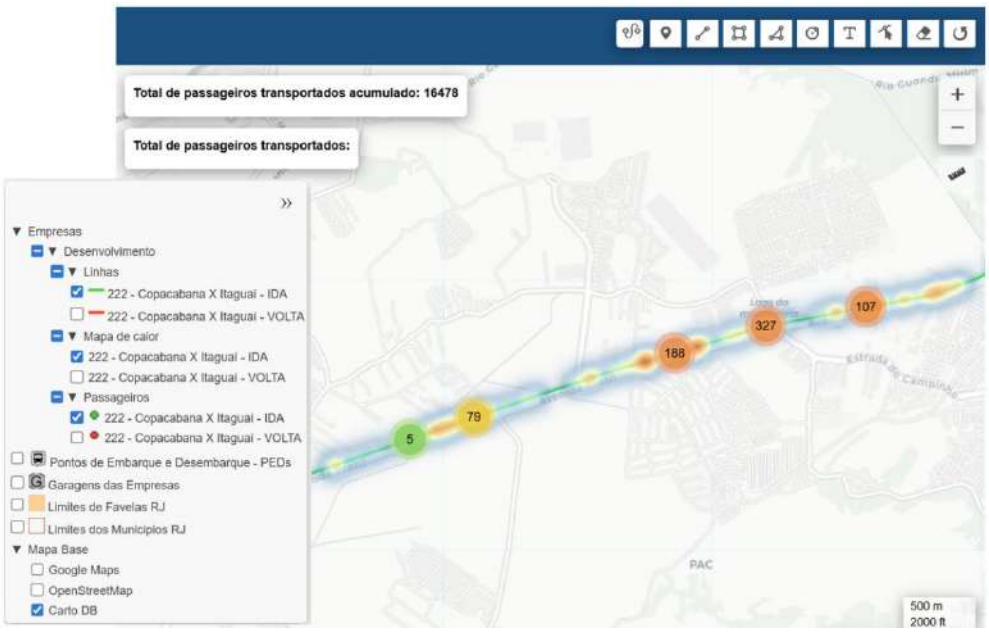


Figura 3: Tela do mapa de calor

A arquitetura com banco relacional e extensão espacial (PostGIS) assegurou consistência analítica e integridade nas consultas. A plataforma apresentou boa estabilidade, resposta eficiente e visualização clara para diferentes perfis de usuários.

4. CONCLUSÕES

O sistema MobData demonstrou eficiência como ferramenta de gestão operacional ao integrar dados de bilhetagem eletrônica e rastreamento veicular em uma plataforma web de monitoramento em tempo real. A

arquitetura modular com suporte geoespacial e indicadores padronizados permitiu consolidar dados em informações estratégicas, ampliar a capacidade de análise e a assertividade das decisões gerenciais.

Os resultados confirmaram o potencial do sistema para acompanhar métricas fundamentais, como IPK, velocidade média, quilometragem, receita por quilômetro e taxa de ocupação. A interface intuitiva e a estrutura relacional espacial possibilitaram análises contínuas, decisões fundamentadas em evidências e reforçar sua utilidade para qualificação do transporte coletivo na Baixada Fluminense-RJ.

Apesar dos avanços, identificaram-se limitações, como a ausência de integração com dados de trânsito em tempo real e de ferramentas preditivas. Recomenda-se, para estudos futuros, ampliar a interoperabilidade do MobData com outras bases urbanas, incorporar algoritmos de previsão e técnicas de inteligência artificial, além de incluir indicadores de sustentabilidade e equidade territorial, de forma a consolidá-lo como instrumento estratégico de planejamento e gestão da mobilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCANTARA, M.N.P.A., GONZAGA, A. S. da S, KNEIB, E. C. Regenerative Mobility: Disruption and Urban Evolution. International Journal on Environmental Science and Sustainable Development. 2019. P. 41 a 55. DOI: 10.21625/essd.v4i3.676

ARAGÃO, M. R. Desenvolvimento de um sistema de informação geográfica web (SIG Web) para a área de saneamento básico utilizando tecnologias livres. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 2, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n2-108. Acesso em: 15 set. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Dispõe sobre as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 jan. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: 15 set. 2025.

CHALEGRE (2011). Avaliação da integração entre sistemas de informações geográficas e sistemas gerenciadores de bancos de dados com extensões espaciais. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

EUROPEAN COMMISSION. Sustainable Urban Mobility Indicators (SUMI) - Handbook. Europa, 2019. Disponível em: https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility_en. Acesso em: 15 set. 2025.

FERREIRA, S. S.; BARBOSA, H. M.. Análise da ocupação veicular para a inserção de beneficiários no transporte coletivo urbano. Journal of Transport Literature, v. 10, n. 2, p. 40–44, abr. 2016.

FREITAS, A. T. Metodologia de caracterização da problemática do sistema de transporte público de passageiros a partir dos dados da bilhetagem eletrônica. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

GUERRA, A. L.; BARBOSA, H. M.; OLIVEIRA, L. K. de. Estimativa de matriz origem/destino utilizando dados do sistema de bilhetagem eletrônica: proposta metodológica. Transportes, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 26–38, 2014. DOI: 10.14295/transportes.v22i3.789. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/789. Acesso em: 15 set. 2025.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY (ITDP). Indicadores de Mobilidade Urbana: Guia para avaliação da efetividade da Política Nacional de Mobilidade Urbana. São Paulo, 2017. Disponível em: https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2019/01/Indicadores_efetividade_PNMU.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

SANTOS, L. F. Priorização de indicadores de qualidade do transporte público: um estudo de caso em Itajubá, Minas Gerais. In: Anais do 33º Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 2019. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/. Acesso em: 15 set. 2025.

SILVA, R. S.; SANTOS, L. F. Integração dos sistemas do transporte público intermunicipal do Rio Grande do Norte: análise da declaração de demanda. Cadernos Gestão Pública e Cidadania, v. 28, 2023. DOI: http://dx.doi.org/10.12660/cgpc.v28.88502. Acesso em: 15 set. 2025.

UITP. Strategy for public transport. 2018. Disponível em: <http://www.uitp.org/strategy-public-transport>. Acesso em: 15 de janeiro de 2025.

X. Yang and L. Zhang, "A dynamic method to monitor public transport based on smart card and GPS Data," 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Qingdao, China, 2014, pp. 924-929, doi: 10.1109/ITSC.2014.6957807.

Luiz Henrique de Carvalho Freires (luizfreires@peu.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana (PEU), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, CT - Bloco D - Sala D101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ, Brasil)
Thadeu André Melo (thadeu.andre@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – COPPE, Programa de Engenharia de Transportes (PET), Av. Horácio Macedo, 2030 - Bloco H - Sala 106 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ, Brasil)

TECNOLOGIA A SERVIÇO DA MOBILIDADE: A CONTAGEM DE PASSAGEIROS EM TEMPO REAL COMO PILAR DO PLANEJAMENTO

Daniel Petersen[1], Fernando Dutra Michel[2]
[1]Digicounter Produtos Eletrônicos Ltda, [2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN

RESUMO
Este comunicado técnico apresenta o desenvolvimento de um sistema de contagem de passageiros que integra tecnologia embarcada, conectividade em nuvem e processamento de dados. A solução foi concebida no contexto de uma empresa de tecnologia especializada em soluções para o transporte público e privado. A contagem automatizada de passageiros é explorada aqui não apenas como um componente técnico, mas como um pilar essencial para o planejamento eficaz da mobilidade urbana, com potencial de impactar positivamente a alocação de recursos, a definição de itinerários e a melhoria da qualidade do serviço.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente urbanização e o aumento da demanda por transporte coletivo têm imposto desafios significativos à gestão eficiente de frotas e à alocação adequada de recursos operacionais. Nesse cenário, a identificação do fluxo de passageiros é uma informação estratégica para transformar a operação de transporte coletivo em uma atividade mais inteligente, previsível e responsiva. No entanto, para alcançar esse objetivo, é fundamental um elevado grau de precisão na contagem georreferenciada dos passageiros, bem como o vínculo dessas informações às rotas realizadas, fatores essenciais para a elaboração de planejamentos mais assertivos (Patel *et al.*, 2024). Além disso, a conectividade em nuvem pode viabilizar a oferta, aos usuários, de informações em tempo real sobre a disponibilidade e a ocupação de cada veículo (Rawat *et al.*, 2024).

Atualmente, diversas tecnologias são analisadas com o objetivo de coletar dados sobre o fluxo dos passageiros, sendo que o grau de precisão alcançado em cada uma delas depende da composição técnica e da metodologia utilizada. Entre os modelos aplicados, destacam-se a contagem de passageiros pela variação de peso do veículo (Rawat *et al.*, 2024); a quantificação dos pagamentos realizados por meio do sistema de cobrança automática (Yin *et al*., 2024); a detecção de endereços *MAC* de dispositivos móveis *WiFi* (Wang e Ho, 2024); a interferência em cortinas óticas infravermelha (Mohanraj *et al*., 2024); e o uso de algoritmos de processamento de imagens e técnicas de visão computacional (Moreno *et al.*, 2024). Barabino *et al.* (2025) apresentam um estudo em que avaliam diversas dessas tecnologias quanto a sua precisão na contagem de passageiros, além de destacarem outros métodos complementares, como a contagem de passageiros por tapetes sensores.

2. PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

O sistema de contagem de passageiros aqui apresentado teve sua primeira versão instalada em campo no ano de 1988, sendo o produto que motivou a fundação da empresa responsável pelo seu desenvolvimento. Essa versão inicial foi aplicada em um micro-ônibus de uma porta, operando em serviço seletivo, com o objetivo principal de controlar a evasão de receita. Instalado próximo à porta de acesso ao veículo, o sistema utilizava tecnologia de cortina ótica com fotocélulas, tendo a contagem processada por lógica de relés. As informações geradas eram apresentadas em um dispositivo eletromecânico numérico, armazenado dentro do veículo, em um gabinete metálico lacrado.

O equipamento passou por diversas atualizações e, com a finalidade de aprimorar a precisão de contagem, passou a utilizar cortina ótica por infravermelho, circuitos eletrônicos microcontrolados e memória estática para armazenar dados, os quais eram posteriormente recolhidas por um coletor de dados manual e transferidas para um *software desktop* instalado em um microcomputador. As viagens eram iniciadas e finalizadas em um botão acionado pelo motorista, o que permitia separar as contagens realizadas durante a operação daquelas realizadas fora da operação.

Muitos procedimentos operacionais foram automatizados com a integração de um módulo AVL (*Automatic Vehicle Location*) ao sistema. O georreferenciamento e a transmissão dos dados para uma plataforma Web, permitiram o reconhecimento automático das viagens e das rotas realizadas pelos veículos. A partir dessa evolução, o produto da empresa passou a ser a informação gerada e fornecida em tempo real para a gestão operacional, incluindo os dados de contagem de passageiros. Nesse estágio, as informações do sistema

passaram a ser utilizadas para a análise da demanda, o planejamento e controle operacional, o monitoramento da evasão de receita e a comunicação com os passageiros sobre a ocupação dos veículos. Esses dados são disponibilizados por meio de um aplicativo, que apresenta a lista das rotas mais próximas ao local de embarque do usuário, bem como a aproximação dos dois próximos veículos disponíveis e o respectivo nível de ocupação de cada um no momento da consulta, conforme ilustrado na Figura 1 abaixo.

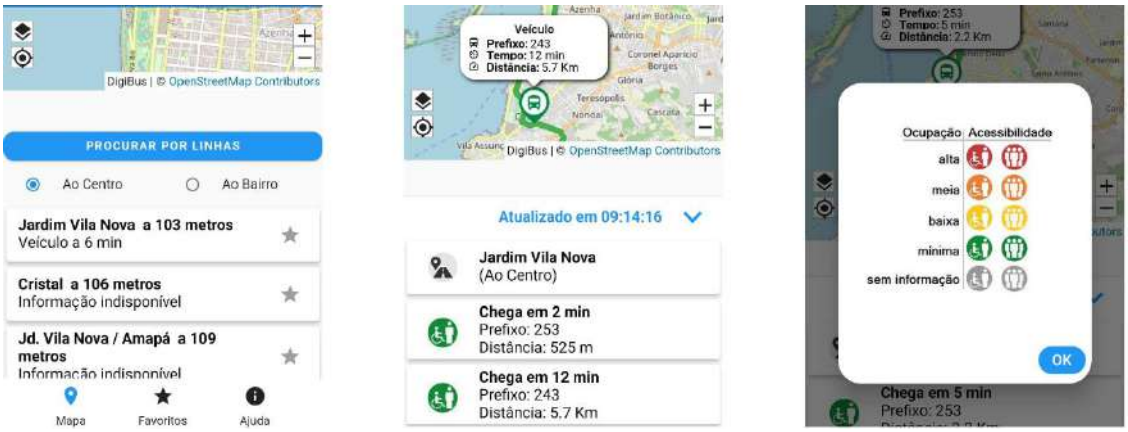


Figura 1: APP de informação ao passageiro sobre a disponibilidade e ocupação dos veículos

Atualmente, esse sistema opera integrado a um modal que utiliza pagamento por meio de bilhetagem eletrônica, porém sem a presença de catraca mecânica ou qualquer outro obstáculo arquitetônico. Todo controle da evasão da receita é realizado pelo contador de passageiros, com base em um sistema contagem que utiliza cortina ótica de luz infravermelha, garantindo uma precisão de contagem de 98%. O sistema de informações compara, em tempo real, as contagens registradas com os dados do validador, somados às passagens vendidas diretamente pelo motorista, identificando eventuais divergências. Quando essas ocorrem, o sistema aponta o provável momento e local em que houve o embarque de um passageiro sem a devida declaração de pagamento.

Sendo assim, o sistema de contagem de passageiros por cortina ótica tem alcançado precisão satisfatória para atender modais seletivos ou mesmo rodoviários, nos quais a movimentação dos passageiros ocorre de forma naturalmente disciplinada. No entanto, por intermédio da tecnologia de cortina ótica, não foi possível alcançar uma precisão compatível nas portas dos veículos de transporte público urbano, devido às larguras dessas portas e à movimentação desordenada típica desse modal. No passado, resultados mais positivos forma obtidos quando as portas largas eram equipadas com um divisor central, o que orientava melhor o fluxo dos passageiros e facilitava a contagem.

Para superar esse desafio, foi desenvolvido um novo contador de passageiros baseado em um algoritmo de processamento de imagens proprietário, executado em um ambiente *Linux,* rodando em um computador de placa única. O dispositivo possui uma câmera de captura acoplada, cujas imagens são pré processadas localmente, e os resultados são transmitidos, por meio de um protocolo especifico, via rede multiponto, para um módulo AVL, responsável pela troca de informações embarcadas com a base de dados da plataforma. Com essa arquitetura, o sistema é capaz de identificar múltiplas entradas, inclusive em situações de embarque e desembarque simultâneos. A Figura 2, a seguir, apresenta um diagrama de conectividade dos equipamentos embarcados de contagem por imagem.

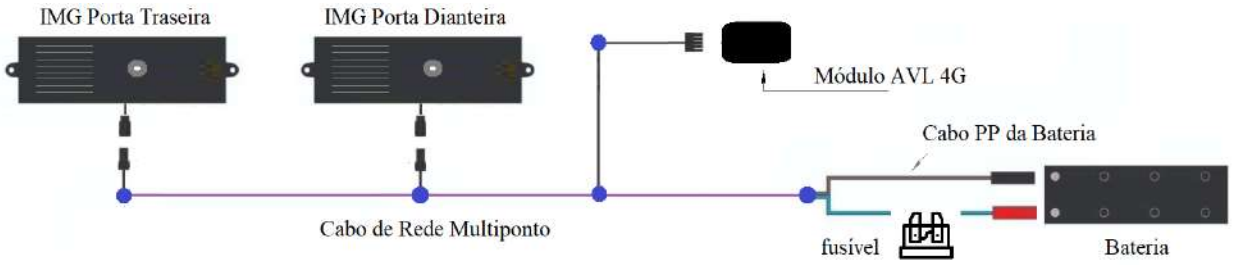


Figura 2: Diagrama de interligação do sistema embarcado para contagem de passageiros em duas portas

O dispositivo de contagem é instalado no teto da porta do veículo, conforme indicado na Figura 3, a seguir, e conta com recursos para a calibração da área de contagem, visando aprimorar a precisão das contagens.



Figura 3: Módulo de contagem de passageiros instalado no teto de uma porta

A metodologia utilizada para verificar a acurácia das informações geradas constitui na comparação entre os resultados obtidos pelo sistema e aqueles registrados por meio da contagem manual de passageiros, realizada a partir da observação de imagens gravadas por um sistema DVR instalado no veículo. O veículo avaliado possuí três portas de 1,4 metros de largura cada opera em uma modalidade troncal, permitindo o embarque e desembarque em quaisquer uma das portas. Foram registradas situações com até 50 passageiros embarcando ou desembarcando em um único momento em uma única porta. O veículo chega a transportar mais de 2000 passageiros por dia.

3. RESULTADOS

Para realização dos testes de acurácia, após a etapa de calibração dos equipamentos, foram analisadas 10 viagens, contabilizando separadamente os dados de cada uma das três portas. A média de diferença identificada por porta foi de -0.9% para embarques e 1.8% para desembarques. Após esse período inicial, as avaliações passaram a considerar a simetria entre as contagens dos equipamentos, com o objetivo de verificar a constância da precisão ao longo do tempo. Para isso, comparou-se a soma dos embarques de todas as portas com a soma dos desembarques, que em condições normais, deveriam estar equilibradas. A Figura 4, apresentada a seguir, mostra um relatório com os percentuais de diferença entre embarques e desembarques ao longo de 10 dias de operação do veículo de três portas utilizado nos testes. Ao lado, é exibido um relatório comparativo com os percentuais de diferença em 10 veiculos diferentes, todos avaliados no mesmo dia. Na aplicação real, observou-se uma leve redução na precisão em alguns veículos. Os veículos pertencem a um cliente que instalou os contadores de passageiros em 100% da frota, composta por 35 veiculos de duas portas, cuja instalação ocorreu em abril de 2025. O cliente opera com sistema de tarifa zero, um tipo de serviço especialmente propício à utilização de sistemas de contagem de passageiros, dada a ausência de catracas na operação.

Relatório Sintético Funcional 00:00:05

Faça seu Filtro | Filtrar

Carro	Data Hora	Sub Ad	Desc Ad	Dif	%
787	01/10/2024	2485	2439	46	1%
787	02/10/2024	2117	2075	42	1%
787	03/10/2024	1514	1491	23	1%
787	04/10/2024	693	678	15	2%
787	06/10/2024	1	2	-1	-50%
787	07/10/2024	1267	1317	-50	-3%
787	08/10/2024	966	983	-17	-1%
787	09/10/2024	11	19	-8	-42%
787	10/10/2024	935	925	10	1%
787	11/10/2024	565	568	-3	0%

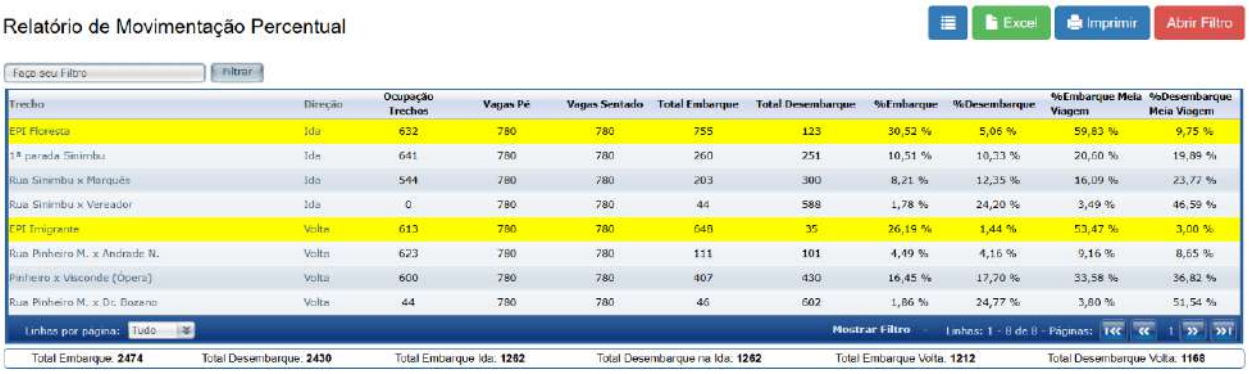
Relatório Sintético Funcional 00:00:00

Faça seu Filtro | Filtrar

Carro	Data Hora	Sub Ad	Desc Ad	Dif	%
001	08/07/2025	964	1040	-76	-7%
002	08/07/2025	872	943	-71	-7%
003	08/07/2025	1243	1209	34	2%
004	08/07/2025	31	28	3	9%
005	08/07/2025	1320	1349	-29	-2%
006	08/07/2025	2035	2096	-61	-2%
007	08/07/2025	1836	2011	-175	-8%
008	08/07/2025	924	915	9	0%
009	08/07/2025	898	882	16	1%
010	08/07/2025	407	433	-26	-6%

Figura 4: Precisão de contagem em um veículo em comparação entre o veículo teste e aplicação real

O relatório apresentado a seguir, na Figura 5, mostra informações de contagem de passageiros por trechos pré definidos de uma rota determinada, durante a operação do período pesquisado. As informações disponíveis contemplam a oferta de vagas e a ocupação registradas por trecho, o total de embarque e desembarque por trecho e os percentuais de movimentação de embarque e desembarque por trecho, considerando o percentual relativo à viagem integral de ida e volta e, nas duas últimas colunas, considerando o percentual relativo à meia viagem.


Relatório de Movimentação Percentual

Excel | Imprimir | Abrir Filtro

Faça seu Filtro | Filtrar

Trecho	Direção	Ocupação Trechos	Vagas Pé	Vagas Sentado	Total Embarque	Total Desembarque	%Embarque	%Desembarque	%Embarque Meia Viagem	%Desembarque Meia Viagem
EPI Floresta	Ida	632	780	780	755	123	30,52 %	5,06 %	59,83 %	9,75 %
1ª parada Sinimbu	Ida	641	780	780	260	251	10,51 %	10,33 %	20,60 %	19,89 %
Rua Sinimbu x Marquês	Ida	544	780	780	203	300	8,21 %	12,35 %	16,09 %	23,77 %
Rua Sinimbu x Vereador	Ida	0	780	780	44	588	1,78 %	24,20 %	3,49 %	46,59 %
EPI Imigrante	Volta	613	780	780	648	35	26,19 %	1,44 %	53,47 %	3,00 %
Rua Pinheiro M. x Andrade N.	Volta	623	780	780	111	101	4,49 %	4,16 %	9,16 %	8,65 %
Pinheiro x Visconde (Ópera)	Volta	600	780	780	407	430	16,45 %	17,70 %	33,58 %	36,82 %
Rua Pinheiro M. x Dc. Bozano	Volta	44	780	780	46	602	1,86 %	24,77 %	3,80 %	51,54 %

Linhas por pagina: Tudo | Mostrar Filtro | Linhas: 1 - 8 de 8 - Páginas: 1

Total Embarque: **2474** | Total Desembarque: **2430** | Total Embarque Ida: **1262** | Total Desembarque na Ida: **1262** | Total Embarque Volta: **1212** | Total Desembarque Volta: **1168**

Figura 5: Relatório percentual de movimentação – avalia a movimentação nos trechos da rota

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de contagem de passageiros desenvolvido mostrou-se eficaz na geração de dados precisos e consistentes, essenciais para o planejamento e a gestão do transporte coletivo. A acurácia verificada nos testes e a estabilidade das medições entre portas, evidencia a robustez da solução.

Ainda há um amplo campo de pesquisa voltado à identificação de formatos ideais para a apresentação da informação, com o objetivo de embasar ações mais assertivas frente à demanda dos usuários passageiros. O acesso aos dados em tempo real possibilita a adoção de medidas imediatas diante das demandas não prevista, estratégia que podem necessitar de preparação prévia.

Dessa forma, a contagem automática de passageiros tende a se consolidar como uma ferramenta fundamental na construção de cidades mais inteligentes, sustentáveis e centradas nas necessidades reais da população. O avanço desse tipo de solução, aliado a uma visão integrada de mobilidade, tem o potencial de transformar a forma como se planeja e executa o transporte coletivo no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barabino B., Raccagni L. e Ventura R. (2025). Accuracy of Automatic Passenger Counting in Open Mass Transit Systems: Insights from Italy. Open Transp J, 19: e26671212383074.

Mohanraj P., Rajasekar T., Jeeva V., Jerrin J. e Nithinkrishna P. (2024). Smart Public Transport Monitoring and Demand Analysis with Machine Learning, *5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Coimbatore, India, 2024, pp. 1674-1679

Moreno Rendon W. D., Burgos Anillo C., Jaramillo-Ramirez D. e Carrillo H. (2023) "Passenger Counting in Mass Public Transport Systems using Computer Vision and Deep Learning," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 4, pp. 537-545,

Patel K., Patel D., Chaudhary N., Thakkar D., Savaliya P. and Mistry A. (2024) Advance Public Bus Transport Management System: An Innovative Smart Bus Concept, *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, 2024, pp. 1-6

Rawat N., Rai A. e Agarwal A. (2024). Deep Learning-Based Passenger Counting System Using Surveillance Cameras, *16th International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 2024, pp. 234-239

Wang H. e Ho I. W. H. (2024). CSI-based Passenger Counting on Public Transport Vehicles with Multiple Transceivers, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Dubai, United Arab Emirates, pp. 1-6

Yin, T., Nassir, N., Leong, J. *et al.* (2025) Transferable supervised learning model for public transport service load estimation. *Transportation* 52, 29–54

Fernando Dutra Michel (michel@producao.ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN, Rua Osvaldo Aranha, 99 - 5º andar, Bairro Bom Fim, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
Daniel Petersen (daniel.petersen.br@gmail.com)
Digicounter Produtos Eletrônicos Ltda, Alameda Original, 55, Jardim Carvalho, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

Modelagem Aplicada ao Planejamento do Transporte de Passageiros

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA E QUALIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DA CIDADE DE RIO VERDE-GO

Fernanda Geovanna Alves da Silva Martins[1], Philippe Barbosa Silva[1], Magaly Natalia Pazzian Vasconcellos Romão[2]

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano; [2]Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

RESUMO

O transporte público é fundamental para a sustentabilidade urbana, pois reduz o uso de veículos individuais, diminui a poluição e contribui para a qualidade de vida. Entretanto, o crescimento desordenado das cidades, o aumento da frota de carros particulares e a falta de planejamento integrado têm causado congestionamentos, baixa acessibilidade e serviços insatisfatórios. Para garantir qualidade e eficiência, é essencial conhecer as necessidades dos usuários e monitorar indicadores de desempenho, subsidiando políticas públicas eficazes. Em Rio Verde (GO), o sistema de transporte público urbano foi reestruturado, e este trabalho visa analisar sua qualidade e eficiência. A caracterização física e operacional do sistema, aliada ao cálculo de indicadores e à percepção dos usuários, possibilitará propor intervenções que melhorem o serviço ofertado e a satisfação dos passageiros, incentivando o uso do transporte público e contribuindo para uma mobilidade urbana mais sustentável em Rio Verde.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

A priorização do transporte público urbano, conforme preconizado pela Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012) mediante oferta de serviços de qualidade, se reveste de importantes benefícios à mobilidade nas cidades. Para Tanure e Neto (2022), garantir a qualidade do transporte público é uma exigência da sociedade moderna, sendo essencial para atrair mais usuários, reduzir tarifas e assegurar níveis mínimos de atendimento e satisfação. Além disso, caracterizar o perfil dos usuários é fundamental para orientar melhorias nos serviços e formular políticas de mobilidade eficazes, uma vez que fatores como frequência, confiabilidade, segurança e aversão a transbordos impactam diretamente a percepção da qualidade (Padillo et al., 2024). Coletar dados detalhados sobre essas variáveis permite estruturar melhor o serviço, evitar superestimar demandas e oferecer uma alternativa mais sustentável para todos. Naim et al. (2021) destacam ainda que o uso de indicadores de desempenho é vital para monitorar rotas, identificar gargalos operacionais e orientar decisões estratégicas de investimento, contribuindo para um sistema mais eficiente e alinhado às expectativas dos passageiros. Diante desse cenário, este trabalho propõe analisar os parâmetros de qualidade e eficiência do TPU em Rio Verde (GO) — município com cerca de 238 mil habitantes (IBGE, 2025) e referência no agronegócio — que, mesmo após investir em tecnologias inteligentes para modernizar o serviço, ainda enfrenta incertezas quanto à adesão da população a esse modo de transporte. Assim, pretende-se identificar caminhos para aprimorar o sistema, evitar a insatisfação dos usuários e promover uma mobilidade mais sustentável, contribuindo para o alcance do ODS 11 — Cidades e Comunidades Sustentáveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

O transporte público exerce papel essencial na dinâmica urbana, sobretudo em países de dimensões continentais como o Brasil, pois um sistema de TPU eficiente e bem planejado é indispensável para promover a sustentabilidade das cidades, reduzir a dependência de veículos individuais e gerar benefícios como menor poluição, ar mais limpo e trânsito mais fluido (Girotti et al., 2024). No entanto, a urbanização acelerada, a valorização dos centros urbanos, o crescimento populacional e o aumento da frota de veículos particulares têm comprometido a função das cidades como espaços acessíveis e habitáveis (Ardila-Gomez e Darido, 2025). A falta de planejamento integrado agrava problemas como superlotação, custos operacionais elevados, baixa mobilidade e queda na qualidade de vida dos usuários (Daroncho et al.,2024)

A importância e a necessidade do estudo da qualidade e eficiência no transporte público são cruciais para o desenvolvimento urbano sustentável e a melhoria da qualidade de vida da população. Uma análise aprofundada desses aspectos permite compreender as interações complexas entre a infraestrutura, a operação do serviço e a percepção dos usuários, que são fatores determinantes para a satisfação e a escolha modal (Padillo et al., 2024). Em países em desenvolvimento, onde a escassez de dados e a necessidade de otimização de recursos são prementes, a utilização de indicadores de desempenho torna-se fundamental para monitorar o desempenho, identificar ineficiências e orientar a tomada de decisões estratégicas (Naim et al., 2021). Estudos de caso, como

o de Juiz de Fora, demonstram como a variação na tarifa e o aumento da frota de veículos particulares impactam diretamente a demanda e a sustentabilidade do sistema (Correa et al., 2021). De acordo com Farias et al. (2024), a qualidade no transporte público é fundamental para a mobilidade urbana e a qualidade de vida. Em Maceió, pesquisa apontou alta desaprovação dos usuários em relação à tarifa, informações e frequência do serviço, destacando ainda a segurança contra assaltos e assédios como uma preocupação central para o bem-estar dos passageiros. Tanto Maceió quanto Juiz de Fora, têm linhas de ônibus urbanos operadas por empresas privadas, que são a espinha dorsal do seu transporte público. As duas cidades buscam a integração do sistema de transporte público, permitindo que os passageiros façam integração temporal entre diferentes linhas, além de utilizarem cartões de pagamento para as tarifas, assim como no município de Rio Verde, Goiás que servirá de estudo para esse trabalho. Diante desse cenário, uma pesquisa contínua sobre a qualidade e a eficiência é necessária para subsidiar políticas públicas que visem reverter a queda da demanda, promover a equidade e garantir um transporte público mais atraente e eficaz.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos da dissertação, a metodologia compreenderá cinco etapas principais, detalhadas na sequência. Importante destacar que a dissertação se encontra na fase inicial, com atividades voltadas à revisão de literatura e delimitação do objeto de estudo.

3.1 Revisão de literatura

A Revisão de Literatura tem o objetivo de buscar, selecionar e revisar trabalhos (artigos, teses, dissertações, livros e relatórios) que estejam associados a análise da qualidade e eficiência dos sistemas de transporte urbano (TPU). Ela permitirá analisar os impactos na operação do sistema decorrentes dos investimentos feitos nos sistemas de transporte, sejam eles em infraestrutura, tecnologia ou sustentabilidade. Identificar as oportunidades de avanço na pesquisa, os métodos empregados e resultados obtidos, servindo como subsídios ao desenvolvimento do presente trabalho.

3.2 Delimitação e caracterização do objeto de estudo

Esta etapa será dedicada a delimitar e caracterizar do objeto de estudo, o sistema de TPU de Rio Verde após sua reestruturação. A caracterização contemplará aspectos físicos e operacionais, tais como: trajetos, linhas, pontos de parada, terminais de integração, frota veicular, tempo de espera, frequência dos veículos, entre outros.

3.3 Coleta de Dados

Não existem dados anteriores sobre o TPU de Rio Verde. Sendo assim, para caracterização dos usuários do sistema e levantamento de suas necessidades, serão realizados questionários qualitativos (pesquisa de campo), contemplando, mas não se restringindo às questões: origem/ destino; motivo da utilização, idade, horários de utilização, percepção de qualidade do sistema e ainda os fatores que motivam ou inibem a utilização do sistema. Além disso, serão solicitados dados do sistema em operação, como quilometragem das linhas, quantidade de passageiros, e outros dados do transporte público vigente. Estes serão solicitados à Secretaria de Desenvolvimento e Mobilidade Urbana, do município de Rio Verde, Goiás.

3.4 Análise dos Dados

A partir dos dados coletados, será possível calcular indicadores mensais desde a implantação do novo modelo de transporte na cidade E com base nos estudos revisados e nos questionários aplicados, será possível identificar técnicas que relacionem os resultados dos indicadores às percepções e respostas da população usuária do transporte público. Como resultado central, busca-se compreender os fatores que influenciam a adesão ou a rejeição ao sistema, de modo a subsidiar estratégias voltadas para o aumento da eficiência e da qualidade do serviço.

3.5 Proposição de Contramedidas

Após as análises, serão desenvolvidas propostas de intervenção nas fragilidades, em busca de melhorias na qualidade e eficiência do sistema. Essas intervenções incluirão ações específicas para aprimorar a pontualidade, a frequência das linhas, a segurança e o conforto dos passageiros, esperando-se que se reverta no aumento da adesão da população ao sistema.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados esperados deste trabalho consistem na elaboração de um diagnóstico completo e detalhado do sistema de TPU de Rio Verde, envolvendo tanto a análise de indicadores operacionais e a caracterização do sistema quanto o perfil dos usuários. Pretende-se identificar as principais dificuldades e desafios que afetam a eficiência, pontualidade, segurança e qualidade do serviço, além de compreender os fatores que motivam ou desestimulam a adesão ao transporte coletivo. Para isso, serão coletadas informações relevantes sobre origem e destino, faixa etária, horários de uso, motivos de utilização ou rejeição do serviço, bem como as principais demandas e percepções dos usuários. A partir desse diagnóstico, o estudo fornecerá dados concretos e atualizados que subsidiem o poder público e a empresa concessionária na proposição de intervenções e melhorias na gestão, operação e planejamento do TPU. Como desdobramento, espera-se que o trabalho contribua para adequações no sistema, de modo que este se torne mais eficiente, confiável e atrativo, elevando a satisfação dos usuários, incentivando o uso do transporte público e contribuindo para uma mobilidade urbana mais sustentável, eficiente e inclusiva no município.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ardila-Gomez, A. e G. Darido, (2025) Public Transport Reform in Developing Countries: Lessons from Experience. *Transportation Research Procedia*, v. 82, p. 2737-2749. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.216.

Brasil. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 4 jan. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: 9 jul. 2025.

Correa, V. P. et al. (2021) O uso do transporte público urbano em cidades médias brasileiras: um estudo de caso sobre o número de passageiros em Juiz de Fora, MG. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, [sl], v. 70. DOI: https://doi.org/10.17271/2318847297020212807.

Daroncho, et al. (2024) Oscilações na demanda por ônibus na Cidade de São Paulo: Análise temporal de 2014 a 2023. *Cidades Verdes*, v. 12, n. 38. DOI: https://doi.org/10.17271/23178604123820245452.

Farias, C. B. S. et al. (2024) Análise dos fatores de qualidade do transporte público coletivo urbano em Maceió-AL. *Revista Sítio Novo*, Palmas, v. 8, n. 2, p. 76–96. DOI: https://doi.org/10.47236/2594-7036.2024.v8.i2.76-96p.

Girotti, C. et al. (2024.) Urban mobility and air pollution at the neighbourhood scale in the Megacity of São Paulo, Brazil. *Discover Cities*, v. 1, p. 13. DOI: https://doi.org/10.1007/s44327-024-00016-4.

IBGE, (2025) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/go/rio-verde.html>. Acesso em 20 de junho de 2025.

Naim, M. N. H. et al. (2022) Assessing the performance of public transport services in a developing country: A case study using data envelopment analysis. *Growth and Change*, v. 53, n. 1, p. 377–409. DOI: https://doi.org/10.1111/grow.12588.

.Padillo, A. R. et al. (2024) Analysis of the factors influencing university community satisfaction about public transport trips in small and medium-sized cities in Brazil. *Research in Transportation Business & Management*, [S. l.], v. 57, p. 101233. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101233.

Tanure, V. R. M. e N. F. Santos Neto, (2022) Uma revisão bibliográfica dos indicadores de qualidade do transporte coletivo urbano. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 36., Fortaleza-CE. *Anais eletrônicos...*. [S. l.]: Galoá Proceedings, 2022. p. 1-12. Disponível em: https://proceedings.science/anpet-2022/trabalhos/uma-revisao-bibliografica-dos-indicadores-de-qualidade-do-transporte-coletivo-ur?lang=pt-br >. Acesso em: 24 jun. 2025.

Fernanda Geovanna Alves da Silva Martins (fernandageovanna@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano);
Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Philippe Barbosa Silva (philippe.silva@ifgoiano.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano);
Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Magaly Natália Pazzian Vasconcellos Romão (magaly.romao.jau@gmail.com)
Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, Campus de Jaú;
Rua Frei Galvão, s/n, Jardim Pedro Ometto, Jaú, São Paulo, Brasil

CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS EM FORTALEZA: ANÁLISE BASEADA EM INDICADORES OPERACIONAIS

Evanilson de Lima Siqueira, Francisco Moraes de Oliveira Neto
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
O transporte público desempenha um papel fundamental na mobilidade urbana e na sustentabilidade das cidades. A confiabilidade do serviço é um fator essencial para atrair e manter usuários, impactando diretamente na eficiência operacional e na satisfação dos passageiros. Este estudo tem como objetivo analisar a variabilidade dos intervalos entre ônibus (*headways*) e dos tempos de viagem no sistema de transporte público por ônibus em Fortaleza, com base em dados de GPS da frota. Busca-se identificar padrões espaciais e temporais de confiabilidade, a partir de indicadores, contribuindo para o entendimento dos fatores que influenciam a oferta do serviço. A metodologia propõe a definição de métricas baseadas em literatura, visando subsidiar o planejamento urbano e apoiar a tomada de decisão por parte dos gestores públicos.

1. INTRODUÇÃO

O transporte público desempenha papel crucial na mobilidade urbana, promovendo acesso a serviços essenciais e contribuindo para a redução dos congestionamentos e emissões. Em meio a uma crescente valorização do transporte coletivo e ativo frente às metas ambientais e sociais (Diab et al., 2015), destaca-se a importância da confiabilidade como atributo central na qualidade percebida pelos usuários e na eficiência do sistema (Kathuria et al., 2020).

A confiabilidade pode ser definida como a regularidade com que os ônibus atendem aos horários programados, garantindo previsibilidade e controle sobre o tempo de viagem (HCM, 2010; TCQSM, 2004; Van Oort & Van Nes, 2011). Esse atributo é influenciado por diversos fatores, como frequência, infraestrutura viária, flutuações de demanda, tráfego misto e desempenho operacional (Saberi et al., 2013). A variabilidade gerada por esses elementos impacta negativamente a experiência do passageiro, além de elevar custos operacionais e dificultar o planejamento do sistema.

Apesar da relevância do tema e da importância da confiabilidade para usuários e operadores, a literatura evidencia que ainda há lacunas na forma como esse atributo é mensurado e integrado ao processo de planejamento e operação (Diab et al., 2015; Van Oort & Van Nes, 2011). A literatura carece de métodos consolidados para analisar a variabilidade da oferta do serviço em sistemas de transporte coletivo por ônibus. Poucos estudos exploram, por exemplo, a variabilidade dos *headways* e tempos de viagem com base em dados operacionais reais (como GPS), especialmente em nível de linha ou ponto. Há uma lacuna no entendimento dos fatores espaciais e temporais que afetam a confiabilidade do serviço na ótica dos usuários.

Diante desse cenário, esta pesquisa tem como objetivo analisar a confiabilidade do sistema de transporte público por ônibus em Fortaleza, com foco na caracterização do desempenho do serviço prestado aos usuários. Para isso, propõe-se avaliar a confiabilidade com base em dados operacionais da frota, desenvolver uma metodologia aplicável aos níveis de rede e linha, e definir indicadores, com base em referências consolidadas da literatura. A expectativa é que os resultados subsidiem o planejamento urbano e contribuam para estratégias de melhoria contínua da operação, com potencial de replicação em outras cidades com características semelhantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A confiabilidade é considerada um dos principais atributos da qualidade do transporte coletivo urbano, especialmente pelo impacto direto na experiência do usuário. Segundo o *Highway Capacity Manual* (HCM, 2010), trata-se da regularidade com que um serviço cumpre seus horários planejados, resultando em tempos de espera consistentes. O *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (TCQSM, 2004) complementa essa definição ao incluir a pontualidade e a uniformidade dos *headways* como elementos centrais.

Do ponto de vista dos passageiros, a confiabilidade representa previsibilidade e controle sobre o tempo de viagem, influenciando a escolha do modo de transporte (Van Oort & Van Nes, 2011; Diab et al., 2015). Já para os operadores, está relacionada à aderência ao planejamento e ao desempenho técnico da frota (Saberi et al.,

2013). A dificuldade está em integrar essas visões em indicadores capazes de orientar intervenções eficazes (Kathuria et al., 2020).

Diversos fatores afetam a confiabilidade, como tráfego misto, comportamento dos motoristas, flutuações de demanda, obras e limitações de infraestrutura (Van Oort & Van Nes, 2011; Kathuria et al., 2020). Esses elementos ampliam a variabilidade do sistema, elevando o tempo médio de viagem e prejudicando a eficiência operacional (HCM, 2010).

Indicadores consolidados incluem pontualidade, regularidade dos *headways* e tempo de espera excedente (TCQSM, 2004). Saberi et al. (2013) sugerem métricas específicas para o nível de parada, enquanto Kathuria et al. (2020) propõem quatro dimensões: regularidade, tempo de espera, tempo de transferência e tempo total de viagem. Ferramentas como o *Buffer Time Index* e o *Planning Time Index* ajudam a quantificar a variabilidade percebida.

No Brasil, estudos ainda são limitados. Silva (2010) mostrou que a implantação de infraestrutura exclusiva pode melhorar significativamente a confiabilidade, mas destaca-se a escassez de pesquisas aplicadas à rede completa com dados reais (GPS). Esta pesquisa busca preencher essa lacuna ao propor uma abordagem metodológica que analise a variabilidade dos headways e tempos de viagem com base em dados de GPS, aplicável tanto em nível de linha quanto de rede.

3. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa está estruturada em quatro etapas principais: coleta de dados, definição de indicadores, caracterização da confiabilidade e análise estatística, conforme sintetizado na Figura 1. O foco é a aplicação de indicadores operacionais ao contexto real da cidade de Fortaleza, utilizando dados reais da operação do sistema de ônibus.

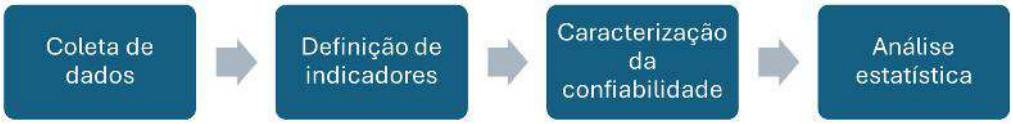


Figura 1: Estrutura metodológica proposta para análise da variabilidade da oferta do transporte público em Fortaleza.

3.1. Coleta de Dados

Serão utilizados dados provenientes do sistema de GPS da frota de ônibus que opera na cidade de Fortaleza, capturados em dias e horários distintos. Esses dados permitem obter informações detalhadas sobre a operação real do sistema, incluindo tempos de viagem e intervalos entre veículos (*headways*). A abordagem se alinha às práticas sugerida por autores na literatura, como Diab et al. (2015), que destaca a importância dos dados ITS (*Intelligent Transportation Systems*) para a análise de confiabilidade.

3.2. Definição de Indicadores

A definição dos indicadores será orientada por uma revisão da literatura. O objetivo é realizar a identificação e validação dos indicadores mais relevantes para mensurar a confiabilidade do sistema, considerando tanto sua consistência teórica quanto sua aplicabilidade prática ao contexto de Fortaleza. Essa seleção busca assegurar que as métricas adotadas reflitam adequadamente as variabilidades observadas na operação real e sejam sensíveis às necessidades dos usuários e dos gestores.

3.3. Caracterização da Confiabilidade

A caracterização da confiabilidade será realizada em dois níveis operacionais: nível de rede e nível de linha. No nível de rede, a análise buscará identificar padrões espaciais e temporais da variabilidade na operação, destacando áreas críticas com maior incerteza na oferta do serviço. No nível de linha, será feita uma análise mais detalhada, considerando individualmente em algumas linhas de ônibus, com foco nos indicadores de variabilidade dos intervalos entre ônibus (*headways*).

3.4. Análise Estatística

A análise estatística compreenderá a avaliação da variabilidade dos *headways* e tempos de viagem por meio

de medidas como desvio-padrão, coeficiente de variação, percentis e *boxplots*. Em seguida, serão elaborados mapas de calor e análises espaciais e temporais, relacionando a confiabilidade com variáveis como localização geográfica, horário, tipo de linha e infraestrutura viária.

4. RESULTADOS E IMPACTOS ESPERADOS

Espera-se que esta pesquisa contribua significativamente para o planejamento e operação do sistema de transporte público por ônibus em Fortaleza. Os resultados esperados incluem:

1) Identificação dos principais fatores que afetam a confiabilidade do serviço.
2) Desenvolvimento de indicadores práticos para avaliação contínua da qualidade do transporte público.
3) Impacto positivo na mobilidade urbana, incentivando o uso do transporte coletivo e reduzindo congestionamentos.

Além disso, os métodos desenvolvidos poderão ser adaptados e aplicados em outras cidades brasileiras com características semelhantes.

Agradecimentos

Agradecimentos à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de mestrado, essencial para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Diab, E. I.; M. G. Badami e A. M. El-Geneidy (2015) Bus transit service reliability and improvement strategies: integrating the perspectives of passengers and transit agencies in North America. Transport Reviews, v. 35, n. 3, p. 292–328. DOI: 10.1080/01441647.2015.1005034

Kathuria, A.; M. Parida e C. R. Sekhar (2020) A review of service reliability measures for public transportation systems. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, v. 18, n. 2, p. 243–255. DOI: 10.1007/s13177-019-00195-0

Saberi, M.; A. K. Zockaie; W. Feng e A. El-Geneidy (2013) Definition and properties of alternative bus service reliability measures at the stop level. Journal of Public Transportation, v. 16, n. 1, p. 97–118. DOI: 10.5038/2375-0901.16.1.6

Silva, T. C. C. (2010) A confiabilidade do transporte coletivo urbano em corredores estruturais de ônibus. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15724 (acesso em 07/07/2025)

Van Oort, N. (2011) Service reliability and urban public transport design. EJTIR – European Journal of Transport and Infrastructure Research, v. 14, n. 4, p. 437–462. DOI: 10.18757/ejtir.2014.14.4.3042

Transportation Research Board (2000) Highway Capacity Manual. Washington, D.C.: National Research Council.

Transportation Research Board (2010) Highway Capacity Manual. Washington, D.C.: National Research Council.

Transportation Research Board (2004) Transit Capacity and Quality of Service Manual: Second Edition. TCRP Report 100. Washington, D.C.: National Academy Press.

Evanilson de Lima Siqueira (evanilsonsiqueira@det.ufc.br)
Francisco Moraes de Oliveira Neto (moraes@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes (DET), Campus do Pici – Bloco 703 (1º andar), Fortaleza, CE, e Brasil.

INCORPORAÇÃO DE DADOS DE POSICIONAMENTO MÓVEL NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE URBANO E REGIONAL

Leonardo Akinaga Moreira, Mateus Humberto, Orlando Strambi
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Na última década, o uso de grandes volumes de dados automatizados (*big data*) vem crescendo rapidamente no domínio do planejamento e operação de transportes. Especialmente a partir da popularização dos *smartphones*, um dispositivo com sua localização detectável em intervalos regulares, é possível vislumbrar a incorporação de dados de posicionamento móvel (do inglês, *Mobile Positioning Data*, MPD), ainda que seja necessário identificar qual a sua validade perante os métodos tradicionais de aquisição de dados para pesquisa em transporte, como a pesquisa Origem-Destino (OD) e os dados de bilhetagem eletrônica. Visando fortalecer as políticas públicas de planejamento de transporte, esse estudo busca unir informações de diferentes bases de dados e de naturezas diferentes, buscando assim obter métodos mais robustos para a modelagem da demanda por transporte.

1. INTRODUÇÃO

São Paulo é uma das maiores metrópoles da América Latina, cuja população enfrenta grandes obstáculos para se deslocar por meio do transporte público, sobretudo por conta da oferta insuficiente de transportes frente à demanda. Para buscar solucionar as dificuldades na mobilidade urbana, é recomendável coletar e analisar uma grande quantidade de evidências, o que pode ser feito a partir de dispositivos de localização detectável em intervalos regulares, como, por exemplo, celulares e aparelhos GPS. Atualmente, grande parte da população possui *smartphones*, o que possibilita a coleta de uma ampla gama de informações de uma forma muito mais rápida e barata. Com o auxílio de novas tecnologias e por meio de convênios e parcerias com organizações do setor público e privado, é possível obter um conjunto de dados sobre o comportamento dos passageiros e padrões de deslocamento, que podem ser incorporados no planejamento de novos serviços e melhorias no sistema.

Durante décadas, os pesquisadores de transporte têm procurado compreender o cenário de transporte por meio de dados oriundos de dados de solicitação ativa, como questionários e pesquisas com dispositivos GPS embarcados. Mais recentemente, o advento das tecnologias associadas aos grandes volumes de dados coletados de forma passiva (*big data*) tem buscado garantir um conjunto de ferramentas de menor custo e maior frequência aos planejadores, sobretudo a partir dos dados oriundos de telefones celulares (Chen *et al.*, 2016).

Embora a coleta de *big data* tenha crescido e sua aplicação continue a se expandir tanto na pesquisa como na prática do planejamento de transportes, há uma significativa disparidade nos métodos de análise aplicados a esses conjuntos de dados, incluindo a inexistência de uma definição clara e consistente sobre o conceito de *big data* (Welch e Widita, 2019). Enquanto Chen et al. (2016) se referem ao tipo de dados obtidos por solicitação ativa como "*small data*", este tipo de dado pode variar muito em tamanho e tem grande relevância para a comunidade de transportes. Esses conceitos contrastam com as noções emergentes de grandes volumes de dados, que muitas vezes são coletados automaticamente e possuem uma aplicação menos específica. Nesse sentido, além dos dados coletados deliberadamente (*small data*), a tecnologia tem permitido a coleta passiva de dados, chamados de *big data*. (Chen *et al.*, 2016)

Dessa forma, os meios tradicionais de coleta de dados em transporte, que podem incluir a bilhetagem eletrônica e a pesquisa Origem-Destino (*small data*), podem ser combinados a algumas fontes de dados coletados automaticamente (*big data*) para permitir uma melhor identificação de padrões de deslocamento em tempo quase real (*nowcasting*), tais como os dados de posicionamento móvel, ou *Mobile Positioning Data* (MPD), através de dispositivos com localização rastreável (Kovalcsik *et al.*, 2022). Dentro do MPD, existem diferentes tipos de *big data* que podem auxiliar o planejamento de transportes uma uma dimensão metropolitana, tais como: telefonia móvel (*Call detailed record*, CDR), bilhetagem eletrônica, bem como dados de telemetria (GPS) (Anda *et al.*, 2017; Lenormand *et al.*, 2014; Pieroni *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2021).

O potencial da incorporação de *big data* para a compreensão dos deslocamentos em uma dinâmica

metropolitana vem ganhando destaque nos últimos anos. Entretanto, é necessário identificar a validade e confiabilidade de tais dados, sobretudo para o desenvolvimento de análises aprofundadas e modelos estatísticos. Para isso, é possível complementar as fontes de *big data* de fontes heterogêneas (telefonia móvel, Uber, TomTom, Tembici etc.) com dados oriundos de órgãos oficiais (EMTU, CPTM, Metrô, SPtrans, STM etc.), o que poderá contribuir para suprir uma carência da maior parte dos municípios no Brasil, sobretudo os de pequeno e médio porte (Kandt e Batty, 2021; Rodrigues *et al.*, 2021; Tomasiello e Giannotti, 2023; Tomasiello *et al.*, 2019).

Os dados tradicionais tem uma metodologia robusta e confiável, o que faz deles uma referência. Já os dados obtidos a partir de *big data* costumam ter custos reduzidos, maior frequência de coleta e com uma cobertura mais abrangente em termos territoriais e de perfis populacionais (Wang *et al.*, 2018). Unir os resultados de ambas as fontes deverá proporcionar uma análise mais detalhada e embasada para o planejamento de transporte urbano e regional.

Este estudo busca identificar diferentes tipos de dados de posicionamento móvel para a validação de dados existentes sobre deslocamento intrametropolitano, por exemplo, a partir da pesquisa OD e da bilhetagem eletrônica.

Analisando a literatura disponível, nota-se que não há estudos utilizando dados celulares para planejamento de transporte em conjunto com dados de pesquisas tradicionais no Brasil. Ao se examinar estudos realizados no sul global, a grande maioria foi produzido na China, e apenas um estudo na América do Sul, demonstrando uma lacuna em um tópico de alto interesse para as políticas públicas em transportes urbanos.

2. DADOS E MÉTODOS

Este projeto de pesquisa está baseado sobretudo no projeto "Centro de Ciência de Dados para Estatísticas Públicas (CCDEP)", liderado pela Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE) e Secretaria da Fazenda e Planejamento como parte dos novos Centros de Ciência para o Desenvolvimento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (CCD/FAPESP), que busca encontrar soluções para a utilização de dados de alta frequência para produzir indicadores de políticas públicas. O trabalho fará uso das viagens fundamentadas na base de dados de empresas de telefonia que contém viagens de milhões de usuários nas regiões metropolitanas do Estado de São Paulo.

De forma alinhada a um conjunto de órgãos governamentais, parceiros privados e programas de desenvolvimento científico, este projeto pretende contribuir para a produção de estatísticas públicas, com enfoque nas demandas dos municípios e regiões metropolitanas do Estado de São Paulo.

Além disso, este projeto de pesquisa se baseará também nos dados disponibilizados a partir do termo de cooperação técnico-operacional firmado em setembro de 2024 entre a Secretaria dos Transportes Metropolitanos do Estado de São Paulo (STM) e a Escola Politécnica, que tem por objeto “a colaboração mútua na estruturação de atividades de pesquisa e ensino destinadas à avaliação de políticas públicas de transporte a partir das bases de dados da STM, que serão utilizadas para a aplicação de técnicas de modelagem da demanda e da oferta de transporte em projetos de ensino e pesquisa, bem como para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas na área de Engenharia de Transportes” (STM, 2024). A STM pretende disponibilizar um conjunto de bases de dados que serão utilizadas para aplicações de modelagem da demanda e oferta de transporte em projetos de ensino e pesquisa, com o apoio da EPUSP, incluindo dados sobre a rede de transporte (por exemplo, passageiros transportados e arquivos GTFS ao longo do tempo), bem como dados gerais dos municípios inseridos em regiões metropolitanas no Estado de São Paulo (planos de mobilidade e planos diretores).

Após o *data cleaning*, será possível analisar as viagens realizadas, visto que a área delimitada e seu zoneamento serão explicitados e solicitados pela SEADE. Desse modo, espera-se ser capaz de identificar as regiões com alta concentração de viagens, as rotas utilizadas em deslocamentos regionais ou metropolitanos e comportamentos atípicos da mobilidade para possibilitar o planejamento para além dos eventos cotidianos. Dessa forma, espera-se avaliar os impactos na mobilidade de novos elementos de infraestrutura, equipamentos públicos e privados, bem como avaliar políticas de integração tarifária.

3.RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se conseguir elaborar matrizes de viagens e modelar a demanda por transporte, compreendendo como ocorrem os deslocamentos nas regiões metropolitanas do Estado de São Paulo, com o intuito de apoiar o planejamento baseado no aprimoramento da qualidade de vida da população, com enfoque no transporte coletivo e nos modos ativos (a pé e bicicleta). Além disso, pretende-se identificar padrões e indicadores estratégicos de mobilidade urbana, com o intuito de promover políticas públicas baseadas em evidências, integrando a academia com a esfera pública. Esse estudo visa contribuir para ampliar a aplicação de *big data* no planejamento de transportes, de forma complementar aos dados coletados tradicionalmente (*small data*).

Com esse estudo, espera-se incentivar a incorporação de *big data* para a análise de padrões de mobilidade nas regiões metropolitanas do Estado de São Paulo, com o intuito de apoiar a elaboração de políticas públicas relacionadas ao planejamento de transportes. Além disso, espera-se analisar e discutir o potencial do uso de MPD no transporte urbano e regional, bem como apreender os desafios existentes.

Agradecimentos

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001"

Este trabalho contou com apoio da FAPESP (Processo nº 2023/18026-8), por meio do Centro de Ciência de Dados para Estatísticas Públicas (CCDEP), sediado na Fundação Seade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anda, C., Erath, A., e Fourie, P. J. (2017) Transport modelling in the age of big data. *International Journal of Urban Sciences*, *21*(sup1), 19–42. doi:10.1080/12265934.2017.1281150

Chen, C., Ma, J., Susilo, Y., Liu, Y., e Wang, M. (2016) The promises of big data and small data for travel behavior (aka human mobility) analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *68*, 285–299. doi:10.1016/j.trc.2016.04.005

Kandt, J., e Batty, M. (2021) Smart cities, big data and urban policy: Towards urban analytics for the long run. *Cities*, *109*, 102992. doi:10.1016/j.cities.2020.102992

Kovalcsik, T., Elekes, Á., Boros, L., Könnyid, L., e Kovács, Z. (2022) Capturing Unobserved Tourists: Challenges and Opportunities of Processing Mobile Positioning Data in Tourism Research. *Sustainability*, *14*(21), 13826. doi:10.3390/su142113826

Lenormand, M., Picornell, M., Cantú-Ros, O. G., Tugores, A., Louail, T., Herranz, R., Barthelemy, M., Frías-Martínez, E., e Ramasco, J. J. (2014) Cross-Checking Different Sources of Mobility Information. *PLOS ONE*, *9*(8), e105184. doi:10.1371/journal.pone.0105184

Pieroni, C., Giannotti, M., Alves, B. B., e Arbex, R. (2021) Big data for big issues: Revealing travel patterns of low-income population based on smart card data mining in a global south unequal city. *Journal of Transport Geography*, *96*, 103203. doi:10.1016/j.jtrangeo.2021.103203

Rodrigues, A., Giannotti, M., Cunha Barboza, M. H. C., e Alves, B. B. (2021) Measuring mobility inequalities of favela residents based on mobile phone data. *Habitat International*, *110*, 102346. doi:10.1016/j.habitatint.2021.102346

STM. (2024) Diário Oficial do Estado de São Paulo. Obtido 17 de fevereiro de 2025, de https://www.doe.sp.gov.br

Tomasiello, D. B., e Giannotti, M. (2023) Unfolding time, race and class inequalities to access leisure. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *50*(4), 927–941. doi:10.1177/23998083221111405

Tomasiello, D. B., Giannotti, M., Arbex, R., e Davis, C. (2019) Multi-temporal transport network models for accessibility studies. *Transactions in GIS*, *23*(2), 203–223. doi:10.1111/tgis.12513

Wang, Z., He, S. Y., e Leung, Y. (2018) Applying mobile phone data to travel behaviour research: A literature review. *Travel Behaviour and Society*, *11*, 141–155. doi:10.1016/j.tbs.2017.02.005

Welch, T. F., e Widita, A. (2019) Big data in public transportation: a review of sources and methods. *Transport Reviews*, *39*(6), 795–818. doi:10.1080/01441647.2019.1616849

Leonardo Akinaga Moreira (leonardo.moreira@usp.br)
Mateus Humberto (mateushumberto@usp.br)
Orlando Strambi (ostrambi@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 nº. 83. Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil) – São Paulo, Brasil

Modelagem Aplicada ao Transporte não Motorizado

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE SISTÊMICA DA CAMINHABILIDADE: UMA ABORDAGEM INTEGRADA

Danielle Sousa Vale[1], **Érika Cristine Kneib**[2]
[1]Universidade Federal de Goiás, [2]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Em meio aos desafios da mobilidade urbana, o modo a pé tem ganhado cada vez mais destaque. Contudo, no Brasil, muitas políticas e ações desarticuladas dificultam o caminhar, prejudicando diretamente a mobilidade a pé. Nesse sentido, essa pesquisa apresenta um procedimento que busca analisar os elementos da mobilidade a pé, de forma articulada. Assim, apresenta como objetivo modelar o sistema da caminhabilidade. Para tal, emprega os conceitos da Teoria Geral dos Sistemas; baseia-se em componentes do Índice de Caminhabilidade - uma ferramenta que avalia as condições fundamentais para a circulação segura e confortável dos pedestres nas áreas urbanas; e faz a representação do sistema a partir da ferramenta Kumu, que possibilita visualizar e compreender as complexas conexões entre os diversos componentes urbanos. A abordagem metodológica adotada proporciona uma perspectiva integrada, e assim foi possível identificar os elementos que exercem maior influência em relação aos demais, e que têm uma maior capacidade de elevar a qualidade e desempenho do sistema. Assim, entende-se que o objetivo proposto neste trabalho foi atingido, assim como a metodologia utilizada mostrou-se bastante favorável para atingi-lo.

1. INTRODUÇÃO

Como pensamento inicial que impulsiona o estudo, destaca-se a concepção da cidade como um bem público, concebida por pessoas e destinada a elas (Gehl, 2015). Nesse contexto, a mobilidade urbana funciona como um sistema capaz de assegurar o direito à cidade a todos, o que fornece o acesso sem distinções ou exclusões. Assim, torna-se essencial pensar a cidade a partir da escala do pedestre, considerando que o espaço público — em especial a rua — precisa ser apropriado por diferentes grupos sociais, com perfis variados, de modo a favorecer tanto a relação com o ambiente quanto as interações entre indivíduos (Gehl, 2015).

A Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU (Brasil, 2012), estabelece como diretriz a priorização dos transportes não motorizados em relação aos motorizados, como princípio de desenvolvimento sustentável das cidades. Para que se cumpra essa priorização, existem especificidades e métodos a serem estudados e implantados para que sejam utilizados efetivamente, especialmente nas políticas urbanas. O estudo vem como uma dessas formas de buscar estudar de forma efetiva e trazer transformações palpáveis.

O recorte deste trabalho está em priorizar a mobilidade a pé. Para tal, é imprescindível que haja condições adequadas para caminhar, que são complexas e vão muito além da calçada. A mobilidade a pé depende de um conjunto de elementos articulados, tais como calçadas, travessias, locais de descanso, conforto térmico, fontes de hidratação, entre outros (ITDP, 2019). Assim, conforme enfatiza Speck (2016), a caminhabilidade está naqueles lugares que concentram o melhor que a cidade pode oferecer em uma área, ou seja, precisa atender as condições de: ser proveitosa, segura, confortável e interessante. Ou seja, a caminhabilidade é condição para uma boa mobilidade a pé.

Sabendo da importância de novos estudos que tenham como foco a mobilidade a pé e a caminhabilidade, Capra (2014) denomina de “visão de mundo holística” uma perspectiva científica e social, em que os estudos são direcionados para a compreensão da totalidade integrada de algo e o foco está sobre as interações entre suas partes. Assim, como reforça Lopes (2023), destaca-se a relevância da priorização da mobilidade a pé como forma de deslocamento, dentro de uma perspectiva contemporânea de planejamento urbano de cidade, a partir de um novo paradigma científico que inclui a visão sistêmica do fenômeno. Nesse caso, a mobilidade sistêmica.

A partir desse panorama, o objetivo central do trabalho consiste em modelar um sistema para a caminhabilidade, com base nos elementos obtidos através do Índice de Caminhabilidade (iCam), que é uma ferramenta que permite mensurar as características do ambiente urbano determinantes para a circulação dos pedestres (ITDP, 2018). Este índice é composto por quinze indicadores agrupados em seis diferentes categorias. Com base nessas categorias e indicadores, é possível realizar a modelagem a partir da Teoria Geral dos Sistemas e da plataforma de software Kumu. A modelagem possibilita visualizar e compreender conexões entre os elementos urbanos em foco e funcionando como uma contribuição para entender como tais elementos se articulam. A abordagem metodológica adotada proporciona uma perspectiva integrada e, com base nos resultados alcançados, o artigo propõe recomendações para aprimorar a infraestrutura urbana voltada à caminhabilidade.

2. A TEORIA GERAL DOS SISTEMAS (TGS)

A partir do pressuposto de que a mobilidade é vista como um fenômeno sistêmico, tem-se que um sistema é algo formado por um conjunto de elementos que interagem entre si, mantendo relação constante com o meio para alcançar objetivos específicos Bertalanffy (2015). Sendo assim, ao compreender o sistema por meio das interações, pode-se notar faltas ou desarticulação de elementos que reverberam no sistema como um todo, e todos elementos funcionam em prol de um mesmo objetivo.

Partes de um sistema só podem ser compreendidas com a organização e consideração do todo. Desta forma, estudos e análises focam em compreender as interações entre as partes, pois um sistema é entendido por Andrade (2014) como o todo unificado a partir da união e integração dessas relações. Partes isoladas, sem interações, configuram-se apenas como um aglomerado de partes independentes. Seguindo essa linha de raciocínio, a cidade é uma composição de sistemas, e um deles é a mobilidade urbana (Naciff; Kneib; Amaral, 2019).

Dessa forma, um sistema pode ser entendido como uma rede composta por nós conectados, onde a análise detalhada de um sistema possibilita identificar outros sistemas interligados. Pode-se afirmar que o sistema de transporte está inserido dentro do sistema de mobilidade urbana e, por sua vez, o Sistema do Modo Ativo faz parte deste último, incluindo o sistema de mobilidade a pé. Esse conceito evidencia que novos fenômenos e padrões únicos podem emergir quando as partes colaboram entre si (Capra, 2014; Colchester, 2019; The sustainability laboratory, 2019). Essa compreensão serve de base para a metodologia de análise proposta neste artigo, que se concentra nos aspectos relacionados à caminhabilidade com o objetivo de contribuir para a promoção da mobilidade a pé.

3. O INDÍCE DE CAMINHABILIDADE (ICAM)

Como elemento teórico em busca da compreensão dos estudos aqui tratados, tem-se também o Índice de Caminhabilidade (iCam). É uma ferramenta que permite avaliar de forma quantitativa as características do ambiente urbano determinantes para a circulação dos pedestres e, com isso, apresentar recomendações a partir dos resultados obtidos na avaliação (ITDP, 2018). A primeira versão do iCam foi lançada em 2016 e passou por um aperfeiçoamento com o objetivo de aumentar o potencial de aplicação da ferramenta nas cidades brasileiras.

A versão 2.0 do iCam é composta por 15 indicadores, organizados em seis categorias distintas, que abordam diferentes aspectos da experiência de caminhar. Cada categoria reflete uma dimensão importante para a avaliação da caminhabilidade, sendo usada como base para a pontuação final. As categorias são: Calçada, que incorpora a dimensão de caminhabilidade relativa à infraestrutura, considerando dimensões, superfície e manutenção do piso adequadas ao pedestre; Mobilidade, que está relacionada à disponibilidade e ao acesso ao transporte público e permeabilidade da malha urbana; Atração, que inclui indicadores relacionados a características de uso do solo que potencializam a atração de pedestres; Segurança viária, que agrupa indicadores referentes à segurança de pedestres em relação ao tráfego de veículos motorizados, assim como a adequação de travessias a requisitos de conforto e acessibilidade universal; Segurança pública, que trata da influência do desenho urbano e das edificações no número de ocorrências e na sensação de segurança transmitida aos pedestres; e Meio ambiente, que aborda aspectos ambientais que possam afetar as condições de caminhabilidade de um espaço urbano (ITDP, 2018).

A seleção dos indicadores a serem agrupados nas diferentes categorias, embora tenha sido baseada em uma revisão abrangente de referências, também envolve um certo grau de subjetividade na construção da ferramenta. Um indicador pode ser classificado em mais de uma categoria, como ocorre com o indicador "Dimensão das Quadras". Embora esteja na categoria Mobilidade, ele também poderia ser alocado nas categorias Segurança Viária, pois quadras maiores podem levar motoristas a dirigir em velocidades perigosas para os pedestres, ou Segurança Pública, pois podem dificultar a circulação de grupos vulneráveis, aumentando o risco de crimes como assaltos ou agressões; ou até Atração, já que se refere ao ambiente urbano e à qualidade do espaço construído. Este aspecto subjetivo de agrupar as categorias dialoga também com a subjetividade que é necessária para a realização de uma modelagem do sistema. Assim, para a modelagem do sistema, nomina-se as categorias do índice como subsistemas e os indicadores como elementos. E através dessa organização eles se diferenciam em relação ao grau de importância e posicionamento no sistema.

4. METODOLOGIA

Realizou-se uma pesquisa aplicada, buscando uma solução metodológica para uma identificação mais adequada em relação a elementos que devem ser priorizados para a construção de um sistema de mobilidade a pé, e que também se caracteriza como exploratória, ao investigar e propor a construção do denominado Sistema de Caminhabilidade – SisCam.

Esta pesquisa se estrutura nas seguintes etapas metodológicas: 1) Revisão bibliográfica para elaboração da base conceitual do trabalho e identificação dos elementos do sistema; 2) Construção do Sistema de Caminhabilidade, a partir da Teoria Geral dos Sistemas; 2-a) Mapeamento das interações dos elementos; 2-b) Construção do mapa do Sistema de Caminhabilidade, através de diagrama obtido com o Kumu, uma plataforma de software voltada para visualização e análise de sistemas complexos; 2-c) Mapeamento das influências entre os elementos mais conectados e obtenção de métricas através do software Kumu.

4.1. Modelagem do Sistema de Caminhabilidade - SisCam

Para a obtenção do mapa do SisCam, foi necessário organizar as conexões dos subsistemas e elementos. Essa organização se deu da seguinte forma: (1) realização de uma tabela organizando as ligações das categorias do iCam para seus respectivos indicadores, sendo considerado o grau de conexão e importância mais forte do sistema, de acordo com associações entendidas subjetivamente pelo estudo como mais dependentes um do outro; (2) A partir da definição do primeiro grau de importância, foi feita uma varredura em relação às conexões das categorias com os outros indicadores, dos quais não se conectam, levando em consideração a hierarquia adotada pelo ITDP, que foram considerados como uma força de conexão média; (3) Por fim, a ligação entre indicadores de uma categoria com indicadores de outras, foi considerada como uma conexão fraca.

A partir da definição dos graus de conexão entre um elemento e outro, categorizou-se os elementos em diferentes tipos (categorias e indicadores), suas respectivas descrições, e suas conexões. Para a organização das conexões entre um elemento e outro, parte-se do entendimento de que existe um remetente que se liga ao destinatário, tendo assim uma conexão, que pode ser definida como forte (de primeiro grau), média (de segundo grau) e fraca (de terceiro grau).

5. MÉTRICAS OBTIDAS

A figura 01 é resultado do que foi gerado a partir dos dados inseridos na plataforma, que traz as conexões entre os elementos. A métrica utilizada para análise foi a chamada *MICMAC* (Multiplicação Baseada em Matrizes Aplicada a uma Classificação), que é uma análise de sistemas que explora a dependência a elementos: o quanto um determinado elemento é afetado por outros elementos; e a influência: o quanto um determinado elemento afeta outros elementos (Kumu, 2024). Quando transformado em gráfico, possibilita identificar pontos de influência (condutores) e de alavancagem (impulsionados).

A influência descreve a extensão em que uma variável tem um efeito causal direto, e a alavancagem descreve a extensão em que a variável é resultado de outros fatores. As pontuações são plotadas nos eixos X e Y para criar uma matriz bidimensional. Cada nó é então caracterizado de acordo com sua posição na matriz.

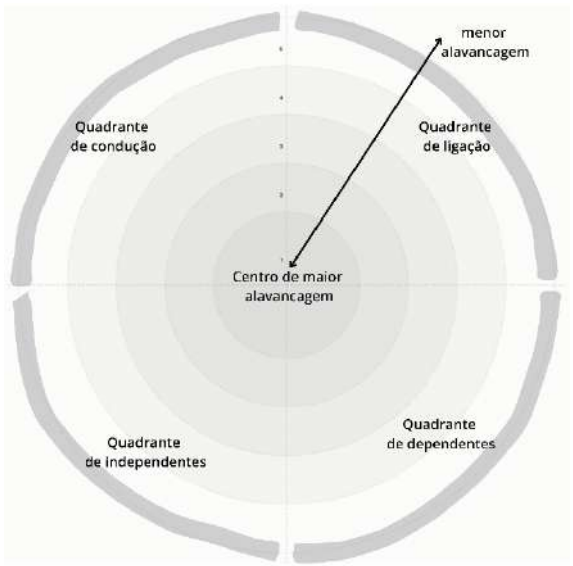
A influência, os elementos condutores, retrata a gravidade do elemento em relação ao todo. É dividida nos seguintes quadrantes da figura (como é possível identificar na figura 01): independentes, que tem pouca influência na dinâmica do sistema; dependentes, que não são influentes; De ligação, que são altamente influentes e dependentes; e de condução, que desencadeiam a mudança e precisam de ação como primeira prioridade.

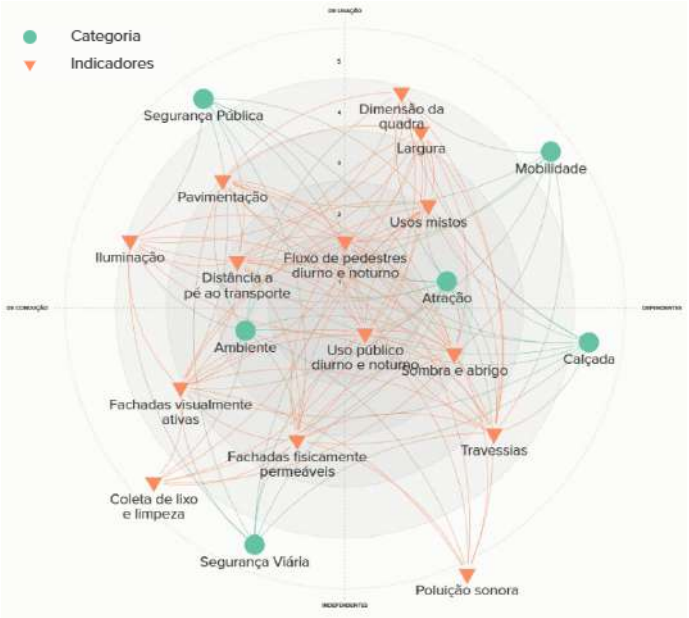
A alavancagem, os elementos impulsionados, consiste na movimentação causada pela influência. Identifica os elementos em que é possível fazer mudanças para influenciar o comportamento do sistema como um todo. Mostra os elementos que mais se transformam com determinadas intervenções (Kumu, 2024). Em gráficos, os elementos que são mais impulsionados ficam no meio, enquanto os de menor dependência flutuam em direção ao perímetro.

No caso desse estudo, assim como pode ser observado na figura 02, verificou-se:

- Sobre a influência: Segurança pública e iluminação se localizam no quadrante de condução, que são os principais elementos que desencadeiam mudanças no SisCam, sendo assim, são prioridade no plano de ações. Assim como os elementos que se localizam no quadrante de ligação – Mobilidade e atração – que são altamente influentes no sistema, como é possível observar na figura 01.

- Sobre a alavancagem: os elementos de fluxo de pedestres e uso público diurno e noturno foram os de maior destaque, assim como as categorias de atração e ambiente (os elementos de maior alavancagem se situam na parte central). Ou seja, intervenções positivas nesses indicadores podem ser transformadoras para o SisCam. Já os de menor alavancagem flutuam em direção ao perímetro – neste caso poluição sonora.





Figuras 1 e 2: Categorias e seus respectivos indicadores nos quadrantes de influência.
Fonte: Kumu (2024). Adaptado pela autora

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da modelagem do SisCam foi possível identificar os elementos que exercem maior influência em relação aos demais, e que têm uma maior capacidade de elevar a qualidade e desempenho do sistema. Assim, entende-se que o objetivo proposto foi atingido, assim também como a metodologia utilizada mostrou-se bastante favorável.

Nesse contexto, é importante ressaltar que o sistema funciona quando está conectado aos outros elementos, e quando todos funcionam para a obtenção de um mesmo objetivo. Sendo assim, a ferramenta e metodologia aplicadas podem ser úteis para entender as demandas de propostas em relação a intervenções espaciais que tenham como foco a mobilidade a pé, que mostraram que a caminhabilidade, aqui ilustrada pelo SisCam, precisa contar com um conjunto de elementos interconectados, que vai muito além da calçada.

Esta pesquisa contribui para o aprimoramento do planejamento e da implementação da mobilidade a pé, promovendo uma forma de deslocamento mais eficiente, restabelecendo as conexões interdependentes com as ruas e incentivando a apropriação do espaço urbano por meio do estímulo ao uso e à imersão nesse ambiente. Dessa maneira, amplia-se as relações sociais, essenciais para a convivência humana e a formação de comunidades. Vale destacar que essas análises podem servir de base para o desenvolvimento de projetos e políticas públicas, considerando as prioridades identificadas na utilização do sistema.

Este trabalho abre ainda a possibilidade de diversas pesquisas futuras que podem complementar a presente abordagem, a exemplo de inserir novos elementos e índices relacionados à caminhabilidade, ao pedestre e à mobilidade a pé na modelagem, assim como modelar tais elementos em estudos de caso específicos, considerando potencialidades e fragilidades da mobilidade a pé em determinada área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Aurélio L. **O curso do pensamento sistêmico**. 1 ed. São Paulo: Digital Publish & Print Editora, 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). Relatório de 2014 - **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP**. Junho, 2017. Disponível em: http:// www.antp.org.br/sistema-de-informacoes-da-mobilidade/apresentacao.html.

BERTALANFFY, Ludwig von. **Teoria geral dos sistemas**: fundamentos, desenvolvimento e aplicações. 1901-1972. Tradução de Francisco M. Guimarães. 8 ed. Petrópolis, RJ: Editora Vozes, 2015. 360p.

BRASIL. LEI Nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as **diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana**.

CAPRA, Fritjof. **A visão sistêmica da vida:** uma concepção unificada e suas implicações filosóficas, políticas, sociais e econômicas / Fritjof Capra e Pier Luigi Luisi; Tradução Mayra Teruya Eichemberg, Newton Roberval Eichemberg. – São Paulo: Cultrix, 2014.

COLCHESTER, Joss. **Systems Change**: An Introduction. A Systems Innovation Publication, Creative Commons, 2019.

GEHL, Jan. **Cidade para Pessoas** / Jan Gehl; tradução Anita Dimarco. 3ed. São Paulo: Perspectiva. 2015.

ITDP Brasil – Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento. **Índice de Caminhabilidade 2.0**: Ferramentas. 2018. Disponível em: https://itdpbrasil.org/icam2/. Acesso em: 19 nov 2024.

LOPES, Flávia Cirqueira Rodrigues. Análise sistêmica do modo ativo: a busca pela priorização da acessibilidade ativa nas centralidades urbanas. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-Graduação Projeto e Cidade – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2023.

KNEIB, Erika Cristine. Mobilidade e centralidades: reflexões, relações e relevância para a vida urbana. In E. C. Kneib (Org.), Projeto e cidade: centralidades e mobilidade urbana. Goiânia: FUNAPE, 2014.

KUMU. Disponível em: https://kumu.io/. Acesso em: 19 nov 2024.

NACIFF, Yordana Dias das Neves; KNEIB, Erika Cristine; AMARAL, Camilo Vladimir de Lima. O pensamento sistêmico em análises urbanas: uma perspectiva para o problema da segregação socioespacial nas cidades. USJT • arq.urb • número 24 | janeiro – abril de 2019.

SPECK, Jeff. Cidades caminháveis / Jeff Speck; tradução Anita Dimarco, Anita Natividade. – 1 ed. – São Paulo: Perspectiva, 2016.

THE SUSTAINABILITY LABORATORY. Systems Thinking & Systems Modelling. A Course for Understanding Systems and Creating Systems Models. Novembro de 2019. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1CFvLyuhSJS9Cpfz0XDZNv-e89If8H4f2/view. Acesso em 19 nov 2024.

Danielle Sousa Vale (danielle.vale@discente.ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais, Programa de Pós Graduação Projeto e Cidade
(Campus Samambaia, Av. Esperança, s/n - Chácaras de Recreio Samambaia, Edifício da Faculdade de Artes Visuais, Goiânia - GO, Brasil).

Érika Cristine Kneib (erikakneib@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais, Programa de Pós Graduação Projeto e Cidade
(Campus Samambaia, Av. Esperança, s/n - Chácaras de Recreio Samambaia, Edifício da Faculdade de Artes Visuais, Goiânia - GO, Brasil).

APLICAÇÃO DE MÉTODO DE SELEÇÃO DE VARIÁVEIS BASEADO EM FLORESTA ALEATÓRIA PARA ANÁLISE DO TRANSPORTE ATIVO PÓS PANDEMIA DA COVID-19

João Pedro Davoli, Cira Souza Pitombo, André Luiz Cunha
Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO
Este trabalho busca identificar as variáveis mais relevantes para a análise das mudanças no uso do transporte ativo após a pandemia de COVID-19. Para isso, foram aplicados dois procedimentos de seleção de variáveis com o algoritmo de Floresta Aleatória, comparados por meio de testes de associação Qui-quadrado. A base de dados foi composta por 282 indivíduos, entrevistados entre março e maio de 2024, residentes em diversas cidades brasileiras. O procedimento proposto apresentou melhor desempenho em relação ao método de referência. As variáveis consideradas mais relevantes incluíam: frequência de uso dos modos de transporte pós-COVID-19 (*ridesourcing*, transporte público, automóvel, *bikesharing*), modo de transporte mais frequente, substituição do transporte público por *ridesourcing*, motivo da viagem por bicicleta, higiene no transporte público e distância percorrida com *ridesourcing*.

1. INTRODUÇÃO

Devido aos efeitos da pandemia da COVID-19, observou-se mudanças nos padrões de mobilidade e um aumento na frequência de utilização dos modos ativos de transportes (Zafri et al., 2021; Zhang e Fricker, 2021; Rodriques da Silva et al., 2023). Naquele período, observou-se uma expansão na infraestrutura cicloviária em algumas cidades brasileiras, bem como preços promocionais para aquisição de bicicletas, por exemplo, incentivando o uso de tais modos de transporte em detrimento dos modos motorizados (ANTP, 2020). Após esses incentivos, é preciso verificar se, após a pandemia da COVID-19, a frequência de uso de modos ativos se manteve mais alta e se houve manutenção de novos hábitos em prol da mobilidade sustentável. Diversos fatores estão relacionados ao uso de transporte ativo, tais como fatores demográficos, ambiente no entorno, segurança, preocupações com a saúde, distâncias, condições de infraestrutura, etc. (Vahedi et al., 2021; Cusack, 2021; Hasan et al., 2019).

Como no caso de escolha ou frequência de uso do transporte ativo, onde há múltiplas variáveis independentes envolvidas, há diversos problemas onde a seleção de variáveis é uma etapa crucial prévia à modelagem e análise adequada do problema. Assim, identificar um subconjunto de variáveis que melhore a interpretabilidade e desempenho preditivo do modelo, bem como melhor adequar a análise do fenômeno de interesse, é de suma importância. Diferentes algoritmos de aprendizagem de máquina (AM) são utilizados para este fim em diversas áreas do conhecimento. Na literatura, são observados o emprego de *Suport Vector Machine* (SVM), Floresta Aleatória (FA), *k-nearest neighbors* (KNN) como ferramentas auxiliares de seleção de um subconjunto de variáveis independentes (Khan et al, 2022; Li et al., 2019).

Embora diversos estudos tenham explorado mudanças nos hábitos de mobilidade durante a pandemia, ainda são escassas as investigações que analisam a persistência desses comportamentos no período pós-pandêmico, especialmente com métodos automatizados de seleção de variáveis em contextos urbanos de países em desenvolvimento. Nesse sentido, estudos como este podem ser uma ferramenta importatne para analisar o impacto das variáveis e a sensibilidade do sistema de transporte, podendo embasar pesquisas futuras para análise das mudanças a longo prazo.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal selecionar as variáveis explicativas mais relevantes do banco de dados com base na variável de interesse, que analisa mudanças na frequência do uso do transporte ativo pós-pandemia. Secundariamente, busca-se comparar os resultados obtidos entre o procedimento de referência, encontrado na literatura (Han et al., 2016), e o procedimento proposto, com base em um teste Qui-quadrado de associação. Ambos os procedimentos são baseados na aplicação do algoritmo de Floresta Aleatória.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Dados

Os dados utilizados neste estudo são advindos do trabalho de Moraes et al. (2024). Tais dados foram coletados entre os dias 25 de março e 06 de maio de 2024, por meio de formulário eletrônico e utilizando a técnica de amostragem *snowball sampling* (Goodman, 1961). O questionário foi dividido em cinco seções: perfil socioeconômico e uso de *smartphone* e outras tecnologias; viagem mais frequente; avaliação do transporte público; frequência e uso de *Ridesourcing*; e mudanças de hábitos após a pandemia de COVID-19. Ao final,

foram coletadas 282 respostas em 65 cidades do Brasil. A partir do banco de dados original foram utilizadas 34 variáveis: estado de residência (nominal), idade (ordinal), escolaridade (ordinal), gênero (nominal), renda (ordinal), número de automóveis na residência (ordinal), isenção ou desconto para o transporte público (binária), frequência do uso do *smartphone* (ordinal), frequência do uso de tecnologias da informação e comunicação (ordinal), modo da viagem mais frequente (nominal), motivo da viagem mais frequente (nominal), tempo médio da viagem mais frequente (ordinal), qualidade do transporte público (ordinal), segurança pessoal no transporte público (ordinal), frequência de atendimento do transporte público (ordinal), confiabilidade de horários do transporte público (ordinal), acessibilidade do transporte público (ordinal), conforto do transporte público (ordinal), qualidade dos pontos de parada do transporte público (ordinal), medidas de higienização do transporte público (ordinal), medidas de segurança sanitária do transporte público (ordinal), higiene e segurança sanitária no transporte público pós COVID-19 (ordinal), qualidade do transporte público pós COVID-19 (ordinal), uso de *Ridesourcing* (binária), frequência de uso de *Ridesourcing* (ordinal), motivo da viagem com *Ridesourcing* (nominal), distância da viagem com *Ridesourcing* (ordinal). As demais variáveis utilizadas, referentes a mudanças de hábitos pós-pandemia da COVID-19, são descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis referentes a mudanças de hábito após a pandemia da COVID-19

Variável	Tipo	Níveis
Uso de automóvel	Ordinal	1 - Passei a usar menos; 2 - Não mudei a frequência de uso; 3 - Passei a usar mais
Uso de ridesourcing	Ordinal	
Uso de transporte ativo	Ordinal	
Uso de transporte público	Ordinal	
Uso de bicicletas compartilhadas	Ordinal	
Motivo da viagem de bicicleta	Nominal	Trabalho; Ida à casa de familiares/amigos; Compras essenciais; Saúde; Estudo; Lazer; Buscar/levar crianças na escola ou outros locais; Não utilizo bicicleta
Substituição do transporte público pelo ridesourcing	Ordinal	1 - Passei a substituir muito menos; 2 - Passei a substituir menos; 3 - Não substitui; 4 - Passei a substituir mais; 5 - Passei a substituir muito mais
Incentivo ao uso de transporte ativo	Ordinal	1 - Não houve incentivo; 2 - Houve muito pouco incentivo; 3 - Houve pouco incentivo; 4 - Houve incentivo; 5 - Houve muito incentivo

2.2. Método de seleção de variáveis

Os procedimentos (proposto e de referência) utilizados para a seleção de variáveis, são baseados no algoritmo Floresta Aleatória (FA). O algoritmo da FA, proposto por Breiman (2001), consiste na geração de um determinado número de árvores de decisão isoladas, de forma aleatória, para buscar a combinação de regras de decisão que retornem a maior acurácia de estimativas. De acordo com Verikas et al. (2011), a FA pode ser utilizada como uma ferramenta para determinação da importância de variáveis explicativas, com base em um conjunto de árvores e simulação de Monte Carlo. Para o estudo de importância de variáveis independentes, a FA utiliza dois indicadores: *Mean Decrease Accuracy* (MDA), que mede a mudança na precisão de estimativa ao comutar aleatoriamente os valores das variáveis em comparação à observação original; e *Mean Decrease Gini* (MDG), que se trata da soma das reduções da impureza de Gini quando a variável é utilizada na divisão na FA (Calle e Urrea, 2011).

O procedimento de referência utilizado foi proposto por Han et al. (2016). Neste caso, as variáveis recebem pontuações de acordo com MDA e MDG, que têm igual importância, portanto, recebem a mesma regra para pontuação das variáveis. O procedimento ordena, de maneira crescente, os valores de MDA e atribui-se um *rank* de acordo com a posição da variável no ordenamento, sendo 1 para a variável com menor MDA. Repete-se o procedimento para os valores de MDG e esses *ranks* são somados e seleciona-se a amostra com 50% das variáveis com maior pontuação final. Com as variáveis selecionadas, uma nova FA é gerada e o método é aplicado, iterativamente, até que a taxa de erro da FA pare de diminuir ou aumente.

Assim, propôs-se um novo procedimento de seleção de variáveis, inspirado no método de Han et al. (2016), usando a somatória dos índices MDA e MDG das variáveis para o ordenamento, ao invés da soma dos escores atribuídos com base no ordenamento das variáveis pelos mesmos índices. Além disso, o novo procedimento também avaliou a seleção de amostras com 50%, 70% e 80% das variáveis, para comparação dos resultados com a proposta de seleção de 50% apresentada no método da literatura. Realizada a seleção de variáveis através do método proposto por Han et al. (2016) e pelo procedimento proposto neste estudo, foram realizados testes Qui-quadrado para testar a significância da associação entre as variáveis independentes selecionadas e a

variável de interesse, definida como a mudança na frequência de uso do transporte ativo após a pandemia. O intervalo de confiança adotado nos testes foi de 95%. A aplicação das técnicas mencionadas foi realizada com o auxílio dos pacotes R – *Random Forest* e R – *Stats Package* (R Core Team 2024) (Liaw e Wiener, 2002; R Core Team 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, definiu-se no algoritmo os parâmetros da função responsável pela criação da FA: 70% das observações seriam utilizadas para o conjunto de treinamento e 30% para o conjunto de teste. O número de árvores de decisão gerado em cada FA foi definido em 1.000. O número de árvores adotado como parâmetro, para ambos os procedimentos, foi definido ao analisar variação da taxa de erro *out of bag*, que representa a acurácia da previsão da FA para um conjunto de dados gerado a partir do banco de dados inicial com a adição de elementos aleatórios (*bootstrapping*). Observou-se, que o erro *out of bag* apresentava grande variação para um número pequeno de árvores e maior constância para um número maior.

A cada iteração, as variáveis receberam as pontuações para suas respectivas posições na escala de MDA e de MDG e, assim, seu placar final somando ambas. Também foi aplicado o procedimento proposto, considerando a soma dos valores de MDA e MDG para a classificação das variáveis. Para o procedimento proposto, foram adotadas taxas de 50%, 70% e 80% para a seleção das variáveis com os melhores índices. Para o método da literatura, selecionou-se a metade das variáveis com maior pontuação. Assim, tem-se a quantidade de variáveis e a taxa de erro por iteração na Tabela 2, para cada uma das taxas de seleção do procedimento proposto.

Tabela 2: Resultados por iteração - Diferentes taxas de seleção do procedimento proposto

% da seleção	50%		70%		80%	
Iteração	**Nº de variáveis**	**Taxa de erro (%)**	**Nº de variáveis**	**Taxa de erro (%)**	**Nº de variáveis**	**Taxa de erro (%)**
0	34	38,19%	34	38,19%	34	38,19%
1	17	36,18%	27	37,69%	28	37,19%
2	9*	34,17%*	22*	35,18%*	23	35,68%
3	5	40,70%	18	37,19%	19*	35,68%*
4	-	-	14	-	16	37,69%

*Conjunto selecionado pelo método proposto

Observando os resultados na Tabela 2, verifica-se que a 2ª iteração apresentou melhor resultado para as seleções de 50% e 70% das variáveis, enquanto a seleção de 80% das variáveis foi melhor na 3ª iteração. A definição do percentual de seleção deve considerar o número total de variáveis, possíveis problemas de multicolinearidade e as características da variável de interesse, uma vez que a diferenças percentuais dos erros não foram expressivas entre as iterações 2 (50% e 70% de seleção) e 3 (80% de seleção). A título de comparação entre procedimentos, foi escolhido o conjunto de 50% das variáveis, critério adotado no procedimento de referência. A Tabela 3 apresenta a comparação entre os conjuntos de dados obtidos nos dois procedimentos, contendo número de variáveis, taxa de erro e acurácia de validação.

Tabela 3: Resultados por iteração - Procedimento da literatura e Procedimento proposto

Método	Procedimento da literatura - Han et al. (2016)			Procedimento proposto		
Iteração	**Nº de variáveis**	**Taxa de erro (%)**	**Acurácia Validação (%)**	**Nº de variáveis**	**Taxa de erro (%)**	**Acurácia Validação (%)**
0	34	38,19%	56,63%	34	38,19%	56,63%
1	17	37,19%	60,24%	17	36,18%	57,83%
2	9*	36,68%*	60,24%*	9*	34,17%*	57,83%*
3	5	36,68%	55,42%	5	40,70%	-

*Conjunto selecionado pelo método

Observando os resultados na Tabela 3, nota-se que, para ambos os procedimentos, a 2ª iteração representou o ponto em que a taxa de erro deixou de diminuir. Dessa forma, de acordo com o método, o conjunto de variáveis obtido nessa iteração representa a melhor seleção de variáveis independentes ao adotar a variável "frequência do uso de transporte ativo pós pandemia da COVID-19" como dependente no algoritmo da FA. A Tabela 4 apresenta o conjunto de variáveis selecionadas para cada método, com as variáveis ordenadas com base nas métricas de pontuação mencionadas anteriormente.

Tabela 4: Ranking das variáveis selecionadas em cada método

Ranking	Método Han et al. (2016)	Método modificado
1º	Frequência do uso de *Ridesourcing* pós COVID-19	Frequência do uso de *Ridesourcing* pós COVID-19
2º	Modo da viagem mais frequente	Frequência do uso de transporte público pós COVID-19
3º	Frequência do uso de transporte público pós COVID-19	Modo da viagem mais frequente
4º	Motivo do uso de *Ridesourcing*	Frequência do uso de automóvel pós COVID-19
5º	Motivo da viagem de bicicleta	Substituição do transporte público por *Ridesourcing*
6º	Higiene do transporte público	Motivo da viagem de bicicleta
7º	Distância média da viagem com *Ridesourcing*	Frequência do uso de *bikesharing* pós COVID-19
8º	Frequência do uso de automóvel pós COVID-19	Higiene do transporte público
9º	Idade	Distância média da viagem com *Ridesourcing*

Com base nas variáveis selecionadas, foram realizados testes Qui-quadrado de associação entre a variável dependente e as variáveis independentes selecionadas, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Resultados do teste Qui-quadrado com as variáveis selecionadas em cada procedimento

Variável	p-valor	Método Han et al. (2016)	Método modificado
Frequência do uso de *Ridesourcing* pós COVID-19	0,00000	PRESENTE	PRESENTE
Frequência do uso de automóvel pós COVID-19	0,00000	PRESENTE	PRESENTE
Frequência do uso de transporte público pós COVID-19	0,00000	PRESENTE	PRESENTE
Frequência do uso de *bikesharing* pós COVID-19	0,00002	AUSENTE	PRESENTE
Modo da viagem mais frequente	0,00142	PRESENTE	PRESENTE
Motivo da viagem de bicicleta	0,00185	PRESENTE	PRESENTE
Distância média da viagem com *Ridesourcing*	0,00447	PRESENTE	PRESENTE
Higiene do transporte público	0,01178	PRESENTE	PRESENTE
Substituição do transporte público por *Ridesourcing*	0,01622	AUSENTE	PRESENTE
Idade	0,14870	PRESENTE	AUSENTE
Motivo do uso de *Ridesourcing*	0,96790	PRESENTE	AUSENTE

Ho: Não existe associação entre as variáveis (nível de confiança 95%)

Analisando os resultados na Tabela 5 e considerando o intervalo de confiança de 95% definido para o teste, pode-se concluir que a hipótese nula é rejeitada em favor da hipótese alternativa para todas as variáveis, exceto para as variáveis "Idade" e "Motivo do uso de *Ridesourcing*". Assim sendo, nota-se que todas as nove variáveis selecionadas pelo procedimento proposto apresentaram associação estatisticamente significativa com a variável dependente, conforme o teste Qui-quadrado. Por outro lado, apenas sete dentre as nove variáveis selecionadas através do procedimento proposto por Han et al. (2016) passaram no teste de associação. Ademais, ao realizar o teste Qui-quadrado para as variáveis não selecionadas pelos procedimentos, nota-se que a hipótese nula é rejeitada em favor da hipótese alternativa para outras duas variáveis: segurança no transporte público (p-valor: 0,02) e segurança sanitária no transporte público (p-valor: 0,03). A ausência de duas variáveis explicativas potenciais pode estar relacionada à escolha do percentual de seleção, que é adotado como sendo 50% no procedimento da literatura.

4. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou dois procedimentos, baseados no uso da técnica de Floresta Aleatória, para a seleção de variáveis com base nas métricas de *Mean Decrease Accuracy* e *Mean Decrease Gini*. A aplicação dos procedimentos se mostrou eficiente para o contexto de análise de dados relativos a hábitos de transporte pós pandemia da COVID-19. Os resultados obtidos indicam que o procedimento proposto é eficaz na seleção de um subconjunto reduzido de variáveis, contribuindo para a simplificação e melhor interpretação do fenômeno investigado. Ao comparar os resultados obtidos pelos dois procedimentos, testes estatísticos demonstraram que o procedimento proposto resulta em maior consistência entre as variáveis selecionadas e a variável de interesse, evidenciando seu potencial para futuras aplicações em modelagens explicativas e preditivas no campo da mobilidade urbana. As variáveis selecionadas na explicação de frequência de uso do transporte ativo pós-pandemia corroboram as conclusões obtidas em outros trabalhos, reiterando a influência de variáveis como fatores socioeconômicos, características da viagem e mudanças de uso de outros modos de transporte concorrentes (Vahedi et al., 2021; Cusack, 2021; Hasan et al., 2019). Ressalta-se que o procedimento proposto

pode ser eficiente em conjuntos muito grandes de variáveis explicativas, auxiliando na seleção e melhor interpretação de modelos. Ainda, pode-se citar que, além de robusta, a técnica de FA não tem restrições matemáticas relativas à distribuição populacional, multicolinearidade ou tipo de variável utilizada (ordinal, nominal, contínua, etc.), sendo o seu uso potencial para indicação de subgrupos de variáveis para modelos e análises posteriores. Para a validação do método proposto, recomenda-se, em trabalhos futuros, a realização de novas aplicações utilizando diferentes bases de dados, de modo a conferir maior robustez e confiabilidade ao procedimento.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta pesquisa foi apoiado pelo CNPq (processos 311964/2022-2 e 305973/2023-1) e pela Capes (processo 88887.957727/2024-00). Aos pesquisadores Sérgio Santos de Jesus e Laura Moraes pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Nacional de Transportes Públicos. (2020) Ciclovias mais largas e sem zigue-zagues podem ser legado da pandemia. Disponível em: https://www.antp.org.br/noticias/clippings/ciclovias-mais-largas-e-sem-zigue-zagues-podem-ser-legado-da-pandemia.html (acesso em 14/05/2025).

Breiman, L. (2001) Random forests. Machine learning, v. 45, p. 5–32. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Calle, M. L. e V. Urrea (2011) Stability of Random Forest importance measures. Briefings in bioinformatics, v.12,n. 1, p. 86–89. DOI: https://doi.org/10.1093/bib/bbq011

Cusack, M. (2021) Individual, social, and environmental factors associated with active transportation commuting during the COVID-19 pandemic. Journal of Transport & Health. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101089

Goodman, L. A. (1961) Snowball sampling. The annals of mathematical statistics, 32(1), p. 148–170. DOI: https://doi.org/10.1214/aoms/1177705148

Han, H.; X. Guo e H. Yu (2016) Variable selection using mean decrease accuracy and mean decrease gini based on random forest. 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). IEEE, p. 219–224. DOI: https://doi.org/10.1109/ICSESS.2016.7883053

Hasan, R. A., Abbas, A. H., Kwayu, K.M., Oh, J. S. (2019) Role of social dimensions on active transportation and environmental protection: a survey at the University of Samarra, Iraq Journal of Transport & Health, v.14, p. 1005-1064. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.05.003

Khan, F., Tarimer, I., Alwageed, H. S., Karadağ, B. C., Fayaz, M., Abdusalomov, A. B. e Cho, Y.-I. (2022) Effect of Feature Selection on the Accuracy of Music Popularity Classification Using Machine Learning Algorithms. Electronics, 11(21), 3518. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11213518

Li, Y., Li, C., Li, M., e Liu, Z. (2019). Influence of Variable Selection and Forest Type on Forest Aboveground Biomass Estimation Using Machine Learning Algorithms. Forests, 10(12), 1073. DOI: https://doi.org/10.3390/f10121073

Liaw, A. e M. Wiener (2002) Classification and regression by randomForest. R news, v. 2, n. 3, p. 18–22. Disponível em: https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-022/RN-2002-022.pdf (acesso em 15/05/2025)

Moraes, L. R.; Jesus, S. S. de e Pitombo, C. S. (2024) Mudanças de comportamento relacionadas ao uso do transporte público e ridesourcing após a pandemia da COVID-19. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/mudancas-de-comportamentos-relacionadas-ao-uso-do-transporte-publico-e-ridesourc?lang=pt-br (acesso em 09/12/ 2024)

Rodrigues da Silva, A. N., Pitombo, C. S., Pedreira Junior, J. U., Ciríaco, T. G. M. e Costa, C. S. (2023) Changes in mobility and challenges to the transport sector in Brazil due to COVID-19. In: Transportation Amid Pandemics, Elsevier, p. 105-118. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99770-6.00010-7

Vahedi, J., Shams, Z. e Mehdizadeh, M. (2021) Direct and indirect effects of background variables on active commuting: Mediating roles of satisfaction and attitudes. Journal of Transport & Health, v. 21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101054

Verikas, A., Gelzinis, A. e Bacauskiene, M. (2011) Mining data with random forests: A survey and results of new tests. Pattern recognition, v. 44, n. 2, p. 330–349. DOI: https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.08.011

Zafri, N., Khan, A., Jamal, S. e Alam, B. (2021) Impacts of the COVID-19 Pandemic on Active Travel Mode Choice in Bangladesh: A Study from the Perspective of Sustainability and New Normal Situation. Sustainability, 13(12), 6975. DOI: https://doi.org/10.3390/su13126975

Zhang, Y. e Fricker, J. (2021) Quantifying the impact of COVID-19 on non-motorized transportation: A Bayesian structural time series model. Transport Policy, v. 103, p. 11-20. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.013

João Pedro Davoli (joaopdavoli@usp.br)
Cira Souza Pitombo (cirapitombo@usp.br)
André Luiz Cunha (alcunha@usp.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
Av. Trabalhador São Carlense, 400 - São Carlos - SP, Brasil.

MODELAGEM DA CAMINHABILIDADE EM AMBIENTE UNIVERSITÁRIO: ESTUDO DE CASO DO CAMPUS SANTA MÔNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Gabriel Rutowitcz Barroso[1], Laísa Aurora Rocha Queiroz[1], Maria Lígia Chuerubim[1], Leandro Cardoso[2], Rogério D' Ávila[2], Ana Paula de Oliveira Freitas [3], Ryane Moreira Barros[2]

[1]Universidade Federal de Uberlândia, [2]Universidade Federal de Minas Gerais, [3]Mobilithas

RESUMO

Este estudo investiga a caminhabilidade no campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com foco na promoção da mobilidade ativa em ambientes universitários. Foram aplicadas duas metodologias para o cálculo do Índice de Caminhabilidade (IC): Média Aritmética Simples e Distância de Mahalanobis. A pesquisa utilizou dados georreferenciados obtidos *in loco* e por Sistemas de Informação Geográfica (SIG), analisando indicadores como tipo e regularidade do piso, largura de calçadas, sinalização, presença de obstáculos e arborização. Os resultados demonstram deficiências na infraestrutura pedonal, principalmente em aspectos relacionados à acessibilidade e segurança. A inclusão de fatores psicossociais ampliou a sensibilidade do modelo. Os valores obtidos classificam a caminhabilidade como regular e insuficiente, reforçando a necessidade de intervenções urbanas qualificadas. O estudo contribui com subsídios técnicos e metodológicos para o replanejamento de espaços universitários mais inclusivos, sustentáveis e seguros.

1. INTRODUÇÃO

A caminhabilidade é um dos elementos centrais no planejamento urbano voltado à mobilidade ativa e inclusiva. A condição da infraestrutura para pedestres impacta diretamente na segurança, no conforto e na escolha modal, influenciando também aspectos de saúde, sustentabilidade e integração social. Apesar dos avanços na avaliação da caminhabilidade em centros urbanos, ainda há escassez de estudos voltados ao contexto universitário. Pesquisas recentes têm buscado preencher essa lacuna dentre estas: Pires, 2024 e Rodrigues *et al*., 2025. Muitos trabalhos carecem de abordagens quantitativas que integrem múltiplos indicadores com variabilidade estatística relevante, tais como: Global *Walkability Index* (Krambeck, 2006), ITDP Brasil (2016), Índice de Mobilidade Ativa da WRI Brasil (WRI Brasil, 2021), *Walk Score* (2025) e Teoria da Sintaxe Espacial (TSE) e Caminhabilidade (Porta e Hillier, 2004).

Nesta perspectiva, este trabalho tem como objetivo propor, aplicar e comparar metodologias de cálculo do Índice de Caminhabilidade (IC) — Média Aritmética Simples e Distância de Mahalanobis (DM) — para avaliar a qualidade da caminhabilidade no campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a partir de dados georreferenciados e indicadores adaptados ao contexto universitário, com ênfase na mobilidade ativa, acessibilidade e segurança do pedestre.

2. METODOLOGIA

O recorte espacial deste estudo corresponde ao campus Santa Mônica da UFU, situado na cidade de Uberlândia, MG, Brasil. Localizado entre as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 713000 m E a 716000 m E e 7948000 m N a 7951000 m N. O campus está inserido no fuso UTM/23S e no referencial geodésico SIRGAS 2000. Ele ocupa uma área aproximada de 1,34 km² (134 hectares), sendo sua malha urbana composta por edifícios institucionais, vias internas pavimentadas, calçadas de diferentes padrões, áreas verdes, espaços de convivência e pontos de travessia de pedestres. A análise de caminhabilidade foi conduzida com base em 72 trechos distintos, previamente mapeados e georreferenciados, abrangendo setores estratégicos do campus. Os trechos foram avaliados segundo indicadores físicos, psicossociais e ambientais, incluindo tipo e regularidade do piso, largura e inclinação das calçadas, presença de obstáculos, sinalização, iluminação, arborização, equipamentos públicos e fluxo de pedestres.

O campus Santa Mônica da UFU recebe uma média diária estimada de 30.000 a 35.000 usuários, incluindo estudantes de graduação e pós-graduação, docentes, técnicos-administrativos, prestadores de serviço e visitantes. Desse total, estima-se que mais de 20.000 deslocamentos pedonais ocorram diariamente entre os diversos blocos, estacionamentos e áreas comuns, o que evidencia a importância de uma infraestrutura adequada para a mobilidade ativa. Essa elevada circulação de pedestres reforça a relevância da avaliação da caminhabilidade como subsídio ao planejamento urbano e à promoção de espaços universitários mais inclusivos, seguros e sustentáveis.

Para o cálculo do IC em ambiente universitário foram adotadas duas abordagens: Média Aritmética Simples e Distância de Mahalanobis, ambas utilizando indicadores individuais e considerando a influência direta do pedestre. Para tanto, foram considerados indicadores desenvolvidos por Carvalho (2018), Barros (2021) e Freitas (2023), uma vez que a presente pesquisa se afigura como um desdobramento/refinamento dos trabalhos citados, representando uma importante etapa metodológica dentro de um mesmo projeto de pesquisa, e pelas demandas do local analisado, sendo estes: Piso (tipo de piso, regularidade do piso e piso tátil); Calçada (largura da calçada, inclinação longitudinal da calçada, inclinação transversal da calçada, desníveis bruscos da calçada e presença de obstáculos); Travessias (faixa de pedestre e presença de rampas de acesso); Psicossocial (pontos de encontro e uso do entorno); Equipamentos Públicos (bancos e bebedouros); Poluição (sonora); Salubridade (limpeza das vias e presença de lixeiras); Ambiente (arborização e proteção solar), Animação Urbana (movimentação de pedestres); Iluminação (condições de luminosidade); Meio Fio (sinalização segura e altura); Sinalização (placas) e contagem do número de passos do pedestre em função da distância percorrida.

Os indicadores foram organizados em 12 subcategorias com pontuação de 0 a 2, excluindo-se Conectividade e Uso do Solo. A categorização considerou os autores citados e especificidades observadas no campus. Itens como tipo de piso, travessias, sinalização, salubridade, iluminação, obstáculos, psicossocial e meio-fio foram incluídos por sua relevância funcional local. A maior parte dos indicadores foi adaptada dos estudos anteriores, enquanto outros foram criados para retratar fielmente as condições reais da área de estudo. Posteriormente, os indicadores foram modelados pela Média Aritmética Simples e pela Distância de Mahalanobis, com a finalidade de calcular o IC por meio da proposição e comparação de diferentes abordagens, de forma a retratar com precisão e de forma realista a caminhabilidade, bem como a limitação e a robustez de cada método.

3. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os experimentos e resultados obtidos pelas abordagens propostas.

3.1. Cálculo do Índice de Caminhabilidade pela Média Aritmética Simples

O modelo matemático para calcular o IC com base nos coeficientes fornecidos pode ser obtido pela Equação 1:

$$IC = (P \times w_P + C \times w_C + T \times w_T + PS \times w_{PS} + EP \times w_{EP} + PL \times w_{PL} + S \times w_S + A \times w_A + AU \times w_{AU} + I \times w_I + MF \times w_{MF} + SI \times w_{SI})/12 \quad (1)$$

Obtida pelos seguintes indicadores: P (Piso); C (Calçada); T (Travessias); PS (Psicossocial); EP (Equipamentos Públicos); PL (Poluição); S (Salubridade); A (Ambiente); AU (Animação Urbana); I (Iluminação); MF (Meio Fio) e SI (Sinalização). Os pesos (w_x) podem ser ajustados pela importância de cada fator (x) ou terem pesos iguais ($w_x = 1$). Cada índice é calculado pela média dos seus respectivos fatores, resultando em: $P = 0{,}4067$; $C = 0{,}788$, $T = 0{,}530$, $PS = 0{,}615$, $EP = 0{,}520$, $PL = 0{,}510$, $S = 0{,}760$; $A = 0{,}600$, $AU = 0{,}760$, $I = 0{,}560$, $MF = 0{,}600$ e $SI = 0{,}490$. Substituindo esses coeficientes na Equação 1 verificamos que o IC calculado é de 0,595 (59,5%). Os 12 indicadores foram ponderados de forma equivalente, de modo que cada um recebeu peso igual $w_x \cong 0{,}0833$ $(1/12)$. Essa decisão metodológica visou garantir a equiparação entre os indicadores, permitindo uma comparação direta com o segundo método adotado — a Distância de Mahalanobis — no qual os pesos são definidos estatisticamente a partir da variância e da covariância dos dados. Assim, no primeiro modelo, todos os indicadores contribuíram de forma uniforme para a composição do índice.

A área média ocupada por pedestres em ambientes urbanos varia de 0,75 a 1,0 m² por pessoa, conforme normas técnicas. Adotou-se o valor de 0,8 m²/pessoa, recomendado pelo *Transportation Research Board* (TRB, 2010), correspondente a um raio de 0,50 m. O indicador "Pedestre", calculado pela média dos fatores, resultou em 0,31, sendo incluído na Equação (2).

$$IC = (P \times w_P + C \times w_C + T \times w_T + PS \times w_{PS} + EP \times w_{EP} + PL \times w_{PL} + S \times w_S + A \times w_A + AU \times w_{AU} + I \times w_I + MF \times w_{MF} + SI \times w_{SI} + Pedestre \times w_{Pedestre})/13 \quad (2)$$

A inclusão do indicador "Pedestre" reduziu levemente o $IC = 0{,}573$ (57,3%), em comparação ao valor obtido sem ele (0,5948), sem alterar a classificação geral como regular e insuficiente.

3.2. Cálculo do Índice de Caminhabilidade pela Distância de Mahalanobis

A Distância de Mahalanobis (DM) considera a variância e a correlação entre variáveis, ponderando os indicadores com base na matriz de covariância, cujo cálculo é obtido pela Equação 3 (Mahalanobis, 1936):

$$D_M(X_i) = \sqrt{(X_i - \mu)^T \cdot S^{-1} \cdot (X_i - \mu)} \quad (3)$$

Onde: X_i é o vetor dos indicadores, μ a sua média, T a transposta e S a matriz de covariância inversa. Quanto maior a D_M, maior a influência do indicador na variabilidade dos dados. Os indicadores foram organizados em $X_i = [P, C, T, PS, EP, PL, S, A, AU, I, MF, SI, Pedestre]$, e a média geral calculada por $\mu = \sum X_i/n$, com n igual ao número indicadores. Quando a variável "Pedestre" é constante, ela não altera a estrutura estatística do conjunto de dados, e, portanto, o cálculo da DM para cada observação permanece idêntico - mesma distribuição espacial dos resultados. Como cada indicador foi representado por uma única variável, a matriz de covariância foi tratada como unidimensional. A D_M foi calculada para os 13 indicadores, incluindo o "Pedestre", e os pesos foram extraídos com base nessa distância (Equação 3). Para aplicação no modelo, os valores foram normalizados ($w_i = D_M(X_i)/\sum D_M(X_i)$).

A ponderação (w_i) permite aplicar os pesos de forma consistente no cálculo do IC. O indicador “Calçada” apresentou o maior peso (15,7%), seguido de “Piso” (12,15%). Já “Travessias” e “Psicossocial” tiveram os menores pesos (3,14%), indicando menor influência. “Ambiente” (6,24%) e “Animação Urbana” (7,64%) também se destacaram pela contribuição relevante à caminhabilidade. O IC calculado a partir dos pesos obtidos pela D_M ponderada é expresso pela Equação 4:

$$IC_{D_M} = \sum (X_i \times w_i) \quad (4)$$

Onde: IC_{D_M} é o IC calculado com os valores dos indicadores X_i e os pesos normalizados (w_i) obtidos pela D_M . O valor final de 0,578, refletiu uma distribuição mais equilibrada entre os indicadores, com destaque para “Calçada” (15,7%) como o mais influente, e “Travessias” e “Psicossocial” (≈ 3%) como os menos relevantes — reforçando a predominância da infraestrutura física na caminhabilidade observada.

3.3. Análise Comparativa entre IC pela Média Aritmética Simples e pela Distância de Mahalanobis

Este estudo comparou duas metodologias para o cálculo do IC: a média aritmética, que utiliza a distância Euclidiana e assume independência entre variáveis, e a Distância de Mahalanobis (DM), que incorpora variância, correlação e estrutura multivariada por meio da matriz de covariância inversa. Os ICs foram classificados em seis faixas conforme o Nível de Serviço (*Level of Service*- LOS), de A (Excelente) a F (Péssima). O gráfico empilhado (Figura 1a) revelou alta similaridade entre os resultados com e sem o indicador pedestre. Isso indica que a variável “Pedestre” contribui mais conceitualmente à análise do que numericamente. A análise gráfica (Figura 1b) reforçou a robustez do modelo da DM, evidenciando a consistência na identificação dos trechos críticos entre as abordagens.

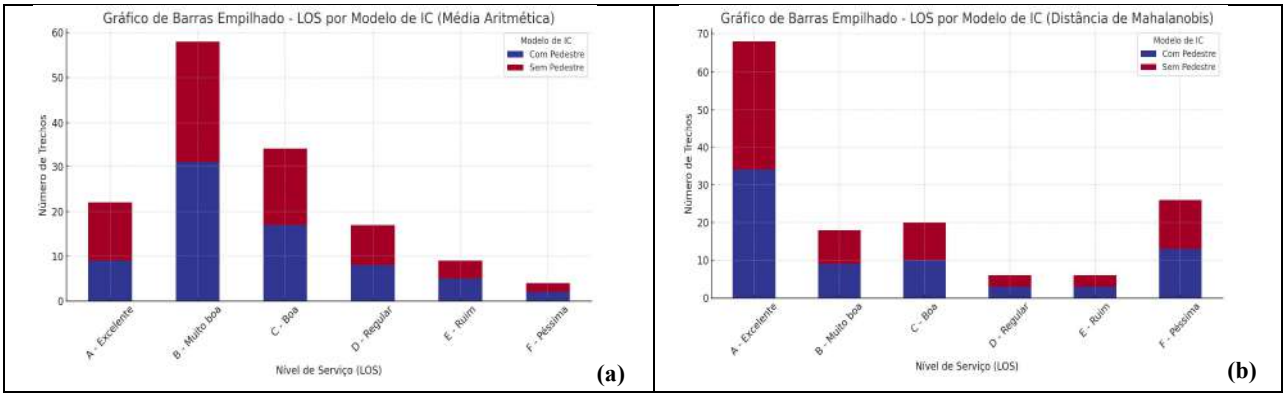


Figura 1: Distribuição Espacial Normalizada dos valores médios do IC obtidos via média aritmética (a) e DM (b), com e sem o indicador Pedestre, por LOS.

A distribuição espacial do IC pela média aritmética (Figuras 2 e 3) mostrou pouca variação entre os modelos

com e sem o indicador "Pedestre", sendo os trechos 57 e 11 os melhores classificados, enquanto os trechos 72 e 8 apresentaram maior criticidade. A inclusão do indicador pedestre resultou em pequenas alterações, sem impactar significativamente os valores médios do IC. Na modelagem do IC pela DM (Figuras 4 e 5) o trecho 42 é o melhor avaliado e 13 o trecho é o pior avaliado em ambos os métodos, com e sem o indicador pedestre. O valor médio sem pedestre (0,442) sugere uma classificação entre "Muito Boa" e "Excelente", enquanto o valor médio normalizado com pedestre, indica que os dois métodos são praticamente idênticos, o que confirma que a inclusão da variável "Pedestre" não impactou a avaliação média da caminhabilidade.

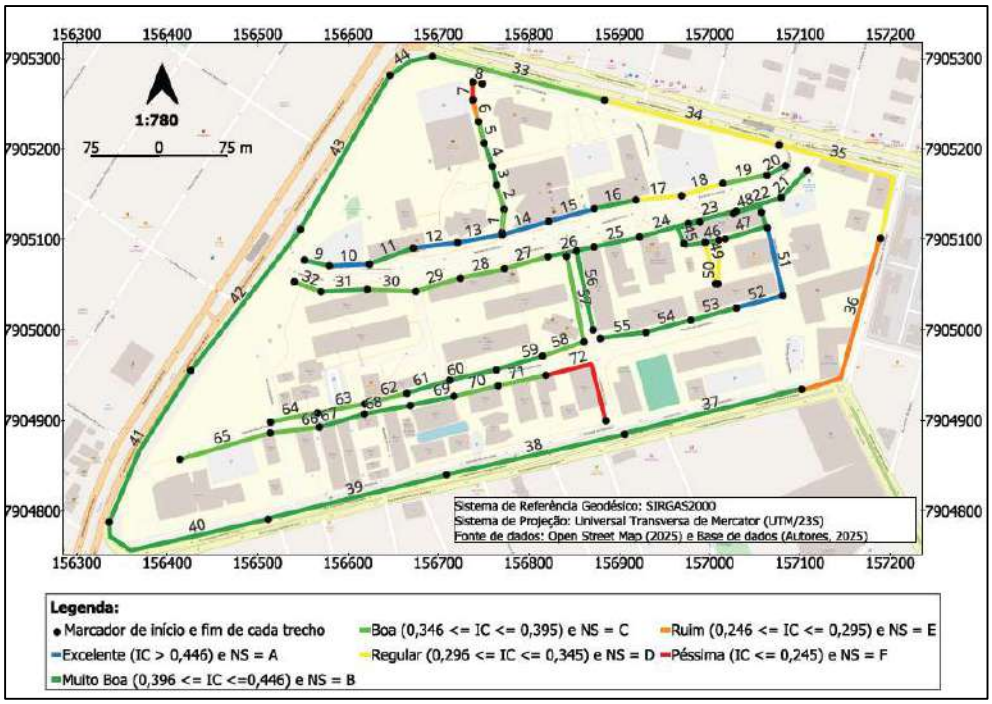


Figura 2: Distribuição espacial dos valores médios dos ICs por trecho obtidos pela Média Aritmética sem o indicador pedestre.

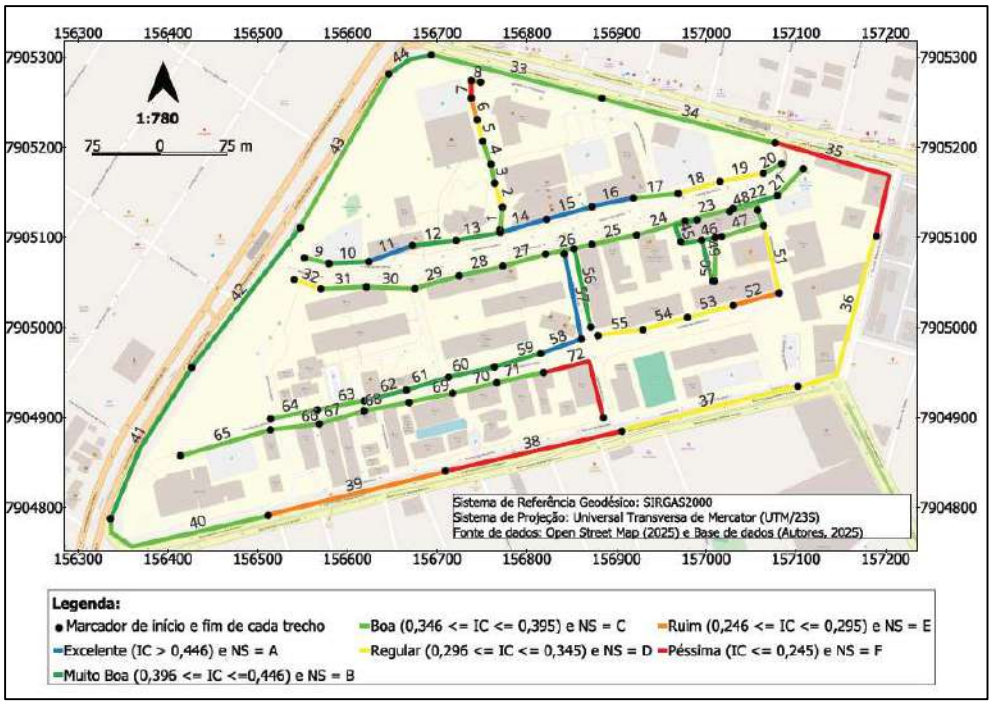


Figura 3: Distribuição espacial dos valores médios dos ICs por trecho obtidos pela Média Aritmética com o indicador pedestre.

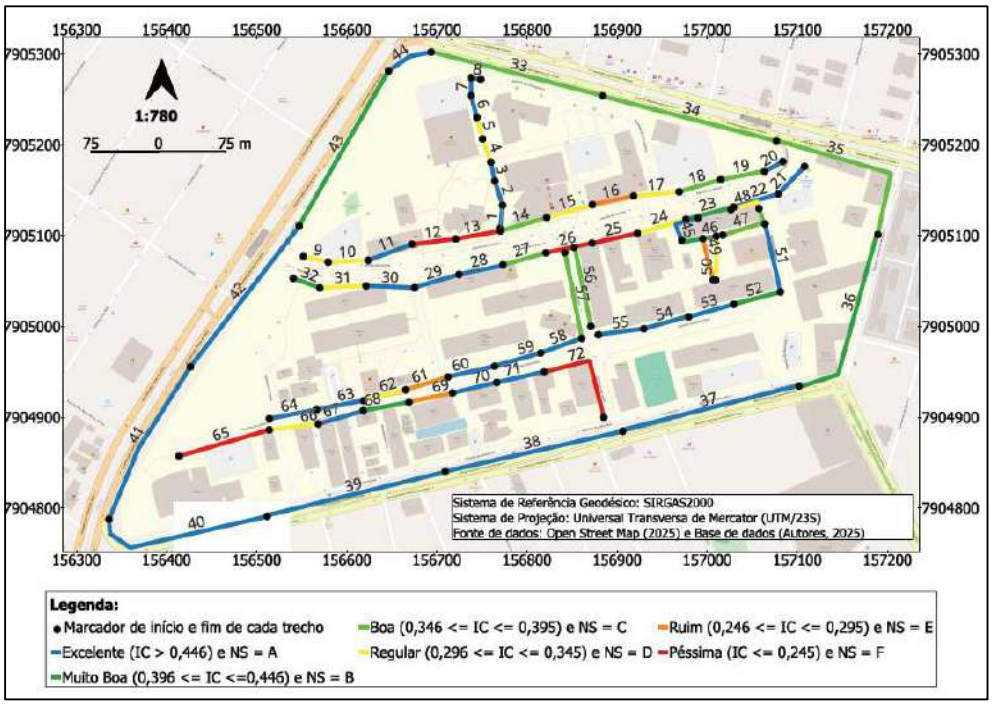


Figura 4: Distribuição espacial dos valores médios dos ICs por trecho obtidos pela DM sem o indicador pedestre.

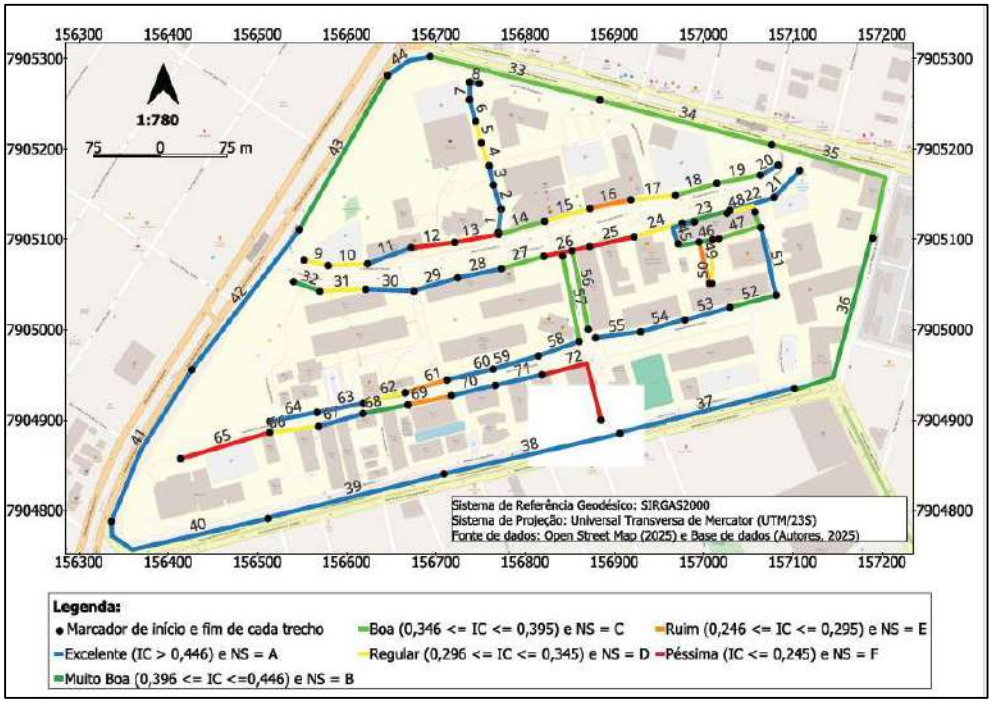


Figura 5: Distribuição espacial dos valores médios dos ICs por trecho obtidos pela DM com o indicador pedestre.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo avaliou a caminhabilidade no campus Santa Mônica da UFU utilizando a média aritmética e a DM, revelando deficiências em calçadas, pisos e sinalização. A média aritmética serviu como referência básica, enquanto a DM demonstrou maior sensibilidade ao considerar a variabilidade dos dados. Embora o indicador "Pedestre" não tenha impactado os resultados por ser constante, pode ser relevante em futuras análises. Os

dois modelos mostraram resultados consistentes, com predominância de trechos classificados como "Boa" ou "Muito Boa" caminhabilidade. Conclui-se que as metodologias são complementares, replicáveis e úteis para o planejamento de ambientes urbanos mais acessíveis e seguros.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do Edital DIRPE nº 2/2023 – PIBIC/UFU, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem às Faculdades de Engenharia Civil (FECIV) e de Arquitetura, Urbanismo e Design (FAUeD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à CAPES-Brasil, bem como aos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFU, em Geografia da UFMG e em Geotecnia e Transportes da UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barros, R. M. *A infância e o pedestrianismo: um estudo exploratório da percepção de crianças sobre indicadores de caminhabilidade*. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

Carvalho, I. R. V. *Caminhabilidade como instrumento de mobilidade urbana: um estudo de caso em Belo Horizonte*. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

Freitas, A. P. O. *Ciência cidadã e caminhabilidade em campus universitário: a percepção dos pedestres na UFMG*. 2023. 162 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte, 2023.

ITDP Brasil (2016). *Índice de caminhabilidade: ferramenta para avaliação da caminhabilidade em áreas urbanas*. Rio de Janeiro: ITDP Brasil.

Krambeck, H. V. *The Global Walkability Index: talk the walk and walk the talk*. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Transporte e Desenvolvimento Urbano) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2006. Disponível em: https://www.gtkp.com/document/the-global-walkability-index/. Acesso em: 24 jun. 2025.

Mahalanobis, P. C. On the generalized distance in statistics. Proceedings of the National Institute of Sciences of India, v. 2, n. 1, p. 49–55, 1936.

Pires, A. L. *Avaliação da caminhabilidade em espaços universitários: uma proposta metodológica aplicada*. 2024. 140 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia, Uberlândia, 2024.

Porta, S.; Hillier, B. *Network connectivity: integration (R) versus choice (R*). In: BATTY, Michael et al. (Orgs.). New Perspectives in Urban Analysis. London: UCL Press, 2004. p. 41–63.

Rodrigues, T. C.; Souza, G. G. Gomes, O. R.; Castañon, J. A. B. Borges, M. M. Caminhabilidade no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora: Uma análise sobre o platô da Faculdade de Engenharia. Revista Latino-americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade, [S. l.], v. 5, n. 21, 2025. DOI: https://doi.org/10.17271/8a9byh07. Acesso em: 5 jul. 2025.

TRB (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.

Walk Score (2025). Walk Score methodology. [S.l.]: Walk Score. Disponível em: https://www.walkscore.com/methodology.shtml. Acesso em: 24 jun. 2025.

WRI BRASIL (2021). Caderno técnico para projetos de mobilidade urbana: transporte ativo. Brasília: WRI Brasil.

Gabriel Rutowitcz Barroso (gabriel.rutowitcz@ufu.br), Laísa Aurora Rocha Queiroz (laisaaurorarq@gmail.com)
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Arquitetura Urbanismo e Design, Arquitetura e Urbanismo, Campus Santa Mônica, Bloco 1I, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia, MG, CEP: 38400-902, Brasil.
Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos (ana.santos5@aluno.ufop.edu.br), *Rogério D' Ávila* (rfdavila@gmail.com), *Ryane Moreira Barros* (ryane.moreira@hotmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901, Brasil.
Maria Lígia Chuerubim (marialigia@ufu.br), Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, Uberlândia, MG, CEP: 38400-902, Brasil.
Leandro Cardoso (leandro@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Av. Antônio Carlos, 6627, campus Pampulha, Sala 3603, Bloco 1, 3º andar, Belo Horizonte, MG, CEP: 31270-901, Brasil.
Ana Paula de Oliveira Freitas (org@mobilithas.com.br)
Mobilithas, Rua Caetano de Azeredo, 577, Barreiro, Belo Horizonte, MG, CEP: 30640-095, Brasil.

Modelagem Aplicada ao Transporte não Motorizado

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ABORDAGEM BASEADA EM AGENTES PARA O PLANEJAMENTO DE RUAS COMPLETAS, SEGURAS E INCLUSIVAS

Maria Bianka Souza Alves, Josiane Palma Lima
Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
O planejamento de transportes teve como prioridade os veículos automotivos individuais, isso trouxe externalidades negativas, como a dependência por carro e a desigualdade. O termo Ruas Completas surgiu como uma proposta de pensar o planejamento de vias urbanas abrangendo todos os modos de transporte, garantindo a segurança de todos os usuários. Como qualquer alteração na configuração das ruas tem impacto direto na mobilidade local, a simulação computacional é uma boa opção de avaliação, pois permite testar vários cenários sem a necessidade de interferir diretamente no ambiente. Sendo assim, a proposta deste trabalho tem por objetivo analisar, por meio da modelagem e simulação computacional, a inserção de conceitos de Ruas Completas e os impactos na mobilidade urbana da região central de Itajubá-MG. Este relatório apresenta o modelo conceitual piloto que será expandido, até o final desta pesquisa, para avaliar como as mudanças na infraestrutura de uma via podem melhorar a mobilidade local.

Palavras-chaves: Ruas completas, Simulação baseada em agentes, Mobilidade Urbana.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A circulação dentro das cidades está relacionada à desejos de realização de atividades sociais, culturais, políticas e econômicas consideradas necessárias na sociedade. No entanto, com o processo de urbanização acelerada e sem muito planejamento, o Brasil tornou-se muito dependente de modos motorizados para a locomoção dentro das cidades, ocasionando em um uso não democrático do espaço, visto que a população de baixa renda não usufrui adequadamente destas atividades necessárias (Santos, 1993; Vasconcellos, 2013). Dentre as estratégias que surgiram ao longo dos anos para reverter esse foco nos veículos, foi criado em 2003 o conceito de Ruas Completas, através de um movimento que buscava incluir os pedestres e ciclistas no planejamento de transportes (Mccann, 2013). Ao reorientar o planejamento, tirando o foco quase exclusivo dos automóveis, busca-se maior equilíbrio com as necessidades dos pedestres e ciclistas, através de melhorias nas infraestrutura física, como calçadas e ciclovias, travessias seguras, conectividade da rede, entre outros. Existem algumas limitações em implantar as Ruas Completas, como a aceitação dos usuários de carros ao reduzir a velocidade das vias, o custo em implantar novas infraestruturas, como calçadas e ciclovias, e a definição de quanto espaço deve ser reservado a cada modo, em razão do espaço limitado da rua (Alrawi et al., 2023). Uma forma de estudar previamente estas alterações é através da simulação computacional, onde é possível testar cenários sem alterar diretamente na realidade (Portugal, 2005). Dentre os tipos de simulação existentes, a simulação baseada em agentes vem sendo utilizada na área de transporte devido à sua capacidade em incorporar a complexidade dos comportamentos individuais e interações do mundo real (Macal et al., 2008).

Sendo assim, a proposta deste trabalho é avaliar a completude de uma via da região central da cidade de Itajubá-MG e, por meio de simulação computacional, aplicar os conceitos de Ruas Completas, considerando aspectos de segurança e inclusão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) foi instituída em 2012, com o intuito de melhorar a integração entre os diferentes modos de transportes, melhorar a acessibilidade e mobilidade de pessoas e carga no ambiente urbano (Brasil, 2012). Dentre as diretrizes da lei está a priorização dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados, além dos serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado, entendendo que estes trazem mais equidade de acesso ao transporte para uma maior parte da população.

Para aplicar a PNMU, municípios com mais de 20 mil habitantes necessitam elaborar o Plano de Mobilidade Urbana do município. Para tanto, é necessário pensar em estratégias que permitam que as pessoas se desloquem com segurança, eficácia e sustentabilidade. Todavia, de acordo com Valença et al. (2020), há muitas barreiras para se colocar em prática os princípios da PNMU, como questões econômicas, políticas, sociais e uma falta

de conhecimento técnico e de material institucional, o que dificulta o desenvolvimento adequado desta política.

O termo Ruas Completas (*Complete Streets*) surgiu em 2003 nos Estados Unidos, através de uma ação do movimento American Bikes, que advogava por uma lei que obrigasse a todos os projetos de vias terem um espaço reservados para bicicletas, numa tentativa de encontrar um termo que não fosse tão técnico e que pudesse ter um apelo popular. À medida que o movimento foi desenvolvendo, percebeu-se a necessidade de incluir outros modos de transportes que também estavam sendo desconsiderados, como pedestres. A definição mais popular de Ruas Completas é de vias que são desenhadas de maneira a garantir a segurança de todos, sejam pedestres, ciclistas, motoristas, usuários de transporte público, pessoas com mobilidade reduzida, de todas as idades e gêneros (McCann, 2013). Dentre os benefícios ao implantar os conceitos de Ruas Completas, cabe citar a melhora na segurança, reduzindo os acidentes e diminuindo os conflitos intermodais (McCann, 2013; Kim, 2019), impactos na saúde pública, através do incentivo ao uso de modos ativos (Aziz et al., 2018), melhoria na vitalidade econômica e social, ao se ter espaços mais caminháveis e mais interação, sustentabilidade, melhoria na mobilidade e mais áreas verdes (Hui et al., 2018). No entanto, a implementação do conceito possui algumas limitações, como a aceitação da redução da velocidade pelos motoristas, o custo em implantação e a distribuição do espaço limitado da rua (Alrawi et al., 2023).

O estudo das alterações das vias por meio de simulação permite avaliar a potencialidade destes benefícios, sendo um instrumento crucial na tomada de decisões. A simulação baseada em agentes (SBA), por sua vez, foca no comportamento individual das pessoas e sua interação com o ambiente, incorpora o processo de decisão para o comportamento na mobilidade, como o modo de transporte escolhido, a atividade exercida no ambiente, tempo gasto e escolhas de caminhos (Kaziyeva et al., 2023). A literatura pesquisada reforça a relevância do uso SBA para estudos de mobilidade com modelos de microssimulação (Aziz et al., 2018a; Lee et al., 2024; Liu et al., 2021; Ye et al., 2022), usando softwares variados (Vissim, Anylogic, SUMO, etc). Apesar dos trabalhos abordarem o conceito de Ruas Completas por meio de simulação, nota-se que todos tiveram foco no veículo, nas implicações no fluxo de veículos, não abordando diretamente os pedestres e os ciclistas. No entanto, testar as interações entre pedestres, ciclistas e motoristas em modelos de microssimulação é uma forma de contribuir para mobilidade sustentável e inclusiva, em estudos com foco nos transportes ativos, demonstrando uma lacuna nessa área a ser explorada.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A abordagem desta pesquisa será qualiquantitativa através do método de modelagem e simulação computacional. Segundo Miguel et al. (2018), para a abordagem quantitativa, as fases iniciais costumam ser mais demoradas pois todo o delineamento da pesquisa ocorre nesta etapa, sendo a análise e as conclusões menos trabalhosas. A simulação computacional é uma ferramenta que busca emular, através de relações lógicas, o funcionamento de sistemas reais, por vezes complexos demais para serem modelados somente por meio de funções matemáticas, com o intuito de observar as mudanças sob diferentes cenários.

A via a ser estudada está localizada na cidade de Itajubá está localizada ao sul de Minas Gerais, com uma área territorial de 294.835 km², o perímetro urbano de 43.441 km² e uma população estimada em 96.632 habitantes (IBGE, 2022), cujo principal modo de transporte é a pé. A via escolhida para estudo é a Avenida Coronel Carneiro Junior, classificada como via central, é uma rua que atrai muitos deslocamentos, principalmente de pedestres, devido à grande quantidade de comércios, bancos, escolas, clínicas médicas, agência de correios e residências. Serão utilizados os dados de tráfego coletados pela prefeitura municipal para realização do Plano de Mobilidade Urbana realizado em 2023. Além disso, será aplicado um questionário para avaliar a percepção dos usuários quanto à completude da via, baseado nos critérios de Hui et al (2018), movimento, ambiente e lugar. A partir desses dados, será possível criar uma base para definição do comportamento dos agentes para que seja realizada a modelagem conceitual e sua calibração para posterior simulação de cenários representativos do contexto de ruas completas.

O objetivo é relevante para o estudo de mobilidade urbana visto a contribuição da simulação para estudos na área, que não foram realizadas durante o desenvolvimento do Plano de Mobilidade, especificamente para os pedestres e os ciclistas. A escolha do local de pesquisa ser uma área de interesse da cidade, por se localizar em uma área central, também demonstra uma busca para compreender a complexidade dos movimentos de pessoas em ambientes de grande circulação.

Agradecimentos
Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq, CAPES e UNIFEI pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alrawi, F., & Nssaif, H. (2023). Complete Street As a Key for Urban Enviroment Development. *Revista de Gestao Social e Ambiental*, *17*(8), 1–9. doi: 10.24857/rgsa.v17n8-018

Aziz, H. M. A., Park, B. H., Morton, A., Stewart, R. N., Hilliard, M., & Maness, M. (2018a). A high resolution agent-based model to support walk-bicycle infrastructure investment decisions: A case study with New York City. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *86*(November 2016), 280–299. doi: 10.1016/j.trc.2017.11.008

Brasil (2012). Lei n. 12.587, Política Nacional de Mobilidade Urbana. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em 8 de jun de 2025.

Hui, N., Saxe, S., Roorda, M., Hess, P., & Miller, E. J. (2018). Measuring the completeness of complete streets. *Transport Reviews*, *38*(1), 73–95. doi: 10.1080/01441647.2017.1299815

IBGE - : IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2022). *Portal de Mapas do IBGE*. Brasília. Disponível em: https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa223712

Kaziyeva, D., Stutz, P., Wallentin, G., & Loidl, M. (2023). Large-scale agent-based simulation model of pedestrian traffic flows. *Computers, Environment and Urban Systems*, *105*(May), 102021. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2023.102021

Kim, D. (2019). The transportation safety of elderly pedestrians: Modeling contributing factors to elderly pedestrian collisions. *Accident Analysis & Prevention*, *131*, 268–274. doi: 10.1016/j.aap.2019.07.009

Lee, K., Mehrara Molan, A., Pande, A., Hwang, U., Guhathakurta, S., Nkanor, M., & Sergio, B. (2024). Assessing the impact of bicycle infrastructure on safety and operations using microsimulation and surrogate safety measures: A case study in Downtown Atlanta. *International Journal of Transportation Science and Technology*. doi: 10.1016/j.ijtst.2024.06.002

Liu, B., Mehrara Molan, A., Pande, A., Howard, J., Alexander, S., & Lou, Z. (2021). Microscopic traffic simulation as a decision support system for road diet and tactical urbanism strategies. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(14). doi: 10.3390/su13148076

Macal, C. M., & North, M. J. (2008). Agent-based modeling and simulation: ABMS examples. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 101–112. doi: 10.1109/WSC.2008.4736060

Mccann, B. (2013). *Complete our streets: The transition to Safe and Inclusive Transportation Networks*. IslandPress.

Miguel, P., Fleury, A., Mello, C. H., Nakano, D., Lima, E., Turrioni, J., Ho, L. L., Morabito, R., Costa, S., Martins, R., Sousa, R., & Pureza, V. (2018). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações* (3rd ed.). GEN LTC.

Portugal, L. da S. (2005). *Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem* (1st ed.). Rio de Janeiro: Interciência.

Santos, M. (1993). *A Urbanização Brasileira* (3rd ed.). São Paulo: HUCITEC.

Valença, G., & Santos, E. (2020). A relação entre o conceito de ruas completas e a Política Nacional de Mobilidade Urbana: aplicação a um projeto viário em Natal-rn, Brasil. *EURE (Santiago)*, *46*(139), 73–89. doi: 10.4067/S0250-71612020000300073

Vasconcellos, E. de A. (2013). *Mobilidade Urbana: O que você precisa saber* (1st ed.). São Paulo: Companhia das Letras.

Ye, Q., Feng, Y., Candela, E., Macias, J. E., Stettler, M., & Angeloudis, P. (2022). Spatial-temporal flows-adaptive street layout control using reinforcement learning. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(1). doi: 10.3390/su14010107

Maria Bianka Souza Alves (mariabianka@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. B P S, 1303, Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil
Josiane Palma Lima (jplima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. B P S, 1303, Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil

MOBILIDADE A PÉ E BRT: ESTRATÉGIAS PARA SISTEMATIZAR E PRIORIZAR ELEMENTOS URBANOS

Danielle Sousa Vale, Érika Cristine Kneib
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
A pesquisa busca sistematizar a mobilidade a pé em vias com corredores exclusivos de BRT, com foco na cidade de Goiânia, GO. Considerando a crescente importância da mobilidade a pé e do transporte público coletivo (TPC) no contexto das cidades, o estudo propõe uma abordagem sistêmica baseada na Teoria Geral dos Sistemas para identificar e hierarquizar os elementos essenciais à priorização do pedestre. A metodologia combina revisão sistemática, uso do software Kumu e estudos de caso nas Avenidas Anhanguera e Goiás Norte. Os resultados preliminares indicam uma lacuna científica na integração entre pedestres e BRT, levando em conta todas nuances que a mobilidade a pé carrega, e destacam a ausência de políticas públicas integradas. A pesquisa reforça a necessidade de compreender a mobilidade a pé como um sistema interdependente, onde políticas fragmentadas comprometem a eficácia das ações urbanas. Assim, propõe diretrizes mais coordenadas e fundamentadas para a priorização da mobilidade a pé em eixos estruturais de transporte coletivo.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E PROPOSTA DA PESQUISA

Estudos em relação à mobilidade a pé têm sido bastante abordados nos últimos anos (Calliari, 2019), com isso na última década houve maior conscientização e avanço nos estudos sobre mobilidade a pé. Ainda assim, falta aprofundamento em ações práticas e políticas públicas, pois o pedestre segue sendo tratado como não prioritário pela gestão pública.

O trabalho considera a mobilidade a pé como um modo de transporte que se baseia na capacidade de cada pessoa desempenhar seus deslocamentos por meio da caminhada com independência e autonomia, seja livremente ou com o apoio de recursos que a auxilie (Brasil, 2020). Sendo assim, estuda-se os elementos que englobam a capacidade do espaço de permitir o ato de caminhar.

Além da relevância atribuída ao caminhar, em busca de um modelo de mobilidade que seja mais eficiente e promova benefícios para a vida nas cidades, o transporte público coletivo (TPC) ganha destaque e reafirma sua importância fundamental (Alcântara et al., 2019). De acordo com a UITP (2011), nenhuma cidade opera de maneira eficiente sem um transporte público de qualidade. Esse sistema ajuda a diminuir congestionamentos, melhora a utilização do espaço urbano, facilita o acesso a diversas atividades na cidade, conecta as pessoas às interações sociais, promove a inclusão social e impulsiona o desenvolvimento econômico, social e ambiental.

A capacidade e potencial dos sistemas de BRT ainda não tem sido suficientemente valorizada pelos planejadores urbanos, nem tem sido integrada de forma eficaz às políticas de desenvolvimento urbano, como é recomendado pela Política Nacional de Mobilidade Urbana (Brasil, 2012). Ainda são escassos os estudos e possibilidades em relação à integração das grandes áreas de BRT e mobilidade a pé, na qual não se estudam de forma conjunta a capacidade de estruturação, formas de integração e influência que uma tem na outra, o que resulta em lacunas de implementação e dissociação dos modais de transporte na cidade.

Segundo Capra (2014), o pensamento sistêmico consiste em abordar um assunto através da interconexão de diversos sistemas. Quando aplicado às análises urbanas, essa abordagem permite examinar o objeto de estudo dentro de seu ambiente e entender as dinâmicas entre elementos. Assim sendo, a cidade pode ser vista como um conjunto complexo de sistemas, incluindo a mobilidade urbana com suas variadas formas de transporte (Naciff; Kneib; Amaral, 2019). Assim, pode-se considerar que a mobilidade a pé e o transporte público coletivo, com o recorte do BRT na pesquisa, funcionam como dois sistemas que interagem e trocam entre si, em busca de um mesmo objetivo.

Tendo esse panorama, a pesquisa tem por objetivo geral sistematizar a mobilidade a pé em vias com presença de BRT, assim sendo possível desenvolver uma hierarquização de elementos para sua priorização nessas vias. Após o desenvolvimento do sistema da mobilidade a pé em vias com BRT, como estudo de caso, busca-se a aplicação da metodologia de estudo na cidade de Goiânia, capital do estado de Goiás, GO - Brasil, que atualmente possui duas linhas de BRT em funcionamento: Avenida Anhanguera e Avenida Goiás Norte. Ambas são os maiores elos de ligação entre as regiões leste e oeste, e norte e sul da cidade, tendo quilômetros de extensão dentro da cidade de Goiânia e passando ou se conectando com grande parte dos bairros da cidade, são um dos principais eixos de estruturação da rede e engloba diversos modais em sua utilização diária.

Assim, este trabalho amplia o conceito para definição de mobilidade a pé em vias com BRT enquanto sistema,

traz uma contribuição conceitual a respeito da mobilidade a pé, sob a perspectiva da visão sistêmica. Contribui com a evidência da importância da compreensão da mobilidade urbana como um sistema que busca atingir seu objetivo, promover o deslocamento das pessoas pela cidade, a partir das interações dos seus subsistemas e elementos. O estudo não se limita a estudar os deslocamentos a pé em relação as viagens e acesso ao transporte coletivo, mas sim busca sistematizar a relação do pedestre e sua locomoção, de forma ampla, em vias que se estruturam pela presença de um BRT. Toda mobilidade a pé que acontece no percurso dessa via é levada em consideração no estudo.

Tendo em vista a possibilidade de novas abordagens de estudo e a notável importância do pedestre para a mobilidade urbana, a pergunta motivadora da pesquisa se trata de "Como identificar os elementos que devem ser priorizados no planejamento e desenho urbano para favorecer a mobilidade a pé em vias com corredor exclusivo de BRT?" Adota-se a hipótese de que ao adotar uma abordagem baseada na teoria geral dos sistemas, é possível identificar elementos existentes e necessários, as relações que ocorrem entre eles, e modelar o sistema, mostrando lacunas e oportunidades de intervenção que possibilitem a criação de um ambiente urbano mais favorável à mobilidade a pé em vias com corredor exclusivo BRT.

2. PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA

O trabalho utiliza da Teoria Geral dos sistemas como ferramenta para estruturação de metodologia adotada, funcionando da seguinte forma: 1) entendimento do contexto em que o sistema está inserido e faz parte; 2) formalização do sistema, por meio da identificação de seus elementos e relações; e 3) identificação do objetivo do sistema e suas relações com outros sistemas. Essas etapas dialogam com a metodologia da pesquisa no sentido de guiar a revisão sistemática e direcionar a obtenção dos elementos das Avenidas com presença de BRT. Esta pesquisa se estrutura nas seguintes etapas metodológicas:

Etapa 1. Discussões teóricas acerca da mobilidade a pé, teoria geral dos sistemas e vias com corredores exclusivos de BRT, relacionando-os aos desafios urbanos enfrentados, explorando sua aplicação em modos de transporte ativo e estruturando elementos-chave para análise.

Etapa 2. Revisão sistemática e bibliográfica para identificação dos elementos da mobilidade a pé em vias com corredor exclusivo de BRT;

Etapa 2. Construção do mapa do sistema da mobilidade a pé em vias com corredor exclusivo de BRT no software Kumu;

Etapa 3. Hierarquização dos elementos do sistema da mobilidade a pé para identificar principais elementos, estruturas e relações existentes no sistema no software Kumu;

Etapa 4. Aplicação das estruturas do sistema nas Avenidas Anhanguera e Goiás Norte, em Goiânia;

a. Elaboração de parâmetros e índices que possam mensurar os elementos do Sistema de Mobilidade a pé e suas relações nas avenidas.
b. comparação dos resultados obtidos com os estudos de caso, avaliando a eficácia da metodologia proposta e sua aplicação em futuras pesquisas.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Até o momento, concluiu-se a etapa 01 de discussões teóricas acerca das grandes áreas que abrangem a pesquisa, e partiu-se para a revisão sistemática, que nessa pesquisa se encaixa como método. Para este estudo foi feito um recorte temporal de 2015 a 2025, como foco em artigos científicos nos idiomas inglês e português, nas bases de dados *Scielo, Scopus e Web of Science*. A revisão selecionou apenas artigos científicos publicados em revistas relacionadas a grande área de Engenharias. Foram utilizadas 12 palavras-chave, como: pedestre, mobilidade a pé, ruas completas, vias com BRT, entre outras. Paralelo a revisão sistemática, fez-se também uma revisão bibliográfica através de 8 manuais e cadernos técnicos com a temática. Através das revisões, foi possível encontrar 100 elementos que compõem o sistema.

Constatou-se a ausência de uma terminologia específica e a escassez de estudos que integrem esses temas. Não foram encontrados trabalhos que tratem da mobilidade a pé de forma sistêmica em vias com BRT, nem que proponham análises baseadas em indicadores. Identificou-se, assim, uma lacuna científica na priorização do pedestre, na definição espacial dessa priorização e na relação com a estrutura urbana, destacando a necessidade de mais estudos nessa área.

A partir dos elementos encontrados, foram categorizados como pertencentes as áreas de: gestão, calçada, mobilidade, segurança e ambiente. A figura 01 exemplifica o que vem sendo produzido na pesquisa até o presente momento, com a aplicação dos elementos no software Kumu, que fornece uma visualização de como os elementos interagem entre si e como o sistema é composto. Nela é retratado apenas os elementos que foram

categorizados no grupo de mobilidade, e serve como uma possibilidade de entendimento para o que será alcançado na conclusão da dissertação.

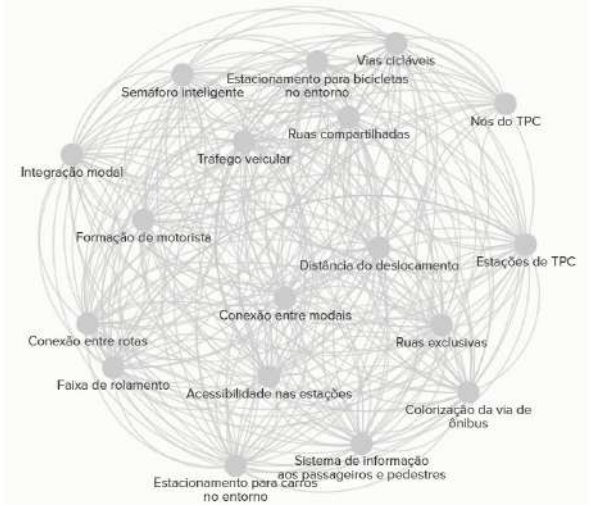


Figura 01: Demonstração da sistematização de elementos gerada pela plataforma Kumu. Elaborado pela autora (2025).

Presume-se que a hipótese seja validada, tendo em vista que o estudo de Lopes (2023), aborda o modo ativo como um sistema. Isto posto, observa-se que a falta de identificação e caracterização do sistema da mobilidade a pé inviabiliza ações para sua priorização, pois as políticas públicas atuam de forma isolada e fragmentada. Como finalização do estudo, busca mostrar que é necessário compreender a mobilidade a pé como um sistema para que a mesma seja priorizada, pois os elementos a serem apresentados são reais, as relações entre eles existem e as políticas públicas estão sendo planejadas e aplicadas. Porém, estão desconectadas e não atuam de forma conjunta para alcançar o objetivo do sistema, tornando o sistema incapaz de ser exercido em sua máxima capacidade e possibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, Maria Natalia Paulino Araujo; GONZAGA, Ana Stefany da Silva, KNEIB, Erika Cristine. Regenerative Mobility: Disruption and Urban Evolution. International Journal on Environmental Science and Sustainable Development.p. 41-55, 2019. DOI: 10.21625/essd.v4i3.676.

BRASIL. Lei 12.587, Presidência da República, 3 jan. 2012, institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Brasília, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.html. Acesso em: 20 jun. 2024.

CALLIARI, Mauro Sérgio Procópio. O pedestre e a cidade: mobilidade e fruição em São Paulo. 2019. Tese (Doutorado em História e Fundamentos da Arquitetura e do Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CAPRA, Fritjof. A visão sistêmica da vida: uma concepção unificada e suas implicações filosóficas, políticas, sociais e econômicas / Fritjof Capra e Pier Luigi Luisi;– São Paulo: Cultrix, 2014.

COLCHESTER, Joss. Systems Change: An Introduction. A Systems Innovation Publication, Creative Commons, 2019.

KUMU ©. Disponível em: https://kumu.io/. Acesso em: 21 jun. 2024.

LOPES, Flávia Cirqueira Rodrigues. Análise sistêmica do modo ativo: a busca pela priorização da acessibilidade ativa nas centralidades urbanas. Dissertação (Mestrado em Projeto e Cidade). Goiânia: FAV-UFG, 2023.

NACIFF, Yordana Dias das Neves; KNEIB, Erika Cristine; AMARAL, Camilo Vladimir de Lima. O pensamento sistêmico em análises urbanas: uma perspectiva para o problema da segregação socioespacial nas cidades. USJT, número 24 | janeiro – abril de 2019.

UITP. Public transport: the smart green solution.International Association of Public Transport –UITP, 2011. Disponível em < https://www.apta.com/previousmc/sustainability/previous/2011/Presentations/Public-Transport-The-Smart-Green-Solution.pdf>, acesso em 04 abr. 2019.

Danielle Sousa Vale (danielle.vale@discente.ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais, Programa de Pós Graduação Projeto e Cidade
(Campus Samambaia, Av. Esperança, s/n - Chácaras de Recreio Samambaia, Faculdade de Artes Visuais, Goiânia - GO, Brasil).

Érika Cristine Kneib (erikakneib@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais, Programa de Pós Graduação Projeto e Cidade

Mobilidade e Acessibilidade

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

A BICICLETA COMO ALTERNATIVA DE MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Lerika do Amaral Poll, Marcos Paulo Santos Nunes, Rennan Fernando Lourenço de Lima, Christiane Lima Barbosa, Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal do Pará;
Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.

RESUMO
O objetivo deste trabalho é analisar os desafios enfrentados na cidade de Belém ao tentar proporcionar o uso da bicicleta como meio de transporte para a população. Mesmo a bicicleta tendo um grande potencial em oferecer melhorias para a mobilidade urbana e reduzir problemas como os congestionamentos e a emissão de gases do efeito estufa. A implementação desse meio de transporte enfrenta obstáculos significativos na capital paraense, questões como a falta de infraestrutura adequada (ciclovias e estacionamentos seguros), altos índices de violência no trânsito e a cultura predominante do uso de veículos motorizados, são dificuldades enfrentadas na adoção da bicicleta como uma opção viável para a população da Região Metropolitana de Belém. O trabalho pontua ainda a necessidade de políticas públicas mais eficazes, de investimentos em infraestrutura e a promoção de campanhas educativas para superar esses desafios e tornar a cidade mais receptiva ao uso da bicicleta como meio de transporte sustentável e ofertar uma melhor mobilidade urbana.

Palavras-chave: Bicicleta; Mobilidade Urbana; Cidade de Belém

1. INTRODUÇÃO

Belém é uma cidade encantadora, com um cenário dinâmico onde a cultura, a história e a natureza se entrelaçam. No entanto, enfrenta desafios significativos em relação à mobilidade urbana, tais como: crescimento populacional acelerado, aumento do tráfego congestionado e elevação dos níveis de poluição (sonora e do ar). Esses fatores têm despertado o interesse da cidade de Belém em buscar alternativas viáveis de transporte mais sustentável e eficiente, visando equilibrar o desenvolvimento urbano com a preservação ambiental e a qualidade de vida dos seus habitantes. Nesse contexto, a integração da bicicleta como meio de transporte primário na região metropolitana de Belém emerge como uma solução promissora, capaz de mitigar os problemas de mobilidade (SILVA & PEREIRA, 2020); (SILVA, 2015).

O uso da bicicleta como modal de transporte reduz significativamente a emissão de gases poluentes, alinhando-se com a preservação dos ecossistemas locais (IPCC, 2022). Segundo dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, a substituição de veículos motorizados por bicicletas em áreas urbanas pode diminuir em até 11% as emissões de CO_2 até 2030 (IPCC, 2022). O congestionamento nas vias de Belém tornou-se um problema crônico, o sistema cicloviário surge como uma solução ágil, permitindo a navegação em meio ao tráfego intenso e o acesso a áreas de difícil alcance para veículos automotores maiores (SHAHEEN *et al.*, 2010). Estudos recentes indicam que cidades com infraestrutura cicloviária bem planejada apresentam redução de até 30% no tempo de deslocamento (MEDEIROS *et al.*, 2021).

A bicicleta é uma opção economicamente viável, com custos de aquisição e manutenção inferiores aos de veículos motorizados (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Além disso, seu uso promove benefícios à saúde, reduzindo riscos de doenças cardiovasculares e melhorando a saúde mental (WHO, 2022). A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda a adoção de políticas públicas que incentivem o uso da bicicleta como forma de combater o sedentarismo (WHO, 2022). Assim, este artigo tem como objetivo, identificar os desafios e os fatores que interferem no uso da bicicleta na cidade de Belém, analisar a infraestrutura existente e sua contribuição para a adoção desse modal e discutir oportunidades e soluções inovadoras para uma mobilidade mais sustentável.

1.1. Mobilidade Urbana de Belém

No contexto nacional, a Lei da Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012) estabelece diretrizes para as cidades brasileiras, visando promover a mobilidade sustentável, a acessibilidade e a integração entre modais de transporte, com priorização de meios não motorizados (BRASIL, 2012). Conforme estudo de Lima e Costa (2022), essa legislação representou um marco na política urbana brasileira ao exigir que municípios com mais

de 20 mil habitantes elaborassem planos de mobilidade que contemplassem a bicicleta como modal estratégico.

Em Belém, a implementação dessa política federal vem ocorrendo de forma gradual. O Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade (PDTU, 2001) já indicava a necessidade de priorizar o transporte ativo, porém, como apontam recentes pesquisas, a implementação efetiva de infraestrutura cicloviária só ganhou impulso na última década (SANTOS *et al.*, 2023, p. 45). Dados atualizados mostram que a cidade possui atualmente cerca de 106,76 km de infraestrutura cicloviária, um aumento de 180% em relação a 2015 (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2023).

O percentual de deslocamentos por bicicleta em Belém, que era de 7,6% em 2001 (PDTU, 2001), apresentou um crescimento significativo. O Instituto de Desenvolvimento da Amazônia (2023) estima que atualmente esse índice chegue a 12,3% dos deslocamentos urbanos. Conforme apontado por Carvalho et al. (2023), embora haja avanços na expansão da malha cicloviária, essa evolução não tem sido acompanhada por critérios adequados de qualidade e integração com outros modais de transporte urbano. Segundo o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP, 2022), 58% dos brasileiros considerariam substituir o carro pela bicicleta se houvesse infraestrutura adequada, o que representa um aumento de 15% em relação a 2020.

2. SISTEMA CICLOVIÁRIO DE BELÉM E SEU USUÁRIO

O sistema cicloviário consiste na infraestrutura destinada à mobilidade por bicicletas, podendo ser implementado por diferentes meios construtivos (TISCHER, 2017). Em Belém, esse sistema representa uma iniciativa fundamental na promoção da mobilidade sustentável, sendo composto por ciclovias, ciclofaixas, ciclorrotas e espaços compartilhados. Essa rede visa oferecer segurança e integração aos ciclistas, conectando áreas estratégicas da cidade e incentivando o uso da bicicleta como modal viável para deslocamentos diários (SEMOB, 2023).

Uma das principais vantagens do sistema cicloviário é sua capacidade de integração intermodal, permitindo que os ciclistas combinem seu uso com o transporte público, como ônibus e futuramente o BRT (Bus Rapid Transit), em implantação na cidade (PLANMOB-BELÉM, 2022). Segundo dados da Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana de Belém (SEMOB, 2023), a malha cicloviária da capital paraense conta atualmente com: 106,76 km de ciclofaixas, uma extensão de 63,01 km de ciclovias e 12,5 km de ciclorrotas das quais estão em fase de implantação. Esses números representam um crescimento de 42% na infraestrutura ciclável entre 2019 e 2023 (IPEA, 2023), conforme tabela 1. No entanto, persistem desafios, como trechos descontínuos e falta de manutenção, que comprometem a fluidez e a segurança (Carvalho *et al*., 2021).

Tabela 1: Evolução da Malha Cicloviária de Belém (2019-2023)

Ano	Ciclovias (km)	Ciclofaixas (km)	Ciclorrotas (km)	Crescimento
2019	**45,2**	**78,5**	**0,0**	**-**
2021	**55,8**	**92,3**	**5,0**	**18%**
2023	**63,1**	**106,76**	**12,5**	**15%**

Fonte: SEMOB (2023) e IPEA (2023).

Belém tem avançado na integração do sistema cicloviário com outros modais de transporte. O Plano de Mobilidade Urbana (PLANMOB-BELÉM, 2023-2030) prevê a conexão de ciclovias com terminais de ônibus e futuras estações do BRT, facilitando a intermodalidade. Um estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2023) revela que cidades com boa integração cicloviária-transporte público registram aumento de até 30% no uso da bicicleta. Além disso, a Pesquisa Origem-Destino (2022), realizada pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em parceria com a Prefeitura Municipal de Belém, aponta que 23% dos usuários de ônibus utilizariam a bicicleta como meio complementar se houvesse infraestrutura adequada. 15% dos motoristas de automóveis consideraram migrar para a bicicleta caso houvesse rotas seguras e estacionamentos em terminais. Apesar dos avanços, o sistema cicloviário de Belém enfrenta os obstáculos de descontinuidade das rotas e as ciclofaixas não são interligadas (SEMOB, 2023); a falta de manutenção onde 40% dos usuários reclamam de buracos e falta de sinalização (UFPA, 2022) e questões relacionados à segurança (IPEA, 2023).

Com base na pesquisa nacional sobre mobilidade por bicicletas – o perfil ciclista brasileiro realizada pelo

Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento, da qual traçou o perfil do ciclista que faz uso do sistema cicloviário de Belém, sendo ele 41,7% entre as idades de 20 a 39 anos; com uma renda de 1 a 2 salários mínimos; onde 94,8% são pessoas que utilizam a bicicleta por 5 dias ou mais, sendo 31,7% usuários que utilizam o sistema de transporte há menos de 5 anos. Entre os principais destinos a pesquisa aponta que 88,9% é para ida/volta do trabalho além de pontuar a pandemia do covid-19 alterou a rotina desses ciclistas em 57,3% e entre os desafios enfrentados durante o uso do sistema cicloviário destacam se a falta de infraestrutura adequada (62%); a insegurança ao trafegar pelo sistema cicloviários da cidade (57%) e a ocorrência de roubo/furto (23%) como é pontuado no Diagnóstico da Mobilidade Urbana de Belém (2023).

3. DESAFIOS E OPORTUNIDADES

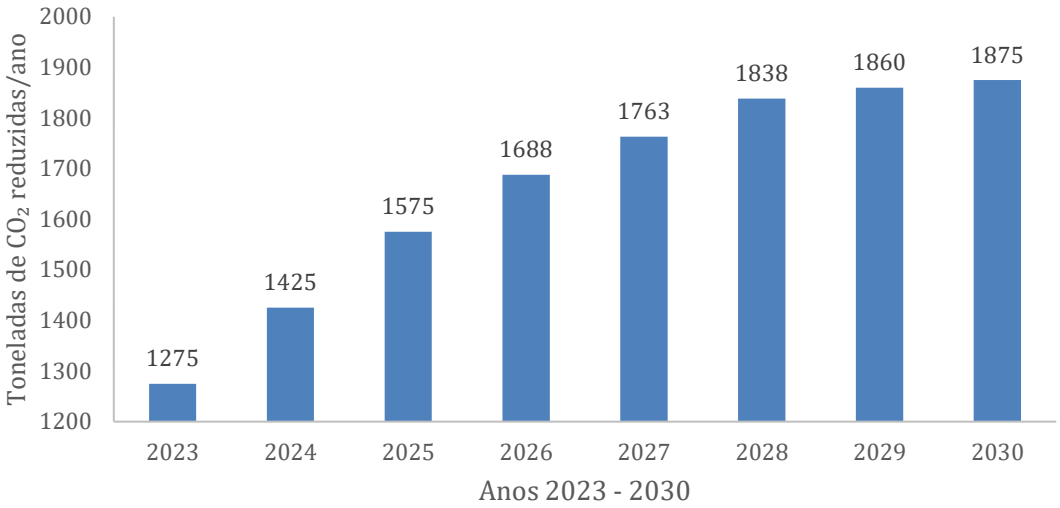
Belém enfrenta desafios estruturais e culturais significativos ao tentar implementar o sistema cicloviário como parte essencial de seu sistema de transporte urbano. Entre esses desafios, a falta de uma rede cicloviária abrangente e segura é um dos principais obstáculos. A cidade carece de uma malha cicloviária integrada, com trechos descontínuos, ciclovias estreitas e, em alguns casos, em condições precárias, o que dificulta a circulação segura dos ciclistas. A ausência de conectividade entre bairros e regiões limita a utilidade prática da bicicleta como meio de transporte para deslocamentos mais longos e rotineiros.

O Estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2023) revela que Belém possui apenas 0,43m de infraestrutura cicloviária por habitante, considerado um índice abaixo da média nacional (0,68m/hab) e sendo menor ainda quando comparado ao recomendado pela Organização Mundial da Saúde (1,5m/hab). A malha existente da cidade paraense apresenta um percentual de 47% de desconectividade entre trechos construídos (SEMOB, 2023); 62% dessas ciclovias possuem medidas irregulares ao recomendado pela legislação (ABRACICLO, 2022) e 35% não possuem drenagem adequada para o período chuvoso amazônico (UFPA/NET, 2023), isso sem pontuar a falta de integração entre diferentes modais, Dados do Plano de Mobilidade Urbana (PLANMOB, 2022) mostram que apenas 3 terminais de ônibus em Belém possuem bicicletários.

Outro desafio significativo é a falta de cultura e conscientização sobre o uso da bicicleta como uma opção viável de transporte. Belém historicamente se desenvolveu em torno do uso predominante de veículos motorizados, e a infraestrutura urbana reflete essa priorização. A falta de educação e respeito dos motoristas em relação aos ciclistas, juntamente com a ausência de uma política de segurança e priorização do transporte não motorizado, tornam as ruas menos acolhedoras para quem opta pelo uso do sistema cicloviário como meio de locomoção. A pesquisa "Percepção da Mobilidade em Belém" (ITDP, 2022) identificou que 73% dos motoristas não respeitam a distância mínima de 1,5m para ultrapassar ciclistas; 58% dos ciclistas já sofreram algum tipo de violência no trânsito e apenas 12% da população considera a bicicleta como opção viável para deslocamentos acima de 5 km. Além disso, a topografia e as condições climáticas da cidade também representam desafios adicionais. A geografia peculiar de Belém, com suas áreas alagadas e períodos de chuvas frequentes, pode dificultar o uso da bicicleta em certos períodos do ano. A infraestrutura inadequada para enfrentar essas condições climáticas adversas afeta a segurança e o conforto dos ciclistas, desencorajando muitos a adotarem a bicicleta como uma opção regular de transporte (KIRNER, 2006); (PIRES et al 1997), conforme dados da Prefeitura Municipal de Belém / SEMOB (Secretaria Municipal de Mobilidade) com o Relatório Anual de Infraestrutura Cicloviária ou Diagnóstico da Mobilidade Urbana (2022-2023) destaca que boa parte das rotas cicláveis de Belém ficam alagadas durante o período do inverno amazônico.

Para superar esses desafios, a capital paraense, por meio do seu Plano Diretor de Mobilidade Urbana (2023-2030) estabeleceu metas como: ampliar a malha cicloviária para 250 km até o ano de 2030. Considerando a meta de expandir a malha cicloviária de 170 km, em 2023, para 250 km até 2030 — o que representa uma taxa média de expansão de 11,43 km por ano — e com base nas projeções do IPCC para cidades amazônicas (2022), estima-se que cada quilômetro adicional de ciclovia possa reduzir em 0,15 tonelada de CO_2 por ano. Levando-se em conta ainda o crescimento populacional anual de 1,2% para Belém (IBGE, 2022) e a substituição progressiva de veículos motorizados leves por bicicletas, iniciando com 15% ao ano e aumentando 2,86% anualmente, projeta-se que, em 2030, essa substituição alcance 35% ao ano. Para os cálculos de redução de emissões, adota-se um fator de emissão de 0,3 kg de CO_2 por quilômetro rodado por veículos leves. Assim, criou-se um gráfico com a projeção de redução de emissões de CO_2 que Belém pode alcançar durante esse período. Conforme demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1: Projeção de Redução de Emissões de CO_2 em Belém com a Expansão Cicloviária (2023-2030)



Fonte: Autores (2025).

Além dessa expansão na estrutura cicloviária, o Plano Diretor de Mobilidade Urbana (2023-2030) planeja ainda implementar bicicletários nos terminais de ônibus e criar um sistema de compartilhamento de bicicletas, se implementadas as metas do PLANMOB (2023-2030), Belém pode se tornar referência em mobilidade sustentável na Amazônia, reduzindo congestionamentos, melhorando a qualidade do ar e incentivando hábitos mais saudáveis. Isso porque a cidade apresenta potencial para transformar sua mobilidade urbana e contribuir na redução de impactos ambientais por meio da expansão e qualificação do sistema cicloviário e agregar benefícios significativos para a cidade e para a qualidade de vida de sua população.

Entre as oportunidades tem-se a contribuição da redução de emissões de gases de efeito estufa e melhoria da qualidade do ar, já que a substituição de veículos motorizados por bicicletas em deslocamentos urbanos pode reduzir consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), cidades que investiram em ciclovias obtiveram uma diminuição média de 10 a 15% nas emissões de CO_2 em um período de cinco anos. Em Belém, onde o transporte motorizado é responsável por cerca de 38% das emissões locais (SEMAS, 2022), a ampliação do uso da bicicleta poderá evitar a liberação de até 2 toneladas de CO_2 por dia até 2030, caso a expansão da malha cicloviária atinja os 250 km planejados (PLANMOB-Belém, 2023 - 2030).

Além disso, a redução da poluição do ar trará benefícios diretos à saúde pública. A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022) estima que a melhoria na qualidade do ar pode diminuir em até 12% os casos de doenças respiratórias em áreas urbanas. Outro ponto de oportunidade para Belém é obter um alívio do trânsito e ganhar mais eficiência nos deslocamentos. Atualmente, Belém enfrenta graves problemas de congestionamento, especialmente em vias como a Almirante Barroso, Augusto Montenegro e a BR-316 que são as vias com maior fluxo de carros. O levantamento do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2023) apontou que cidades com redes cicloviárias bem estruturadas podem reduzir em até 20% o tempo médio de deslocamento em horários de pico. A Universidade Federal do Pará (UFPA, 2023) em uma pesquisa de estudos sobre deslocamentos curtos em Belém apontou que 23% dos deslocamentos diários em Belém são inferiores a 5 km, distância essa ideal para serem percorridas de bicicleta.

A adoção da bicicleta como meio de transporte está associada a menores índices de sedentarismo e doenças crônicas. Conforme a Organização Mundial de Saúde (2022), pessoas que praticam ciclismo têm até 30% menores chances de desenvolver doenças cardiovasculares, A Pesquisa Nacional de Saúde, (2021) apontou que Belém tem cerca de 45% da população sendo considerada sedentária, o incentivo ao ciclismo pode ser um incentivo para melhorar indicadores de saúde pública e reduzir gastos público.

Outro ponto que pode ser visto como oportunidade é o turismo e a economia local, pois a utilização da bicicleta

também pode impulsionar o turismo sustentável. Cidades como Recife e Fortaleza, das quais implementaram sistemas de bicicletas compartilhadas, obtiveram aumento de 18% no turismo de baixo impacto conforme dados da MTur (2023). Belém possui um significativo potencial histórico, cultural e natural que pode ser explorado por meio do desenvolvimento de rotas cicloturísticas pela cidade. Entre os principais atrativos estão o Complexo Feliz Lusitânia e o centro histórico da cidade, áreas ricas em patrimônio cultural e gastronômico, além de espaços naturais como o Parque do Utinga, Praça da República e Bosque Rodrigues Alves. A integração entre esses locais, conectando pontos históricos a áreas verdes seguras para o tráfego de bicicletas, fortalece o turismo sustentável e estimula a demanda por uma malha cicloviária mais estruturada e eficiente.

O sistema cicloviário de Belém representa uma oportunidade estratégica para melhorar a mobilidade, reduzir impactos ambientais e promover um crescimento urbano mais saudável. Para isso, é essencial adotar medidas de expansão da malha cicloviária de forma integrada, promover campanhas de conscientização a favor dos ciclistas, investir cada vez mais em infraestruturas resiliente ao clima amazônico e criar políticas públicas bem direcionadas a esse sistema cicloviário, de forma a tornar Belém uma referência em mobilidade sustentável na Amazônia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACICLO (2022). Padrões de Infraestrutura Cicloviária. São Paulo
ANPET (2021-2023). Anais do Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes.
BRASIL (2012). Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, Brasília.
CARVALHO, R.; DIAS, L.; PINHEIRO, M (2021). Mobilidade urbana e sustentabilidade em cidades amazônicas. Belém: Editora UFPA.
CARVALHO, R. et al (2023). Infraestrutura cicloviária em cidades amazônicas: desafios e oportunidades. *Revista de Transportes Sustentáveis*, v. 15, n. 2, p. 110-125.
IBGE (2022). PNAD Contínua - Suplemento de Mobilidade Urbana: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IDA (2023). Instituto de Desenvolvimento da Amazônia. Pesquisa de Mobilidade Urbana em Belém. Belém.
IPCC (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (AR6 WGIII). Seção 10.4 (Transporte Urbano) discute o potencial de redução de emissões com bicicletas
IPEA (2023). Relatório anual de Mobilidade Urbana. Brasília
IPEA (2023). Relatório Mobilidade Ativa nas Capitais Brasileiras.
ITDP (2022). Pesquisa Nacional de Percepção sobre Mobilidade Urbana. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento.
ITDP (2022). Cidades Cicláveis: Impactos Econômicos e Sociais. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento.
ITDP (2021). Pesquisa nacional sobre mobilidade por bicicletas: Perfil ciclista brasileiro. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento.
LIMA, A.; COSTA, B. A (2022). implementação da Lei de Mobilidade Urbana no Brasil. São Paulo: Editora Sustentável.
MEDEIROS, L. F. et al (2021). Infraestrutura Cicloviária e Redução de Congestionamentos. *Revista de Transportes Sustentáveis*, v. 12, p. 45-60
NAEA/UFPA (2023). Mobilidade e Clima na Amazônia. Belém. Universidade Federal do Pará
OLIVEIRA, R. M. et al (2023). Custos Comparativos entre Bicicletas e Veículos Automotores. *Journal of Urban Mobility*, v. 8, p. 22-35.
OMS (2022). Global Status Report on Physical Activity.
PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM (2021). Plano de Mobilidade por Bicicleta. Belém
PLANMOB-BELÉM (2023). Plano de Mobilidade Urbana Sustentável 2023-2030. Prefeitura de Belém.
RIBEIRO, M (2023). Potencial de conversão modal em cidades médias brasileiras. Belém. UFPA.
SANTOS, P. et al (2023). Políticas públicas para mobilidade ciclável na Amazônia. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 14, n. 1, p. 40-58.
SEMAS (2022). Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Belém. Belém.
SEMOB (2023). Relatório da Malha Cicloviária de Belém. Secretaria Municipal de Mobilidade. Belém
SHAHEEN, S. et al (2010). Bikesharing and Urban Mobility. *Transportation Research*, v. 15, n. 4, p. 205-220.
SILVA, A. B (2015). Mobilidade Urbana em Belém: Desafios e Perspectivas. Editora Amazônia.
SILVA, C. D.; PEREIRA, M. F (2020). Cidades Sustentáveis: O Papel da Bicicleta. São Paulo: Ed. Sustentável.
UFPA (2023). Estudo sobre Deslocamentos Curtos em Belém. Universidade Federal do Pará.
UFPA (2022). Pesquisa Origem-Destino. Núcleo de Estudos em Transportes - NET. Universidade Federal do Pará.
WHO (2022). Global Status Report on Physical Activity 2022. World Health Organization.
WRI BRASIL (2021). Brasileiro abandonaria carro por transporte sustentável, mas deseja conforto e praticidade.

WRI BRASIL (2023). Estudos sobre Mobilidade Urbana.

ACEITABILIDADE E FATORES ASSOCIADOS AO USO DE PATINETES ELÉTRICOS COMPARTILHADOS NO DISTRITO FEDERAL

Jonie Daniel Meireles Doberstein de Magalhães, Otavio Henrique da Silva
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO
Este estudo avaliou a aceitabilidade dos patinetes elétricos compartilhados no Distrito Federal. Para isso, elaborou-se uma escala de atitude, composta por 12 itens do tipo Likert, resultando em um índice global de aceitabilidade, variando de 12 a 60 pontos. Após a aplicação de 88 questionários online, foi empregado o Método dos Intervalos Sucessivos, que indicou o fator "Curta distância" como o mais relevante para os respondentes. A consistência interna do instrumento foi satisfatória (α de Cronbach = 0,69), e o índice global médio (38,1 pontos) indicou uma aceitação relativamente favorável. O algoritmo *K-means* segmentou os participantes em três grupos: Favorável (13,6%), Indiferente (59,1%) e Não favorável (27,3%). Análises estatísticas revelaram diferença significativa (p<0,05) na atitude apenas segundo a renda familiar. Esses resultados oferecem subsídios relevantes para a promoção dos patinetes elétricos compartilhados, destacando a importância de considerar as percepções dos usuários em aspectos específicos para ampliar sua aceitação.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A micromobilidade tem se consolidado como alternativa eficiente e sustentável para trajetos de curta distância em ambientes urbanos (Shaheen *et al*., 2016). Esse conceito engloba meios de transporte como bicicletas, e-bikes e patinetes elétricos, que oferecem flexibilidade e conveniência ao usuário, além de complementarem o transporte público na primeira/última milha (Manning e Babb, 2023). Além disso, iniciativas de micromobilidade são reconhecidas por mitigar congestionamentos e reduzir tempos de deslocamento, desde que apoiadas por regulamentação adequada, medidas de segurança eficazes e infraestrutura apropriada (Medina-Molina *et al*., 2023).

Neste contexto, estudos recentes mostram que a adoção de patinetes elétricos compartilhados pode aumentar em até 46% a chance de substituição de modos como carro ou transporte público em viagens de até 4 km (Kazemzadeh e Sprei, 2024). Estudos realizados em cidades norte-americanas indicam que esse modo de transporte pode substituir viagens feitas por veículos motorizados individuais, evidenciando seu potencial para mitigar o tráfego urbano (Wang *et al.*, 2022). No entanto, a ausência de infraestrutura cicloviária adequada e a percepção de insegurança viária permanecem como barreiras significativas à adoção dos patinetes elétricos em larga escala (Shahin e Elias, 2025).

No Distrito Federal, o serviço de patinetes elétricos compartilhados, anteriormente interrompido em janeiro de 2020, foi retomado em janeiro de 2025 por meio de uma parceria entre uma operadora privada e a Secretaria de Transporte e Mobilidade do DF (Semob-DF). Cerca de 2 mil unidades foram disponibilizadas em quatro Regiões Administrativas do DF (Plano Piloto, Águas Claras, Sudoeste/Octogonal e Cruzeiro). Até abril de 2025, o sistema contabilizou cerca de 477 mil viagens e 230 mil cadastros de usuários. Em maio de 2025, foi aberto chamamento público para credenciamento de novas operadoras, com vistas à expansão do serviço a outras Regiões Administrativas e pontos de maior demanda, como estações de metrô e terminais rodoviários (Semob-DF, 2025). Frente a esse elevado engajamento e aos desafios regulatórios, o presente estudo visa avaliar a aceitabilidade dos patinetes elétricos compartilhados entre os moradores do DF, identificando perfis atitudinais e fatores associados à sua adoção.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar a aceitabilidade da população do Distrito Federal em relação ao uso de patinetes elétricos compartilhados, desenvolveu-se um questionário estruturado, aplicado em meio digital, com base na escala Likert. Essa escala permite mensurar atitudes por meio de afirmações com as quais os respondentes expressam níveis de concordância. Inicialmente, com base no estudo de Providelo e Sanches (2010), foram construídos e adaptados 12 fatores próprios para a avaliação da aceitabilidade de patinetes elétricos compartilhados. Para cada fator, foi construída uma afirmativa. Assim, por meio de uma escala de resposta de cinco pontos, os respondentes indicaram seu nível de concordância em relação às afirmações. O somatório das pontuações dos 12 itens representa a atitude do respondente em relação ao patinete. Para evitar viés de direção, foram incluídas afirmativas com conteúdo negativo, as quais foram recodificadas, invertendo-se seus escores antes do cálculo do índice final. Além disso, o questionário coletou variáveis sociodemográficas (gênero e renda familiar) para

análises complementares.

Após conduzida a coleta de dados, aplicou-se o Método dos Intervalos Sucessivos (MIS) para identificar e ordenar a importância dos fatores conforme o nível de concordância, convertendo respostas ordinais em escores intervalares (0–1). Quanto maior o valor, maior a concordância e consequente relevância do fator. Em seguida, avaliou-se a consistência interna da escala de fatores por meio do coeficiente α de Cronbach, calculado após a inversão dos itens com conteúdo negativo. Esse coeficiente varia de 0 a 1 e expressa o grau de correlação entre cada item e o total da escala. Segundo Hair *et al.* (2009), valores entre 0,60 e 0,70 são aceitáveis em estudos exploratórios, enquanto valores superiores a 0,70 indicam boa confiabilidade. Coeficientes acima de 0,90 podem sugerir redundância entre os itens.

Depois, atribuiu-se, a cada respondente, um índice global de aceitabilidade, representado pela soma dos escores atribuídos aos itens da escala. Essa variável foi então submetida a uma segmentação atitudinal (clusterização) via algoritmo de agrupamento *K-means*, com o objetivo de identificar grupos de usuários com níveis distintos de aceitação. Assumindo que os dados da escala de atitude seguem uma distribuição normal, foi realizado um teste ANOVA de uma via, seguido do teste post-hoc de comparações múltiplas de Tukey, para confirmar se os agrupamentos em questão apresentam, de fato, médias de escores significativamente diferentes (p<0,05).

Finalmente, compararam-se as médias do índice de aceitabilidade entre os grupos por gênero e renda familiar, para verificar diferenças significativas (p<0,05) nas atitudes desses perfis sociodemográficos. O gênero foi analisado com base em duas categorias: masculino e feminino, utilizando o teste t de Student. Já a renda mensal foi dividida em cinco categorias, baseadas em faixas de valores equivalentes a número de Salários Mínimos (SM), conforme IBGE (2013): até R$ 3.000 (Classe E), R$ 3.001 a R$ 6.000 (Classe D), R$ 6.001 a R$ 15.000 (Classe C), R$ 15.001 a R$ 30.000 (Classe B) e acima de R$ 30.000 (Classe A). Para essa variável, aplicou-se o teste ANOVA de um fator, seguida do teste post-hoc de Tukey, empregado para verificar em quais pares residem as diferenças significativas (p<0,05) eventualmente apontadas pela ANOVA.

3. COLETA DE DADOS

O questionário foi aplicado entre 4 e 25 de junho de 2025, junto a residentes do Distrito Federal. Ao todo, foram coletadas 88 respostas válidas. A Tabela 1 apresenta a distribuição percentual das respostas aos doze itens em escala Likert de cinco pontos, que varia de “Discordo Totalmente” a “Concordo Totalmente”, correspondentes às afirmativas relacionadas a cada fator investigado.

Tabela 1: Resultados do questionário de atitude

Fatores	Afirmação	Frequência Relativa das Respostas Obtidas (%)				
		DT	DP	I	CP	CT
Curta distância	Os patinetes elétricos são uma boa alternativa para trajetos curtos no dia a dia.	3,4	0,0	3,4	31,8	61,4
Conforto	O patinete elétrico é um meio de transporte confortável para se locomover.	4,5	9,1	30,7	35,2	20,5
Eficiência percebida	O patinete elétrico é um meio de transporte lento.	19,3	29,5	23,9	20,5	6,8
Aprovação social	A maioria das pessoas que eu conheço, aprova ou aprovaria meu uso do patinete elétrico para trabalho/estudo.	14,8	18,2	29,5	20,5	17,0
Percepção de segurança pessoal	Fico preocupado em sofrer acidentes ao usar patinetes.	8,0	8,0	10,2	22,7	51,1
Percepção de segurança pública	Quem anda de patinete corre risco de ser assaltado ou agredido.	6,8	8,0	10,2	31,8	43,2
Disponibilidade	É fácil encontrar patinetes disponíveis nos locais onde circulo.	17,0	15,9	33,0	25,0	9,1
Facilidade de operação	Acho fácil conduzir o patinete elétrico.	5,7	13,6	11,4	35,2	34,1
Percepção de preço	O preço cobrado para usar patinetes é caro.	5,7	5,7	35,2	26,1	27,3
Infraestrutura	Os locais que frequento oferecem infraestrutura adequada para trânsito seguro de patinetes.	22,7	34,1	21,6	13,6	8,0
Condições meteorológicas	Sol, chuva, frio e calor prejudicam o uso de patinetes.	2,3	4,5	11,4	27,3	54,5
Sustentabilidade	O uso de patinetes elétricos pode ajudar a reduzir congestionamentos e poluição na cidade.	1,1	5,7	11,4	30,7	51,1

Nota: DT = Discordo Totalmente; DP = Discordo Parcialmente; I = Indiferente; CP = Concordo Parcialmente; CT = Concordo Totalmente.

4. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

4.1 Importância relativa dos fatores com base no nível de concordância

As respostas da escala Likert são, por natureza, ordinais, o que limita a comparabilidade direta das distâncias entre níveis de concordância (Providelo e Sanches, 2010). Para contornar essa restrição e atribuir pesos quantitativos homogêneos aos doze fatores componentes da pesquisa de atitude sobre patinetes elétricos compartilhados, realizou-se inicialmente recodificação dos itens de cunho negativo, invertendo-se os escores.

Desse modo, a pontuação para "Concordo Totalmente" foi alterada de 5 pontos para 1 e o escore para "Discordo Totalmente" foi alterado de 1 para 5 pontos, por exemplo. Em seguida, aplicou-se o Método dos Intervalos Sucessivos (MIS) a cada afirmativa, convertendo as categorias ordinais em escores intervalares normalizados entre 0 e 1. Dessa forma, preserva-se o ordenamento original de cada resposta, mas com intervalos proporcionais. A Figura 1 apresenta a importância relativa dos fatores associados à aceitabilidade dos patinetes elétricos compartilhados, com base no nível médio de concordância dos respondentes, normalizado entre 0 e 1.

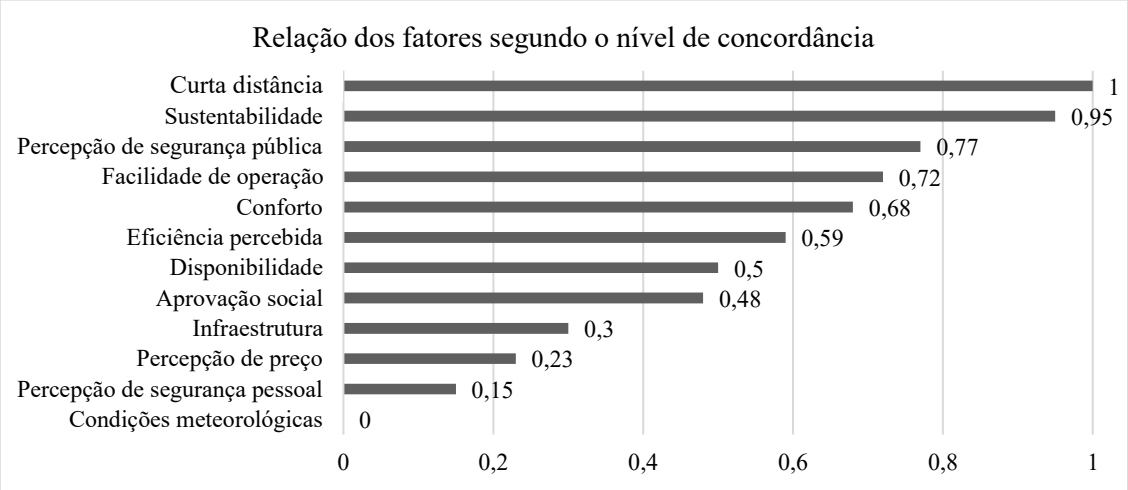


Figura 1: Importâncias relativas dos fatores, segundo o nível de concordância

Observa-se que Curta distância foi o fator com maior relevância (1,00), seguido por Sustentabilidade (0,95) e Percepção de segurança pública (0,77). Esses resultados indicam que aspectos funcionais, ambientais e de segurança coletiva são os principais motivadores para a aceitação do serviço. Por outro lado, fatores como Percepção de segurança pessoal (0,15) e, especialmente, Condições meteorológicas, que apresentou valor normalizado igual a zero, mostraram-se pouco influentes na decisão dos usuários, sugerindo que aspectos climáticos têm impacto reduzido na adesão ao serviço.

4.2. Consistência interna da escala de atitude

Após a análise do nível de concordância, foi calculado o coeficiente α de Cronbach, que resultou em $\alpha = 0{,}69$. Embora ligeiramente abaixo do limiar convencional de 0,70, o valor é considerado aceitável em estudos exploratórios voltados à construção de escalas (Hair *et al.*, 2009). Esse resultado sugere que os doze itens exibem coerência interna satisfatória, sem redundância excessiva, e mantêm-se adequados para mensurar o constructo de aceitabilidade dos patinetes elétricos compartilhados. Em razão dessa consistência, preservaram-se os fatores originalmente selecionados para a composição da escala proposta.

4.3 Escala de aceitabilidade ao uso dos patinetes elétricos compartilhados

Após a definição dos itens da escala, foi calculada a somatória das pontuações atribuídas por cada respondente na escala Likert, resultando em um índice global de aceitabilidade. Como a escala final manteve 12 itens, a pontuação total variou teoricamente entre 12 (discordância máxima) e 60 (concordância máxima). Na amostra de 88 participantes, os escores observados oscilaram entre 25 e 54, com média de 38,11. Esse valor, ligeiramente acima do ponto médio da escala (36), indica uma tendência geral de aceitação moderada do serviço entre os residentes do Distrito Federal.

O histograma do índice global de aceitabilidade (Figura 2) revela uma distribuição aproximadamente normal, com frequência máxima concentrada em torno do ponto médio da escala. Esse padrão evidencia que a maioria dos respondentes adota postura indiferente em relação ao uso de patinetes elétricos compartilhados, ao passo que parcelas menores se situam nos extremos, indicando perfis mais favoráveis ou resistentes a este modo de transporte.

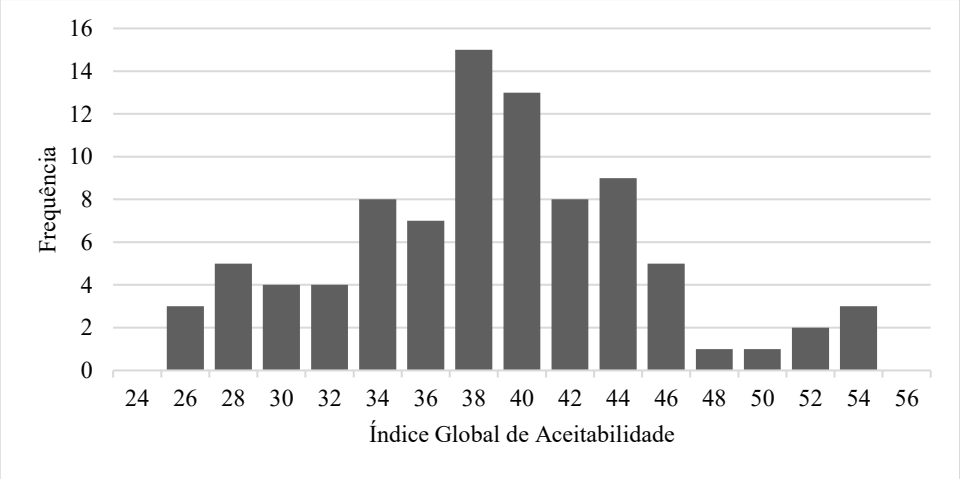


Figura 2: Distribuição da frequência do índice de aceitabilidade de patinetes elétricos compartilhados

Em seguida, a aplicação do algoritmo *K-means* ao índice global de aceitabilidade indicou, com nível de significância de 5%, que os respondentes podem ser segmentados em três grupos distintos ($k = 3$) quanto à receptividade aos patinetes elétricos compartilhados. Como resultado, o grupo Favorável, com 13,6% dos respondentes, reúne os usuários com maior predisposição positiva ao uso de patinetes elétricos. O grupo Indiferente, representando 59,1% da amostra, agrupa aqueles cujo índice global se situa próximo ao ponto neutro, sinalizando potencial de conversão mediante ações direcionadas. Por fim, o grupo Não favorável, correspondendo a 27,3% dos participantes, possui resistência aos patinetes, especialmente nos aspectos de segurança e custo, que demandam intervenções estruturais. Essa segmentação confirma a existência de três perfis claramente distintos de aceitabilidade.

A Tabela 2 sintetiza o resultado dessa segmentação, apresentando o número de casos, o percentual de casos para cada grupo e a média do critério, em cada grupo (Favorável, Indiferente e Não favorável).

Tabela 2: Resultado da segmentação em cada grupo

Grupo	Número de Casos	Percentual de Casos	Média da Pontuação
Favorável	12	13,6%	49,1
Indiferente	52	59,1%	39,3
Não favorável	24	27,3%	30,1

Em seguida, para verificar se as médias do índice global de aceitabilidade diferem significativamente entre os três grupos definidos pelo *K-means*, aplicou-se a ANOVA de um fator. O teste indicou que a variância entre os grupos é significativamente maior que a variância residual (p<0,05), apontando diferenças estatisticamente relevantes nas médias de aceitabilidade. Por fim, aplicou-se o teste post-hoc de Tukey HSD para identificar quais pares de grupos diferem de modo significativo. Todas as comparações pareadas mostraram diferenças médias significativas, superando o limiar mínimo estabelecido (p<0,05), o que corrobora que os três grupos de aceitabilidade são estatisticamente distintos e valida a segmentação atitudinal.

Então, examinou-se se há diferença significativa (p<0,05) na atitude em relação ao uso dos patinetes, por gênero e renda familiar. O teste t de Student mostrou que os grupos feminino e masculino (índices globais médios de 37,1 e 39,9, respectivamente) não apresentam diferença estatisticamente significativa de aceitabilidade. Em seguida, realizou-se o teste ANOVA entre as cinco faixas de renda (A a E), que indicou diferença significativa entre os grupos. O teste de Tukey HSD identificou que há diferença significativa

(p<0,05) apenas entre as classes B (renda de R$ 15.000,00 a R$ 30.000,00) e E (renda de até 3.000,00), que perfizeram médias iguais a 35,7 e 42,5 pontos, nessa ordem, na escala. Isso indica que o grupo de menor renda apresenta aceitabilidade significativamente superior ao de maior renda.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste estudo, foi possível analisar e quantificar a aceitabilidade dos patinetes elétricos compartilhados na população do Distrito Federal. Em termos de aplicação prática, os resultados sinalizam que o índice global médio de 38,1 (em uma escala de 12 a 60) situa-se acima do ponto neutro (36), indicando uma disposição geral razoavelmente positiva ao uso de patinetes elétricos compartilhados no Distrito Federal. A aplicação do Método dos Intervalos Sucessivos (MIS) confirmou que Curta distância é o fator com maior nível médio de concordância, ao passo que condições meteorológicas apresentou o menor nível.

Este estudo delimitou três grupos de aceitabilidade: o Favorável (13,6 %), que pode atuar como catalisador em campanhas de incentivo ao uso do patinete compartilhado; o Indiferente (59,1 %), público estratégico, que pode ser atraído conforme ajustes pontuais nos custos do serviço, segurança e comunicação; e o Não favorável (27,3 %), cujas principais barreiras demandam reforço na infraestrutura e revisão dos preços praticados. Em complemento, o teste t de gênero mostrou que as atitudes dos públicos feminino e masculino não apresentam diferença significativa (p<0,05) na aceitabilidade. Já a análise por meio da ANOVA de uma via por faixa de renda, seguida do post hoc de Tukey, identificou diferença significativa (p<0,05) apenas entre as classes B e E, indicando que nuances de poder aquisitivo podem orientar estratégias de precificação diferenciada.

Em síntese, embora o grupo Indiferente seja majoritário, os resultados indicam um potencial significativo para a ampliação do uso de patinetes elétricos compartilhados no Distrito Federal. A consolidação desse modo de transporte exige não apenas o enfrentamento de desafios como custos, segurança e infraestrutura, mas também a adoção de estratégias de planejamento participativo que estimulem a população a se engajar e utilizar esse serviço de forma mais ampla. Nesse contexto, promover a inclusão social na formulação e gestão de políticas de micromobilidade é essencial para ampliar o acesso ao serviço, reduzir desigualdades no uso do espaço urbano e garantir que sua expansão ocorra de forma equitativa e integrada ao território.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Providelo, J. K. e S. P. Sanches (2010) Percepções de indivíduos acerca do uso da bicicleta como modo de transporte. *Transportes*, v. 18, n. 2, p. 53-61. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v18i2.424

Hair, J. F.; W. C. Black; B. J. Babin e R. E. Anderson (2009) *Multivariate Data Analysis* (7ª. ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

IBGE (2013) Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE.

Semob-DF (2025) Chamamento público amplia serviço de patinetes elétricos no DF. Disponível em: https://segov.df.gov.br/w/chamamento-publico-amplia-servico-de-patinetes-eletricos-no-df (acesso em 02/07/2025)

Medina-Molina, C.; N. Pérez-Macías e J. L. Fernández-Fernández (2023) The use of micromobility in different contexts: an explanation through the multilevel perspective and QCA. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 188, 122295. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.122295

Manning, R. e C. Babb (2023) Micromobility for first and last mile access to public transport: institutional perspectives from Perth, WA. *Australian Planner*, v. 59, n. 2, p. 89–100. DOI: 10.1080/07293682.2023.2211690

Kazemzadeh, K. e F. Sprei (2024) The effect of shared e-scooter programs on modal shift: Evidence from Sweden. *Sustainable Cities and Society*, v. 101, 105097. DOI: 10.1016/j.scs.2023.105097

Wang, K.; X. Qian; D. T. Fitch; Y. Lee; J. Malik e G. Circella (2022) What travel modes do shared e-scooters displace? A review of recent research findings. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 160, p. 1–22. DOI: 10.1016/j.tra.2022.04.001

Shahin, F. e W. Elias (2025) Risk Perception and Barriers to Electric Scooter Prevalence. *Applied Sciences*, v. 15, n. 3, 1117. DOI: 10.3390/app15031117.

Shaheen, S.; A. Cohen e I. Zohdy (2016) Shared Mobility: Current Practices and Guiding Principles. U.S. Department of Transportation.

Jonie Daniel Meireles Doberstein de Magalhães (joniedaniel@hotmail.com)
Otavio Henrique da Silva (otavio.silva@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes Anexo SG-12, 1° andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil

ACESSIBILIDADE PEDESTRE EM REDES URBANAS: ANÁLISE DA COMPLEXIDADE BASEADA EM DIFUSÃO ANÔMALA E CAMINHADAS ALEATÓRIAS

Rodrigo de Sousa Pissardini[1], **Rafael Henrique de Oliveira**[2], **Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho**[1]
[1]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [2]Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
A análise da mobilidade a pé e de sua infraestrutura associada é fundamental para o desenvolvimento de soluções modernas de sustentabilidade urbana. Este estudo propõe uma metodologia para avaliar as restrições ao deslocamento a pé, utilizando o conceito de difusão anômala, para obter um indicador quantitativo de complexidade que mensura as limitações espaço-temporais associadas a este modo de transporte para uma determinada região de análise. O modelo proposto foi aplicado para uma área da cidade de São Paulo (Brasil) simulando-se diferentes dinâmicas de acesso e verificando-se o impacto das limitações presentes, identificando-se possíveis intervenções para melhoria da infraestrutura.

1. INTRODUÇÃO

O deslocamento a pé é uma forma essencial de circulação nas cidades, tanto como modo principal quanto como etapa de integração com outros modos de transportes. É um modo de transporte relevante para compreender como a população acessa áreas de interesse no entorno de seus espaços cotidianos e sua priorização é uma estratégia para mitigar efeitos do transporte motorizado como emissão de poluentes, o consumo excessivo de combustíveis fósseis e os congestionamentos, além de favorecer a saúde física e mental de seus praticantes (Wigan, 1995). No entanto, em contextos urbanos caracterizados pela priorização de transporte motorizado, o deslocamento a pé e por outros modos ativos pode encontrar limitações significativas como infraestrutura fragmentada, barreiras urbanas e outros tipos de restrições (Bozovic *et al.*, 2021). Avaliar a complexidade do deslocamento a pé no contexto da mobilidade urbana ativa permite identificar as facilidades e barreiras presentes, oferecendo subsídios para formulação de políticas públicas, alocação de recursos e desenvolvimento de ações que promovam maior equidade no acesso e melhoria da qualidade de vida.

Esta pesquisa propõe um modelo de análise de trajetórias de pedestres baseado no conceito de difusão anômala, também conhecido como movimento browniano anômalo. Diferentemente do movimento browniano clássico – descrito pelo Processo de Wiener como o deslocamento aleatório livre de partículas (Mörters e Peres, 2010) – a trajetória de pedestres sofre restrições impostas pelo ambiente, resultando em um padrão de dispersão distinto que pode ser modelado pela difusão anômala. Através da simulação das trajetórias e da análise das taxas de deslocamento médio, o modelo propõe quantificar restrições ao movimento em uma determinada região, identificando padrões de deslocamento que representem a complexidade da microacessibilidade e fluidez do espaço urbano para pedestres.

2. METODOLOGIA

2.1 Etapas de análise

As etapas de análise desta pesquisa foram:

1. Aquisição, extração e tratamento da rede de pedestres para os locais de estudo.
2. Enriquecimento com informações de elevação.
3. Definição dos parâmetros para simulação das caminhadas aleatórias (número de trajetórias, número de passos, modo de deslocamento).
4. Cálculo do número de vértices únicos visitados ao longo do tempo (cobertura média) como aproximação do deslocamento quadrático médio (do inglês *Mean Squared Displacement* - MSD) e estimativa do coeficiente de difusão D e expoente de difusão α para avaliar o tipo de movimento.
5. Caracterização da acessibilidade para deslocamento a pé da área estudada.
6. Avaliação quantitativa da facilidade ou dificuldade ao deslocamento de pedestres.
7. Identificação de padrões espaciais que podem revelar áreas mais ou menos acessíveis.

2.2. Local de estudo

Para a presente pesquisa, selecionou-se como ponto de origem das caminhadas a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (São Paulo, SP, Brasil) com as coordenadas 23° 33' 17,42" S; 46° 43' 54,69"W (SIRGAS 2000). Este ponto foi escolhido por ser uma área bem definida, com infraestrutura presente para

diferentes modos de transporte e integração urbana consolidada. Além disto, a região possui ampla disponibilidade de dados urbanos e de transportes, favorecendo a aplicação, calibração e validação do modelo proposto.

Para a região de análise, extraiu-se a malha da rede de pedestres, enriquecida com os dados de elevação com o objetivo de considerar os impactos da configuração espacial da rede de caminhada e os possíveis efeitos do relevo na mobilidade de pedestres. As fontes de dados utilizadas nesta pesquisa incluem:

- **OpenStreetMap (OSM) (https://www.openstreetmap.org):** fonte de dados de mapeamento.
- **GeoSampa (https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br)**: para aquisição de dados de elevação com resolução espacial de 0,50m.

2.3 Parâmetros de simulação

Os parâmetros de simulação desta pesquisa foram convencionados, pois não há valores preconizados na literatura, demandando-se um conjunto de testes para sua consolidação. Para análise, os parâmetros foram baseados no conceito de que um adulto saudável possui como recomendação de distância caminhável o valor de 500 metros (Gehl, 2010; Gruen, 1967; Pafka e Dovey, 2017), resultando nas seguintes definições:

1. ***Buffer* de análise*:*** 550 metros (distância caminhável da origem, acrescido de 10% de margem de segurança).
2. **Número de simulações:** 1000 caminhadas independentes.
3. **Passos por caminhada:** 714 passos (500 metros divididos por passo médio de 0,7 metro).
4. **Política de parada:** define a regra de comportamento em relação aos vértices de parada (pontos da rede em que o pedestre deve interromper seu deslocamento , ver Tabela 1). Quando ocorre, o pedestre deve permanecer parado pelo intervalo de tempo determinado, mensurado em passos consecutivos. Neste teste, a penalidade foi fixada em um passo, valor mínimo para validar o comportamento do modelo.

Tabela 1: Casos de testes para as simulações realizadas

Caso	Probabilidade de parada	Tempo de Parada
Melhor	0%	não se aplica
Médio (50%)	50%	1 passo
Médio (80%, dinâmico)	80%	1 passo ± 1 passo
Pior	100%	1 passo

2.4 Caminhada aleatória

Para a simulação de cada caminhada são realizadas as seguintes etapas:

- A caminhada inicia a partir de um vértice de origem definido na região.
- Caminha-se o número de passos definidos, penalizando regiões de inclinação positiva. Considerando o deslocamento a pé, a penalização reduz a probabilidade de serem escolhidas arestas mais inclinadas na caminhada aleatória (Equação 1):

$$peso_{ij} = \begin{cases} e^{-\lambda \cdot d_{ij}} & , \text{se } d_{ij} > 0 \\ 1 & , \text{se } d_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

  onde λ é o fator de sensibilidade à subida e d_{ij} é a declividade entre dois vértices i e j associados a uma aresta de deslocamento. Nesta pesquisa, convenciona-se o valor de $\lambda = 1$ para determinar o comportamento. Outros valores podem ser avaliados conforme a necessidade.
- A cada passo t calcula-se a cobertura média, i.e., o número médio de vértices únicos visitados até o passo t.
- Após N caminhadas simuladas, calcula-se a média de cobertura para cada passo, resultando na curva de cobertura média $\langle C(t) \rangle$.

2.5 Cálculo da cobertura média e do expoente de difusão

A cobertura média descreve quantos vértices da rede, em média, são visitados por uma caminhada aleatória até o passo t. O cálculo da cobertura média é dado pela Equação (2):

$$\langle C(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |V_i(t)| \tag{2}$$

na qual N o número de caminhadas simuladas e $|V_i(t)|$ é o número de vértices únicos visitados entre o ponto inicial e a posição no passo t da caminhada i.

No movimento browniano clássico, o MSD cresce linearmente com o tempo de acordo com a Equação (3) (Mörters e Peres, 2010):

$$\langle MSD(t) \rangle \propto t \tag{3}$$

A difusão anômala generaliza o movimento browniano clássico, considerando que a relação entre o tempo e o deslocamento quadrático médio não segue uma lei linear, mas seu crescimento obedece a uma lei de potência do tempo conforme a Equação (4):

$$\langle MSD(t) \rangle \propto t^{\alpha}, \alpha \neq 1 \tag{4}$$

na qual α é o expoente de difusão ou tipo de movimento. No modelo proposto, a cobertura média é tratada como uma aproximação do MSD, relacionando-se (Equação 5):

$$\langle C(t) \rangle \propto t^{\alpha}, \alpha \neq 1 \tag{5}$$

com α indicando o tipo de difusão observado. A difusão normal ($\alpha \approx 1$) corresponde ao movimento browniano clássico e, no contexto deste estudo, indica fluidez no deslocamento, sem grandes obstáculos. A subdifusão ($\alpha < 1$) representa que o sistema se difunde mais lentamente do que o normal. Para esta pesquisa, a subdifusão está associada a restrições ou ambiente fragmentado que dificultam a mobilidade. A superdifusão ($\alpha > 1$) indica deslocamentos mais eficientes, com trajetórias preferenciais, presença de vias rápidas ou corredores que facilitam deslocamentos mais longos.

3. ANÁLISE E RESULTADOS

Os resultados para os testes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de simulação para Cidade Universitária, São Paulo, Brasil

Caso	α	D	R^2	Elevação média (metros)	Declividade média (%)
Melhor	0,710	1,026	0,9999	728,72	2,49%
Médio (50%)	0,704	0,671	0,9998		
Médio (80%, dinâmico)	0,654	0,417	0,9996		
Pior	0,002	1,241	0,0876		

Na qual:

- **Expoente α:** indica o movimento/difusão na malha dos deslocamentos simulados.
- **Coeficiente D:** expressa a taxa de crescimento da cobertura média da rede ao longo do tempo.
- **R^2:** coeficiente de determinação, indicando o ajuste do modelo *log-log* com os dados de cobertura.
- **Elevação média (metros):** elevação média dos vértices da rede pedestre considerada.
- **Declividade média:** valor médio das inclinações absolutas entre os pares de nós ou vértices da rede.

A região da Cidade Universitária de São Paulo, no entorno da Escola Politécnica com o *buffer* analisado (550 metros), revela por padrão comportamento de subdifusão significativa, sugerindo que os caminhantes enfrentam obstáculos e limitações em seu avanço linear. A área de análise apresenta uma elevação média de 728,72 metros e uma declividade média de 2,49%, características que indicam um tipo de relevo que contribui

moderadamente para a subdifusão, ainda que não apresente alto desfavorecimento ao deslocamento ativo.

Os resultados das simulações são apresentados na Figura 1, que descreve a relação da cobertura média e a quantidade de passos, e na Figura 2, que demonstra esta relação em escala *log-log*.

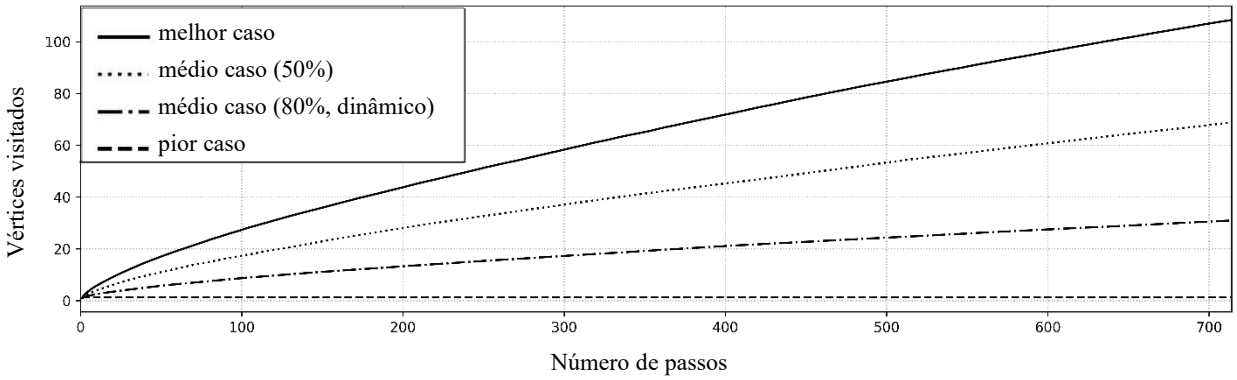


Figura 1: Relação da cobertura média e quantidade de passos

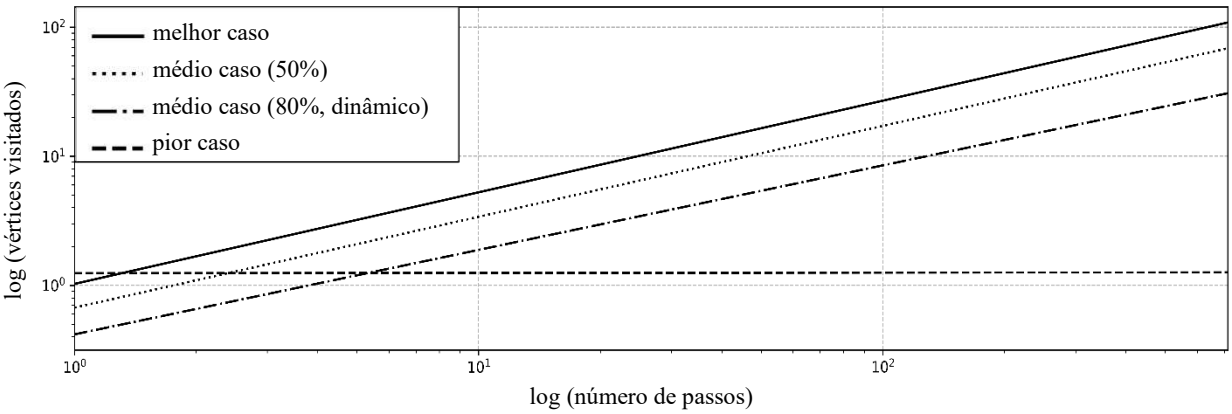


Figura 2: Relação *log-log* da cobertura média e quantidade de passos

No melhor caso, com deslocamento livre sem possíveis atrasos, o crescimento da área apresenta difusão sublinear, com expoente $\alpha \approx 0{,}710$ e coeficiente $D \approx 1{,}026$. Isto indica que a expansão da área coberta não é restrita, mas também não é proporcional ao número de passos, possivelmente devido às limitações naturais da rede. Esta é a melhor situação possível representada pela estrutura atual sem obstáculos, de forma que tal permite identificar as limitações espaciais e geométricas estruturais da malha de pedestres. O ajuste do modelo é robusto ($R^2 \approx 0{,}9999$) demonstrando que o comportamento difusivo é bem representado.

Os casos médios buscam representar situações mais próximas da realidade enfrentadas pelos usuários que devem lidar com paradas aleatórias que influenciam o deslocamento. Por padrão, paradas aleatórias possuem interrupções com probabilidade de ocorrência e tempo variáveis e sua inclusão pode tornar a análise mais realista. Para o caso médio (50%) a probabilidade de ocorrência foi padronizada em 50% e o tempo de parada em 1 passo para verificação do comportamento da difusão. Nos resultados obtidos, o ritmo de difusão desacelera com o expoente α aproximando-se de 0,704 e coeficiente D de 0,671. Isto indica que existe um efeito inibidor por parte das interrupções aleatórias, com tendência à difusão mais lenta mas não tão deteriorada em relação ao melhor caso, sugerindo que os obstáculos espaciais e geométricos podem ser mais relevantes neste caso do que apenas as paradas operacionais. O coeficiente demonstra que o alcance da difusão diminui severamente nestes casos. O ajuste do modelo ($R^2 \approx 0{,}9998$) sugere que os dados mantiveram aderentes ao modelo difusivo proposto.

Para o caso médio (80%, dinâmico), buscou-se apresentar condições piores de deslocamento (probabilidade

de ocorrência de interrupção = 80%) com períodos de atraso variáveis (1 passo $\pm$ 1 passo), obtendo-se um cenário intermediário entre o caso médio (50%) e o pior caso. Neste caso, a difusão tende a ocorrer de forma mais lenta em relação aos melhores casos ($\alpha \approx 0{,}654$), demonstrando que a combinação dos aspectos nativos e operacionais da malha produzem, como efeito de complexidade, o retardamento da difusão e da cobertura da rede. Neste caso, o ajuste do modelo para este caso é altamente confiável ($R^2 \approx 0{,}9985$).

Para o pior caso propôs-se a avaliação da rede de deslocamento em situações extremas que podem comprometer o sistema. O pior caso severo impõe interrupções sistemáticas a todos os vértices de conexão com parada de 1 passo, produzindo efeitos drásticos: o expoente aproximou-se de zero ($\alpha \approx 0{,}002$), evidenciando que interrupções sistemáticas e frequentes trazem imobilidade funcional, com pedestres ficando retidos em certos pontos da rede e com a difusão e cobertura da expansão estagnados. O coeficiente $R^2 \approx 0{,}0876$ sugere que o grau de ajuste está baixo, e o modelo não consegue descrever bem o comportamento de dados neste cenário devido ao comportamento inconsistente. O valor coeficiente D alto ($\approx 1{,}241$) não deve ser interpretado como indicativo de bom desempenho, pois este valor define o patamar inicial da curva, mas não contribui para crescimento significativo da difusão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento proposto demonstra, de forma inicial, que a análise de movimentação simulada utilizando difusão anômala é uma técnica simples e adequada, para avaliar características limitantes ao deslocamento a pé em uma certa região. Neste contexto, o expoente α representa o impacto do deslocamento e o coeficiente D indica seu crescimento. Se, após possíveis intervenções urbanas, o valor de α aumentar, indica-se sucesso com a mobilidade ficando mais fluida e acessível. As simulações podem ser realizadas periodicamente ou após a realização de intervenções. Áreas com baixo valor de α, demandam identificar zonas de descontinuidade e considerar a abertura ou conexão de vias, a criação de passagens para pedestres e a melhoria da infraestrutura existente.

Entre as possíveis extensões desta pesquisa, destaca-se a inclusão de outros parâmetros que influenciam o deslocamento (qualidade do pavimento, tráfego de veículos, condições climáticas etc.) incluindo variáveis apresentadas no *Transit-Oriented Development* (TOD) *Standard* para avaliar o tráfego a pé. O modelo proposto permite também comparar o deslocamento em diferentes bairros, distritos e cidades, além de segmentar grupos de pedestres (mulheres, idosos, crianças etc.) e avaliar o acesso a pontos de interesse, como escolas e hospitais de uma região. Por fim, o modelo pode ser adaptado para análise de outros modos de transportes, que possuem suas próprias sensibilidades à inclinação, restrições viárias e padrões de movimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bozovic, T.; E. Hinckson; T. Stewart e M. Smith (2021) How to improve the walking realm in a car-oriented city? (Dis)agreements between professionals. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *81*(June), 490–507. DOI:10.1016/j.trf.2021.06.011

Gehl, J. (2010) Cities for People. *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11). Island Press, Washington, DC.

Gruen, V. (1967) *The Heart of Our Cities* - The Urban Crisis : Diagnosis and Cure. Simon and Schuster, New York, NY.

Mörters, P. e Y. Peres (2010) *Brownian motion*. Cambridge University Press, Cambridge. DOI:10.1017/CBO9780511750489

Pafka, E., e K. Dovey (2017) Permeability and interface catchment: measuring and mapping walkable access. *Journal of Urbanism*, *10*(2), 150–162. DOI:10.1080/17549175.2016.1220413

Wigan, M. (1995) Treatment of walking as a mode of transportation. *Transportation Research Record*, n.1487, p.7–13, Transportation Research Board.

Rodrigo de Sousa Pissardini (pissardini@usp.br)
Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho (flaviovaz@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica
Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2, 83 - Butantã, São Paulo – SP, CEP: 05508-070

Rafael Henrique de Oliveira (rafaelho@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia
Rua Paschoal Marmo, 1888 – Jd. Nova Itália, Limeira – SP, CEP: 13484-332

A CIDADE DE 15 MINUTOS E HABITAÇÃO SOCIAL EM FORTALEZA - O CASO DO BAIRRO PASSARÉ

Patricia Pessoa Lima, Sabrina Ferreira Lima, Catarina Perote de Menezes Pinheiro, Camila Bandeira Cavalcante
UNIFOR – Universidade de Fortaleza

RESUMO
O artigo discute o planejamento urbano centrado nas pessoas, tendo como estudo de caso o bairro Passaré, na cidade de Fortaleza. A proposta do conceito de cidade de 15 minutos defende que atividades essenciais devem estar acessíveis a pé ou de bicicleta em áreas de alta densidade. A análise do bairro de Passaré, utilizando dados de mobilidade, habitação e infraestrutura, revela o impacto limitado das habitações sociais entregues nos últimos anos no desenvolvimento dos serviços urbanos, além de levantar questões sobre a relação entre valorização imobiliária, investimento em infraestrutura e melhora na qualidade de vida, especialmente em um bairro com o menor IDH da cidade. A evolução do bairro indica aumento na percepção de valor, mas ainda há desafios na ampliação dos serviços e na redução das desigualdades socioespaciais.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conceito de cidade de 15 minutos, proposto por Moreno (2025) e discutido em diferentes experiências internacionais, tem como princípio central aproximar os cidadãos das atividades essenciais à vida urbana. Nesse modelo, habitação, trabalho, abastecimento, educação, saúde e lazer devem estar acessíveis a pé ou de bicicleta em um raio que permita o deslocamento em até 15 minutos. Trata-se de um paradigma urbano que valoriza a diversidade funcional, a descentralização policêntrica e a qualidade de vida, ao reduzir a dependência de longos deslocamentos motorizados e fortalecer a interação social nos bairros. (Gehl, 2013; Garnier e Moreno, 2020)

A aplicação desse conceito em cidades latino-americanas, marcadas por desigualdades socioespaciais, coloca em evidência os desafios relacionados à oferta de infraestrutura e serviços urbanos básicos. Em Fortaleza, o crescimento acelerado e a expansão horizontal nas últimas décadas resultaram em um processo de periferização da população de baixa renda, enquanto serviços e equipamentos urbanos permaneceram concentrados nas áreas centrais e valorizadas (IPECE, 2025). Esse cenário acentua as desigualdades de acesso e distância à realidade local do ideal de proximidade preconizado pela cidade de 15 minutos.

Nesse contexto, a produção habitacional voltada à população de baixa renda, por meio de programas como o Minha Casa Minha Vida (PMCMV), desempenhou papel relevante na redução do déficit habitacional, mas trouxe questionamentos sobre a localização dos empreendimentos e sua integração ao tecido urbano (Cavalcante et al., 2020; CEF, 2024; HABITAFOR, 2024). A análise dessas habitações torna-se, portanto, fundamental para compreender até que ponto o acesso às atividades essenciais acompanha a expansão imobiliária e contribui para a melhoria da qualidade de vida em bairros periféricos.

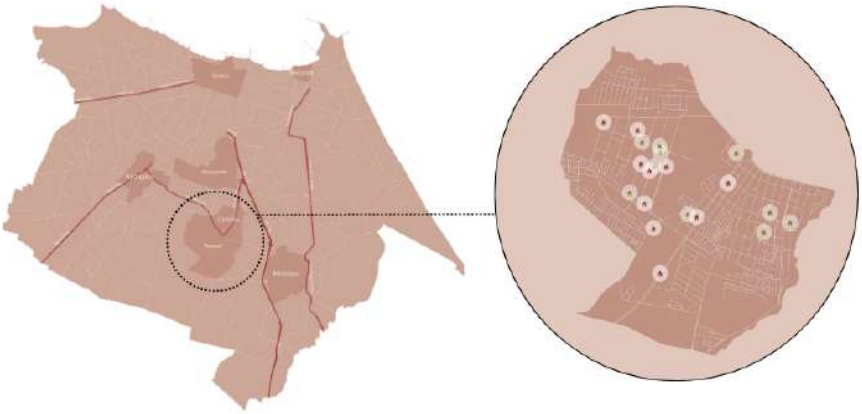
O bairro Passaré, escolhido como objeto de pesquisa, justifica-se pelo fato de ter a maior concentração de empreendimentos de habitação social implantados por programas públicos, cerca de 8% do total de Fortaleza. O bairro possui baixo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e relevante concentração de habitações sociais. Soma-se a isso o fato de o bairro ter recebido investimentos no sistema viário em decorrência da Copa do Mundo de 2014, tornando-se um espaço estratégico para analisar a relação entre política habitacional, mobilidade e acesso a serviços urbanos. O objetivo é avaliar o alcance das atividades essenciais no tempo de deslocamento de 15 minutos, contribuindo para a discussão sobre planejamento urbano inclusivo e centrado nas pessoas.

O artigo está estruturado da seguinte forma: Seção 1, Considerações iniciais; Seção 2 apresenta a metodologia utilizada na pesquisa e alguns conceitos fundamentais dos objetos de pesquisa; Seção 3 com a coleta de dados dos empreendimentos habitacionais e serviços urbanos; e por fim, seção 4 demonstrando a análise de dados e os resultados obtidos através de imagens representativas. Além destas, ao final do trabalho é feita uma conclusão e recomendações para pesquisas futuras.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho é predominantemente quantitativa, onde serão coletados dados dos serviços urbanos, disponíveis nos portais de acesso do município, agrupados em seis funções essenciais: habitação, trabalho, abastecimento, saúde, educação e lazer (Moreno, 2025). Em seguida, deve-se sobrepor esses dados à região estudada, com a finalidade de quantificar e georreferenciar esses serviços, através de uma ferramenta do tipo GIS.

Para que se possa efetivamente analisar a quantidade de serviços frente a localização dos mesmos, foram escolhidos dois empreendimentos, um classificado como Habitação de Interesse Social, Residencial Parque Adriano, e outro enquadrado na modalidade Habitação de Mercado Popular, o Residencial Jardim Passaré (Figura 1). A escolha de um empreendimento de cada modalidade tem como objetivo observar a oferta de serviços urbanos em um condomínio produzido e ofertado gratuitamente à população pelo município, e o outro, produzido pelo mercado imobiliário, ambos enquadrados no programa Minha Casa Minha Vida (Fortaleza, 2023). A partir de cada empreendimento, delimitou-se um raio de 1,5 quilômetros, distância considerada equivalente ao deslocamento médio a pé ou de bicicleta em até quinze minutos (Zambon, 2023).



.

Figura 1: Localização do bairro Passaré na cidade de Fortaleza e as habitações estudadas
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados FORTALEZA, 2025

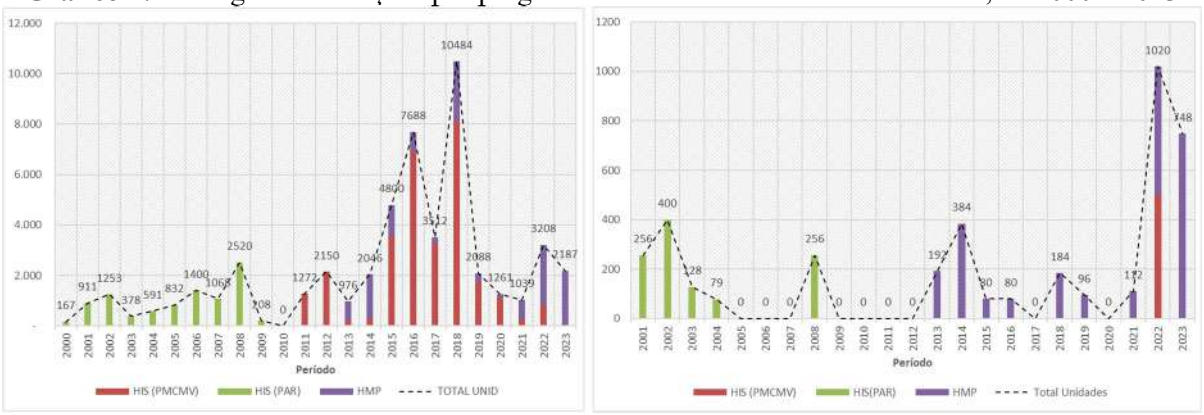
Os dados utilizados foram extraídos de fontes oficiais, como o Instituto de Planejamento de Fortaleza (Fortaleza, 2025), a Caixa Econômica Federal (CEF, 2024) e a Secretaria Municipal de Desenvolvimento Habitacional (HABITAFOR, 2024). A análise contemplou informações sobre habitação, comércio e serviços, educação e saúde, esportes e lazer, mobilidade, além de redes de abastecimento de água e esgoto, permitindo avaliar o alcance das atividades essenciais no espaço urbano delimitado.

3. COLETA E ANÁLISE DE DADOS

3.1 Habitações populares

A produção habitacional no segmento popular, no período de 20 anos desta pesquisa, foi de 52.265 unidades. Estas habitações estão distribuídas em 184 condomínios, de acordo com o gráfico abaixo. No Passaré, temos a presença de 27 condomínios, somando 4015 unidades entregues no período de 2000 a 2023, dentro dos programas habitacionais estudados. Esse número representa 7,68% das unidades entregues na cidade, o maior número concentrado por bairro.

Gráfico 1: Entrega de habitações por programa em Fortaleza e no Bairro Passaré, de 2000 a 2023



Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de CEF, 2024; HABITAFOR 2024.

No gráfico da esquerda, observa-se que o pico de produção de unidades na cidade aconteceu em 2018. Para o bairro, o ano de maior pico de entregas foi em 2021. De 2001 à 2012 a predominância é de unidades HIS, e a partir deste ano, a predominância é de HMP. Por se tratar de um bairro com quantidade muito relevante de habitações, em comparação à cidade, estudaremos a seguir se os serviços urbanos acompanharam a mesma evolução das habitações.

3.2 Serviços urbanos

Analisando os dados coletados dentro de um raio de 1,5 km de cada empreendimento, temos situações distintas para os empreendimentos estudados. Comparativamente, seria esperado que o empreendimento Jardim Passaré, por se tratar de investimento privado construído com subsídios, espera-se que em troca da mais valia obtida pelo mercado sejam entregues benfeitorias relevantes para a comunidade. Os resultados estão apresentados na Figura 2. As redes de infraestrutura de água, esgoto, e até a malha cicloviária se apresenta maior no raio de acesso do Jardim Passaré, porém ao comparar o acesso a comércio e serviços a oferta é reduzida com relação ao Parque Adriano.

Sobre a oferta de equipamentos urbanos como escolas, equipamentos de saúde e lazer, são mais ofertados na região do Jardim Passaré do que no Residencial Parque Adriano. A quantidade de habitações é equivalente entre os dois empreendimentos.

	HABITAÇÕES	INFRA ESTRUTURA		MOBILIDADE			EDUCAÇÃO					SAÚDE	LAZER		COM/SERV
CONDOMÍNIO		Rede de Esgoto (m)	Rede de Água (m)	Terminais de ônibus	Malha Cicloviária (m)	Pontos de ônibus	Rede Cuca	Centro de qualificação profissional	Instituições de ensino superior	Escolas Estaduais	Escolas Municipais	Equipamentos de Saúde e assistência social	Praças	Areninhas	Áreas de comércio e serviços (m²)
Parque Adriano	256	20.705	97.012	0	9.786	122	0	0	0	2	9	4	4	4	1.487
Jardim Passaré	280	34.767	108.370	0	13.980	118	0	0	0	2	14	5	6	5	898
% adicional do Jardim Passaré com relação ao Parque Adriano		68%	12%		43%	-3%				0%	56%	25%	50%	25%	-40%
Valor adicional do Jd. Passaré com relação ao Parque Adriano		14.062	11.358	0	4.194	-4	0	0	0	0	5	1	2	1	-589

Figura 2: Oferta de serviços quantificados e percentuais comparativos.
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados FORTALEZA, 2025

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os grandes centros urbanos enfrentam problemas de fragmentação, segregação e desigualdades socioespaciais, resultantes de décadas de modelos de planejamento urbano pautados no zoneamento restritivo e no incentivo ao deslocamento motorizado. Essa realidade leva à perda coletiva da noção de tempo útil e tempo social, assim como um declínio da interação social baseada na proximidade. Este artigo analisou o Bairro Passaré e como os moradores de dois condomínios de habitação social vivem essa realidade de proximidade e senso de

pertencimento.

No residencial Parque Adriano, com 256 unidades e entregue em 2008, é possível verificar acesso a escolas, unidades de saúde e uma rede de linhas de ônibus, com relação a acesso a metrô e VLT, apesar de existente na cidade, não atende o bairro em questão. Sobre o sistema cicloviário, não há nenhuma estação de bicicletas compartilhadas e a malha cicloviária ainda fica concentrada nas 3 principais avenidas, sem muita capilaridade. O empreendimento em questão foi entregue em 2008, classificado como HIS, direcionado para famílias que recebem até 3 salários mínimos. (Figura 3)

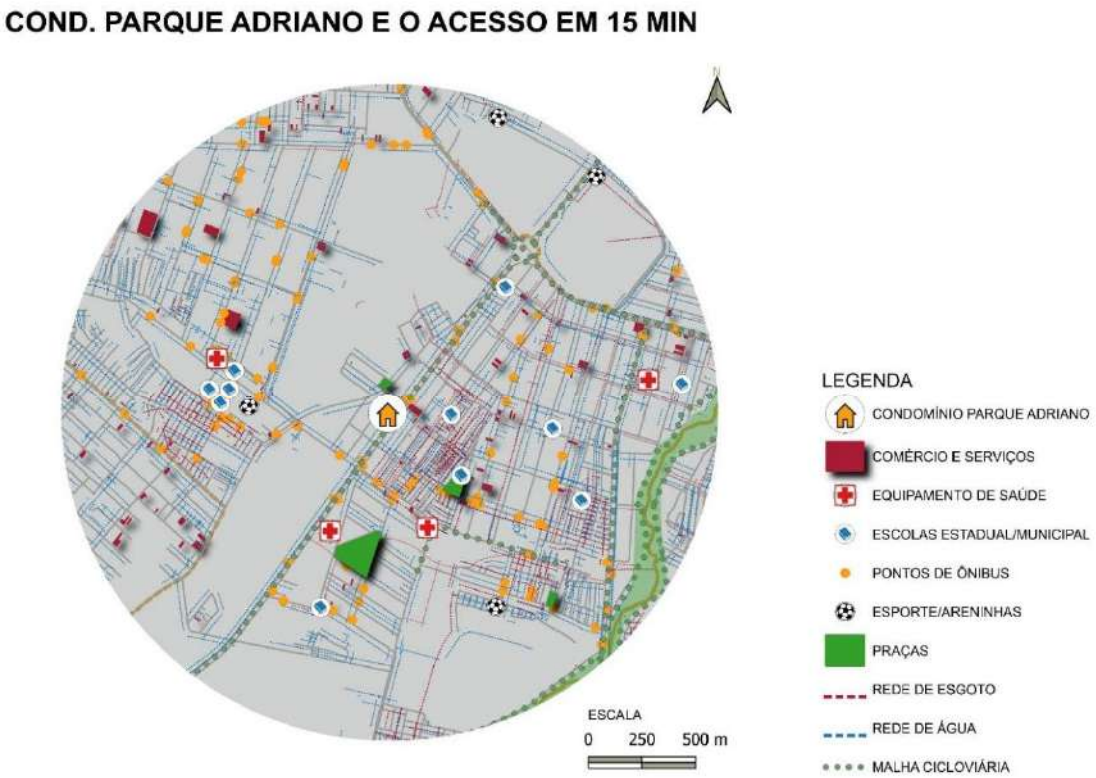


Figura 3: Empreendimento HIS e o acesso aos serviços em 15 minutos residencial Parque Adriano, Passaré
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de HABITAFOR,2024; FORTALEZA, 2025

No residencial Jardim Passaré, com 280 unidades e entregue em 2022, temos de forma geral a mesma oferta de serviços vista no caso anterior, exceto pela disparidade na oferta das redes de água e esgoto, serviço essencial que deveria ser ofertado igualmente e antecipadamente a implantação das habitações. O empreendimento foi entregue em 2022, pelo Programa Minha Casa Minha Vida, classificado como HMP, direcionado para famílias que recebem até 3 a 10 salários mínimos (Figura 4).

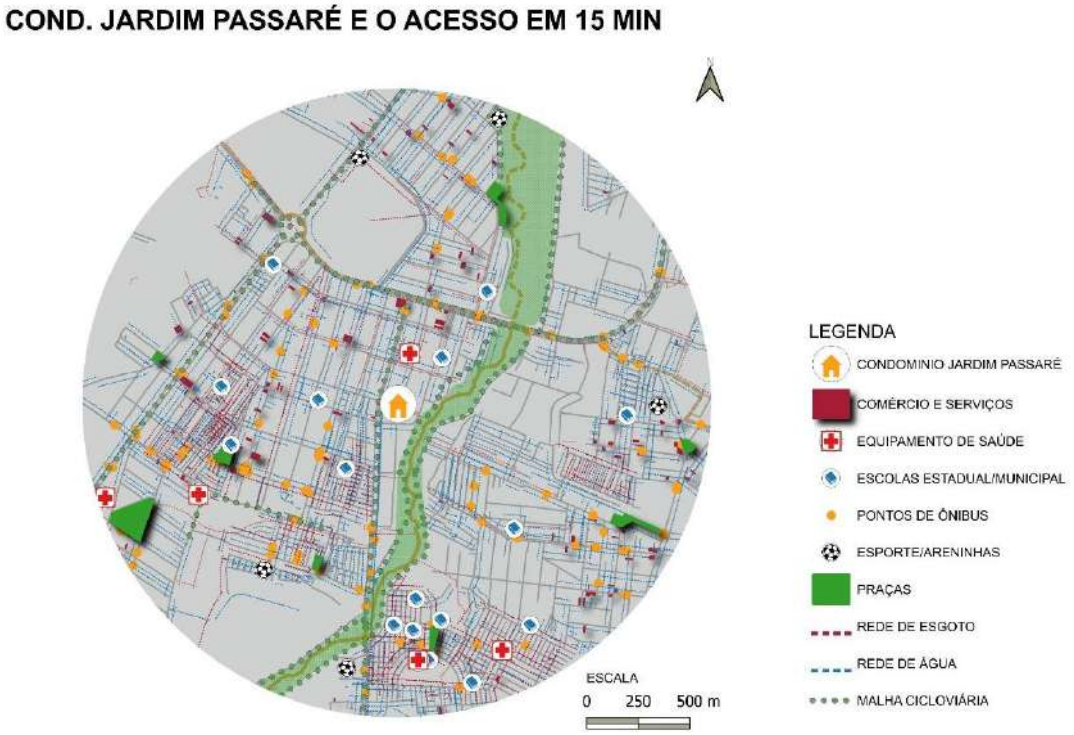


Figura 4: Empreendimento HMP e o acesso aos serviços em 15 minutos no residencial Jardim Passaré
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de HABITAFOR,2024; FORTALEZA, 2025

A análise também questiona a evolução do bairro em relação à renda per capita e à percepção de valor dos terrenos. O movimento de desenvolvimento da cidade e do bairro, desde a entrega das habitações de Interesse Social (HIS), em 2008, até a entrega das Habitações de Mercado Popular (HMP), em 2022, manifesta-se pelo aumento da percepção de valor no bairro, resultando na oferta de habitações mais caras no mercado. O questionamento é até que ponto esse aumento do valor da terra e das habitações reflete na melhoria da infraestrutura e dos serviços urbanos. É desejável que, nas cidades, a valorização imobiliária acompanhe a valorização dos espaços públicos; em muitos bairros de alta renda per capita, é possível verificar um aumento do IDH e da oferta de serviços proporcional ao aumento do preço dos imóveis. Apesar de não existir um índice formal de avaliação pós-ocupação dessas regiões, observa-se que, após a chegada dessas habitações, o IDH pode estar relacionado ao tema.

Entende-se que o fato dos empreendimentos, mesmo sendo classificados como habitação social, atendem a populações de rendas diferentes, mas apesar disto, o retrato hoje do acesso a serviços em 15 minutos é bastante semelhante em ambos os casos. Vale a ressalva com relação às redes de abastecimento, já apontadas anteriormente, ainda hoje, não são plenamente ofertadas em ambas as regiões.

5. CONCLUSÕES

Mumford (2024) fala sobre o custo de um sistema de transportes numa grande cidade, incluindo não somente os equipamentos, mas toda a infraestrutura necessária. A afirmação feita em 1961 pelo historiador já previa o dilema de mobilidade dos dias atuais, em especial por parte das populações mais carentes, que possuem menos alternativas de acesso à vida na cidade. Considerar a localização dos equipamentos para populações de baixa renda, calculando deslocamentos em até 15 minutos, pode reduzir a necessidade de investimentos em grandes obras, além de aumentar a qualidade de vida nas proximidades de comunidades periféricas.
O bairro Passaré, aqui estudado, concentra aproximadamente 8% das habitações populares de Fortaleza, um número alto para apenas 1 dos 121 bairros de Fortaleza. Pela característica socioeconômica dessa população, a mobilidade se torna uma questão muito relevante, em especial o acesso a transporte público de massa e alternativas de transporte de baixo custo, como a caminhada e a bicicleta. De acordo com Jacobs, 2011, um bairro bem sucedido é aquele que se mantém razoavelmente em dia com seus problemas, de modo que eles não o destruam. A falta de autonomia ou funcionalidade de um bairro é normal até o limite em que não

conflitem com a mobilidade e a fluidez urbana, e que não enfraqueçam economicamente a cidade (JACOBS, 2011).

Neste artigo, percebe-se que houve grande evolução do número de habitações construídas ao longo dos anos neste bairro, e um descompasso com a oferta de alguns serviços em 15 minutos. É possível também supor que a percepção de oferta de serviços, dada por equipamentos de uso público de educação, lazer e saúde, oculte serviços essenciais não oferecidos como o acesso universal ao abastecimento de água e esgoto nessa mesma região. Estudos futuros de empreendimentos em diferentes bairros da cidade podem revelar de forma mais objetiva o quanto estes empreendimentos atendem ao que representa o conceito de cidade de 15 minutos adaptado para realidade de Fortaleza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei Ordinária nº 11.390, de 18 de setembro de 2023. Define a Política Municipal de Mobilidade Urbana Sustentável, institui o Plano de Acessibilidade e Mobilidade Urbana Sustentável de Fortaleza e dá outras providências.

CEARÁ – IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégias econômicas do Ceará. Disponível em https://www.ipece.ce.gov.br/. Acesso em 10-07-2025

CEF. CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Empreendimentos Contratados PF NORDESTE https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx. Publicado em 07 de abril de 2022. Acesso em 15-04-2024

CAVALCANTE, C. B.; LOPES, A. S.; CAPASSO, M. M.; LOUREIRO, C. F. G. Análise dos planos diretores de Fortaleza sob o paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade da Urbe Sustentável. *Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, n.e20190271, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190271.

https://www.ipece.ce.gov.br/

FORTALEZA. Lei Complementar nº 384, de 26 de dezembro de 2023. Dispõe sobre os procedimentos necessários para Habitações de Interesse Social – HIS e Habitação de Mercado Popular – HMP no âmbito do Município de Fortaleza. Diário Oficial do Município, Fortaleza, 2023.

FORTALEZA. Ipplan Fortaleza- Instituto de Pesquisa e Planejamento de Fortaleza. Disponível em: https://mapas.fortaleza.ce.gov.br/. Acesso em: 10-07-2025.

HABITAFOR. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Habitacional de Fortaleza. Disponível em: https://habitacao.fortaleza.ce.gov.br/inicio/a-habitafor.html. Acesso em: 27 nov. 2024.

JACOBS, JANE.Morte e vida de grandes cidades. Tradução de Carlos S. Mendes Rosa. 3. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2011.

LIMA, L. S.; LOUREIRO, C. F. G.; SOUSA, F. F. L. M.; LOPES, A. S. Espraiamento urbano e seus impactos nas desigualdades sócio espaciais da acessibilidade ao trabalho em Fortaleza. *Revista Transportes*, v. 29, n. 1, 2021. DOI: <10.14295/transportes.v29i1>.

MORENO, C A Cidade de Quinze Minutos: Uma solução para salvar nosso tempo e nosso planeta. São Paulo, SP, BEI Editora, 2025.

GARNIER, É.; MORENO, C. Le Livre Blanc nº 2. La ville du 1/4 d'heure. Du concept à la mise en œuvre. 2020.

GEHL, Jan. Cidades para pessoas. São Paulo, Perspectiva, 2013.

MUMFORD, L. A Cidade na História: suas origens, transformações e perspectivas 6. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2024.

ZAMBON, João Pedro. Mobilidade urbana a partir do caminhar: análise da proposta Cidade 15 Minutos aplicada em Santa Fé – PR. Trabalho apresentado ao *Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia – ENANPEGE*, Palmas (TO), XV edição, 09 a 13 de outubro de 2023. 2023.

Patricia Pessoa Lima (pessoa.p@outlook.com)
UNIFOR – Universidade de Fortaleza, Vice-reitoria de ensino de graduação e pós graduação, Diretoria de Pós Graduação, Avenida Washington Soares, 1321, Edson Queiroz, Fortaleza - CE, CEP 60811-905

ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DE PROCEDIMENTOS DE MODERAÇÃO DE TRÁFEGO: TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS

Marcela Cristina Costa Branco, Matheus Basilio Silva Gaia, Luiz Roberto Delgado, Gustavo Marx Coelho Barbosa, Renato Guimarães Ribeiro, Guilherme de Castro Leiva
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – CEFET-MG

RESUMO
O presente estudo tem como objetivo investigar a produção científica relacionada aos procedimentos de moderação de tráfego urbano, com foco nas aplicações existentes e nas tendências futuras. A metodologia adotada foi a análise cienciométrica, com a coleta dos dados baseada na base Scopus e a delimitação do período de análise entre 2015 e 2025. Os dados foram tratados e analisados com a utilização de linguagem R. Os principais achados indicam um aumento significativo nas publicações em 2024, com destaque para abordagens como *tactical urbanism* e *traffic calming*. O *Urban design* aparece em evidência nas publicações, indicando tendências futuras de aplicação relacionadas à temática. Observa-se, ainda, uma concentração da produção dos estudos em países como China e Estados Unidos. Conclui-se que a moderação de tráfego está em ascensão como campo de estudo, impulsionada por demandas de mobilidade sustentável e de transformação urbana.

1. INTRODUÇÃO

A moderação de tráfego tornou-se uma estratégia central no planejamento urbano contemporâneo, principalmente diante dos desafios de segurança viária, mobilidade sustentável e qualidade de vida. Métodos como superquadras (*superblocks*), faixas elevadas e mini rotatórias inteligentes estão ganhando espaço nas agendas públicas e acadêmicas. Com o avanço das tecnologias e das estratégias de urbanismo tático, surge a necessidade de mapear a evolução científica sobre o tema, o que constitui a problematização do presente estudo.

O objetivo do artigo é utilizar a cienciometria para levantar os estudos publicados sobre as aplicações de moderadores físicos de tráfego, com a finalidade de ser um instrumento para melhorias no planejamento urbano e de transportes. Pretende-se identificar os principais procedimentos de moderação físicas de tráfego aplicados e relatados na literatura, considerando tendências emergentes, principais autores e lacunas existentes.

A cienciometria analisa sobretudo os aspectos quantitativos da produção científica, gerando informações relevantes para a compreensão de padrões e tendências de pesquisa, bem como para a identificação de campos científicos que necessitam de maior atenção por parte dos pesquisadores (Chellappandi *et al*., 2018; Sousa e Santos-Filho, 2020; Correia *et al*. 2022). A justificativa do presente estudo decorre da lacuna existente na literatura quanto ao levantamento quantitativo de publicações relacionadas aos instrumentos de moderação de tráfego. Compreender essa problemática contribui para novos estudos que envolvam sua aplicação em melhorias no planejamento urbano e de transportes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Um dos principais fatores de risco em cruzamentos de vias urbanas é a velocidade dos veículos. Para coibir o excesso de velocidade e reduzir acidentes de trânsito nesses locais, medidas de moderação de tráfego são introduzidas (Jassal e Sharma, 2024). A moderação de tráfego consiste em intervenções físicas e tecnológicas no espaço urbano, com o intuito de reduzir a velocidade dos veículos, aumentar a segurança de pedestres e ciclistas, e promover uma mobilidade urbana mais eficiente e equitativa (WRI BRASIL, 2024).

Para a melhoria dos espaços públicos de forma a priorizar os pedestres, a cidade de Barcelona, por exemplo, utilizou a aplicação de *"superblocks"* como medida de moderador físico de tráfego. Nesse sentido, o *"urban design"* desempenha um papel fundamental na formação de padrões de atividade humana. As intervenções em Barcelona atraíram a atenção de planejadores urbanos e cientistas, que buscam analisar como e em que medida essas iniciativas massivas para pedestres promovem o bem-estar social e a saúde da população (Morales-Flores e Marmolejo-Duarte, 2025). Nesse sentido, é possível verificar que moderadores de tráfego contribuem para novos estudos que envolvem a sua aplicação para melhorias no planejamento urbano e de transportes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa baseou-se no método cienciometria, com abordagem quantitativa da produção científica de artigos. A coleta foi realizada na base Scopus, em junho de 2025, considerando publicações entre 2015 e 2025. Os filtros utilizados foram palavras-chave, limitando-se a artigos científicos publicados em revistas com temáticas relacionadas a transportes, cidades e sociedades sustentáveis, segurança e prevenção de acidentes no trânsito.

No início do estudo, foi conduzida uma pesquisa preliminar na base Scopus, a qual demonstrou não haver padronização no uso da palavra-chave "moderadores de tráfego", o que dificultou a identificação de estudos sobre moderadores físicos de tráfego e suas aplicações. Dessa forma, tornou-se necessário adotar termos mais específicos e alinhados ao tema. Portanto, as palavras-chave utilizadas foram: "*traffic calming*", "*traffic calming measures*", "*speed bumps*", "*raised crosswalks*", "*chicanes*", "*superblocks*" e, "*tactical urbanism*".

A ferramenta utilizada para a análise após a coleta dos dados e a aplicação dos respectivos filtros na base Scopus foi a linguagem R e o pacote *Bibliometrix.* Por meio do *Bibliometrix* foi possível fazer análises e obter resultados referentes a cienciometria dos artigos científicos coletados na base Scopus. Para a utilização do *Bibliometrix* foi necessário o tratamento dos dados coletados na base Scopus e organização para que ficassem em formato estruturado.

4. RESULTADOS ENCONTRADOS

Na base Scopus, foram encontrados 3.354 artigos no total, considerando as palavras-chave definidas para o ciclo de 2015 a 2025. Refinando para artigos científicos, obteve-se 1.101 trabalhos ao aplicar os filtros para as áreas de transportes, cidades e sociedades sustentáveis, segurança e prevenção de acidentes de trânsito, a quantidade de artigos passou a ser de 710. Esses 710 artigos constituíram o ponto de partida para a realização das análises de cienciometria na linguagem R.

4.1 Evolução Temporal das Publicações

A seguir, é apresentado, na Figura 1, a evolução das publicações de 2015 a 2025 na base Scopus referentes aos moderadores físicos de tráfego, considerando os parâmetros da sessão 3 (Materiais e métodos).

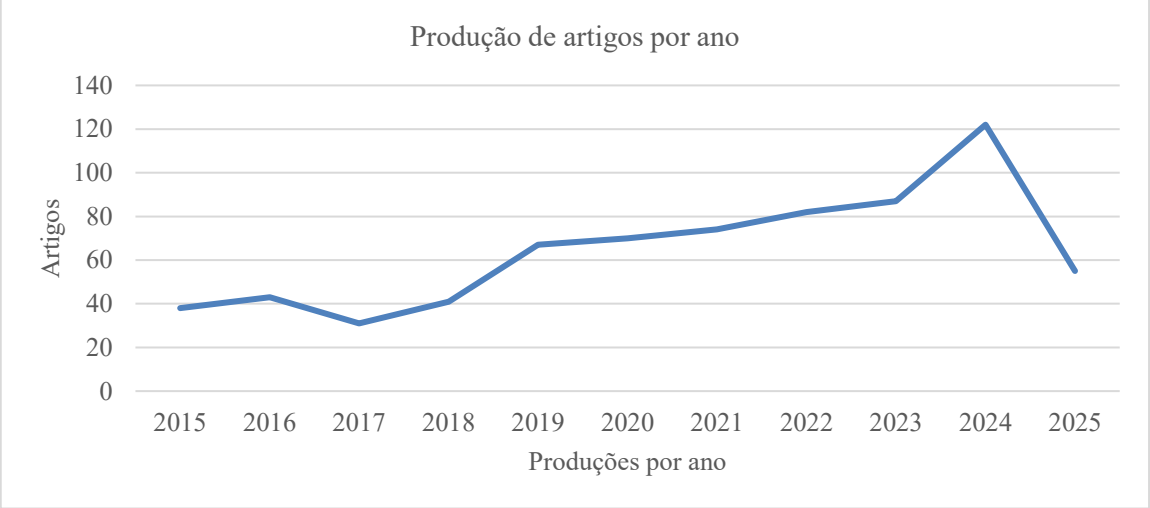


Figura 1: Produção científica anual de 2015 a 2025.

4.2 Análise Geográfica

Na Figura 2, são mostrados os países que mais publicaram artigos científicos sobre a temática moderadores físicos de tráfego, considerando as produções totais de 2015 a 2025:

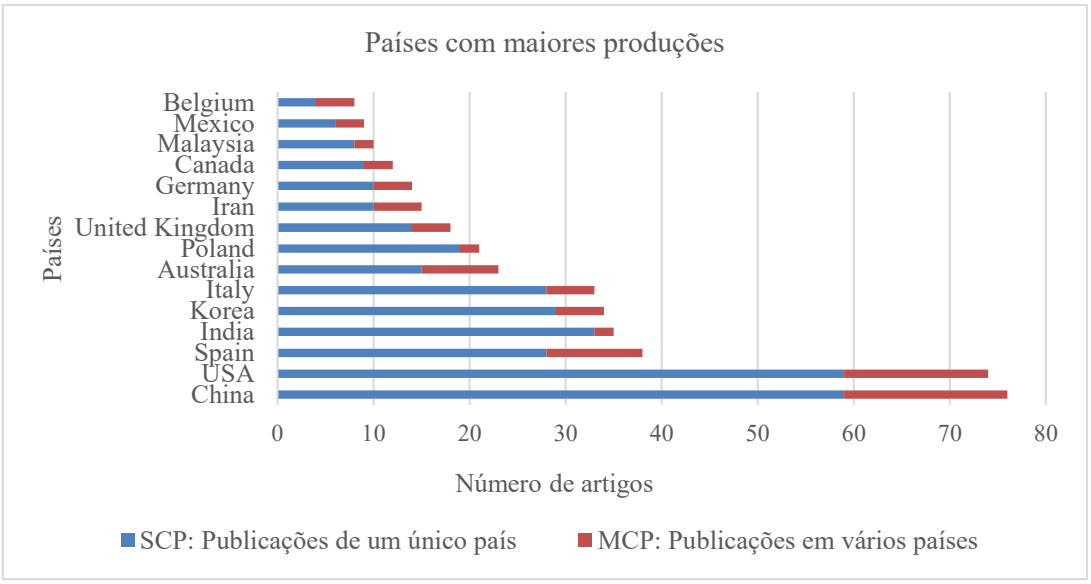


Figura 2: Produção científica anual por países de 2015 a 2025.

4.3 Autores mais produtivos

Os autores que mais publicaram, considerando a produção total de 2015 a 2025 com a temática de moderadores físicos de tráfego, são apresentados na Figura 3:

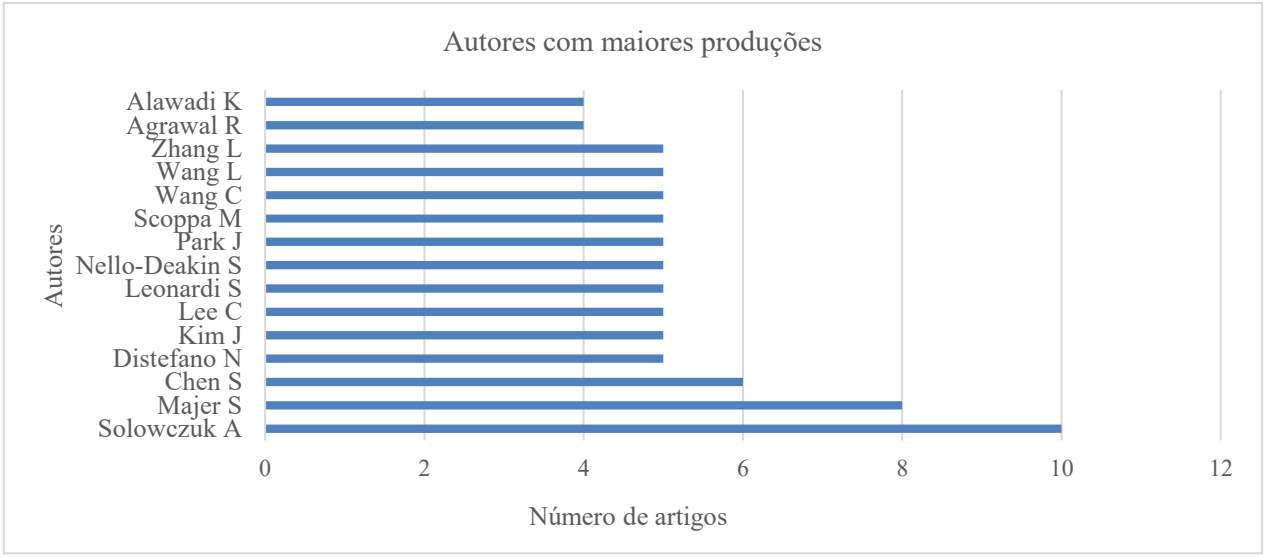


Figura 3: Produção total de 2015 a 2025 por autores.

4.4 Palavras-chave por autores e Temas Emergentes

As palavras-chave que tiveram maior destaque nos artigos científicos com a temática de moderadores físicos de tráfego, considerando o estudo específico por autores entre 2015 a 2025, constam na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Palavras-chave com maior relevância considerando a publicação dos autores de 2015 a 2025.

	Palavras-chave por autores	Artigos		Palavras-chave por autores	Artigos
1	Tactical Urbanism	91	6	Safety	19
2	Traffic Calming	73	7	Superblock	19
3	Road Safety	26	8	Public Space	17
4	Superblocks	22	9	Urban Design	17
5	Speed Bump	21	10	Traffic Calming Measures	15

Na Tabela 1, é possível observar o surgimento de temas emergentes dentro do universo de estudo sobre moderadores físicos de tráfego.

4.5 Palavras-chave que aparecem com maior frequência nos artigos

Na Figura 4 é mostrado o mapa de ocorrência das palavras-chave de maior relevância nos estudos publicados na literatura sobre a temática de moderadores físico de tráfego, referente ao ciclo de 2015 a 2025.

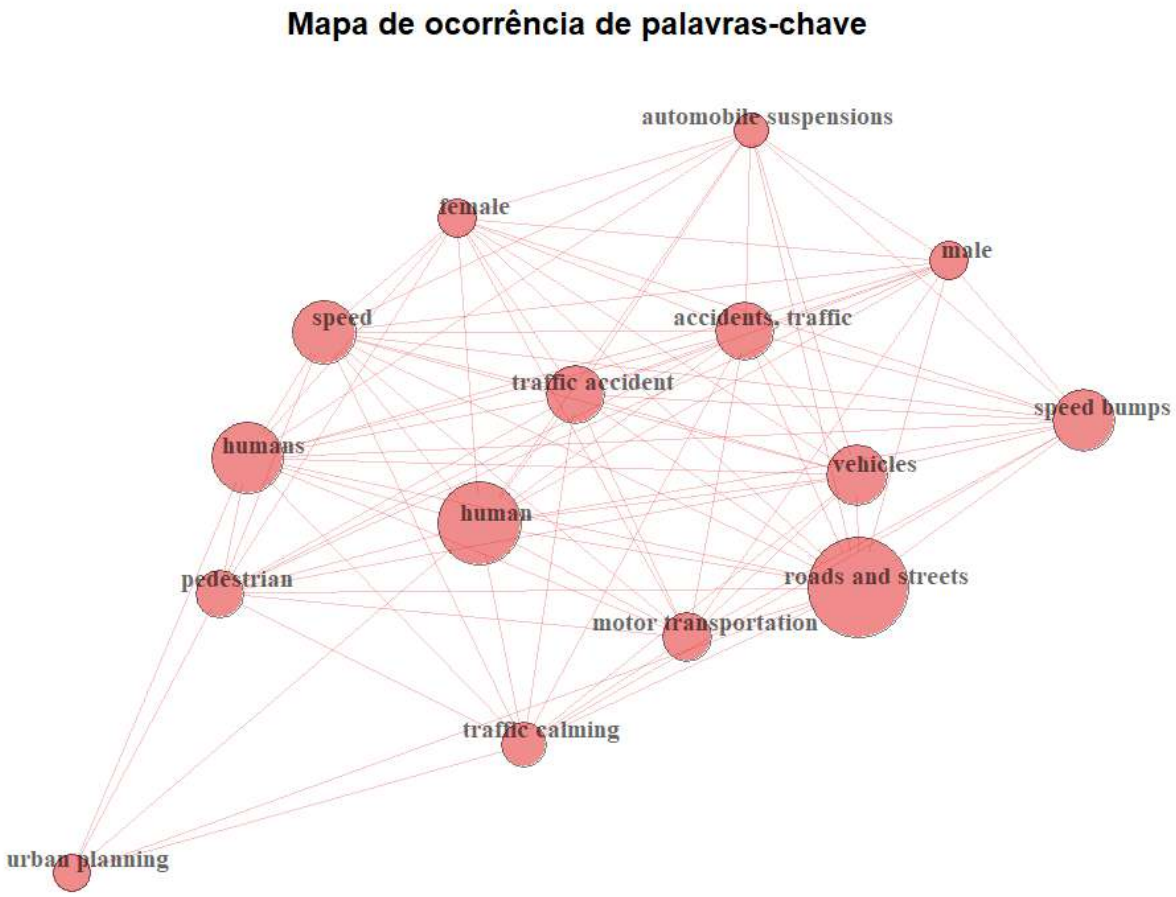


Figura 4: Mapa de ocorrência de palavras-chave com maior relevância nos estudos de 2015 a 2025.

5. DISCUSSÃO

Ao analisar os resultados, a maior produção anual de artigos publicados em relação aos moderadores físicos de tráfego ocorreu em 2024. Entretanto, em 2025 observa-se uma queda, uma vez que a coleta de dados deste estudo foi realizada em junho, não contemplando a totalidade das publicações do ano. O país que mais produziu estudos sobre a temática considerando o período de 2015 a 2025, foi a China, seguida pelos Estados Unidos. Os autores mais produtivos nesse intervalo foram: em primeiro lugar, Solowczuk A., com 10 estudos publicados, e em segundo lugar, Majer S., com 8 estudos publicados.

As palavras-chave que apareceram com maior relevância no período de 2015 a 2025 em relação aos moderadores físicos de tráfego considerando a escolha do estudo por autores foram: *"tactical urbanism"* em primeiro lugar com 91 artigos e *"traffic calming"* com 73 artigos.

É relevante destacar que *"superblock"* e *"urban design"* estão na lista das 10 palavras-chave que se destacam nos estudos por autor. O termo *"urban design"* indica também o surgimento de novos estudos que contemplam

a temática de moderadores físicos de tráfego e que podem indicar tendências futuras de aplicação no ambiente urbano sobre a temática.

Ademais, considerando a análise da cienciometria relacionada ao campo da mobilidade urbana, um dos desafios é a estruturação dos dados e as diversas aplicações que existem para a área de transportes. As potencialidades no uso da análise da cienciometria para o campo da mobilidade urbana consiste em identificar quais aplicações estão sendo mais utilizadas para intervenções de melhorias no planejamento de transportes e quais são os novos instrumentos que estão em uso em relação aos estudos publicados na literatura.

6. CONCLUSÃO

Este estudo revelou tendências importantes na produção científica sobre moderação de tráfego, como o aumento de publicações, principalmente em 2024, com o surgimento de novos temas ("*tactical urbanism*", "*superblocks*" e "*urban design*") e concentração em países desenvolvidos.

As limitações incluem o recorte temporal e a ausência de bases de dados regionais. Ressalta-se que o termo *"urban design"* aponta para o surgimento de novos estudos que contemplam a temática de moderadores físicos de tráfego, podendo indicar tendências futuras de aplicação no ambiente urbano

Conclui-se que a moderação de tráfego está em ascensão como campo de estudo, impulsionada pelas demandas de mobilidade sustentável e transformação urbana. Sugere-se que, em futuras pesquisas, seja aprofundada a avaliação dos impactos sociais e econômicos das intervenções com moderadores de tráfego, bem como a exploração de tecnologias emergentes aplicadas em diferentes contextos urbanos, visando à melhoria do planejamento urbano e dos transportes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pelo apoio à pesquisa e a participação no Congresso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chellappandi, P. e C.S. Vijayakumar (2018) Bibliometrics, Scientometrics, Webometrics / Cybermetrics, Informetrics and Altmetrics - An Emerging Field in Library and Information Science Research. *Shanlax International Journal of Education*, v. 7. DOI: 10.5281/zenodo.2529398.

Correia, G. R.; J. C. Machado; S. S. Almeida; L. A. C. Santos; R. L. Costa; F. N. Calil e C. M. Silva-neto (2022) Produção científica sobre resíduos de poda urbana: uma análise cienciométrica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n.4.

Jassal, K. e U. Sharma (2024) Geometric design optimization of speed tables at urban arterials using UAV assistance. *International Journal of Transportation Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.ijtst.2024.10.010

Morales-Flores, P. e C. Marmolejo-Duarte (2025) Understanding the relationship between public space social capital expressions and pedestrian-oriented design. A case study within the superblock action plan in Barcelona. *Cities*, v. 162. DOI: 10.1016/j.cities.2025.105968

Souza, J. e F. Santos-filho (2020) Estudos Botânicos nos Tabuleiros Litorâneos do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, p. 1335-1347. DOI: 10.26848/rbgf.v13.3.

WRI Brasil (2024) O que são medidas de moderação de tráfego, tema de guia da Senatran com apoio do WRI Brasil. WRI Brasil, 30 out. 2024. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-que-sao-medidas-de-moderacao-de-trafego (acesso em: 17/06/2025).

Marcela Cristina Costa Branco (marcelacristina13@hotmail.com)
Matheus Basilio Silva Gaia (matbas7@outlook.com.br)
Luiz Roberto Delgado (luiz.delgadobh@gmail.com)
Gustavo Marx Coelho Barbos (gmarx01@yahoo.com.br)
Renato Guimarães Ribeiro (renato.ribeiro@cefetmg.br)
Guilherme de Castro Leiva (guilherme.leiva@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus II, Departamento de Engenharia Civil, Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PERCEPÇÕES NOS DESLOCAMENTOS DA COMUNIDADE ACADÊMICA UTILIZANDO ABORDAGENS DE ENTROPIA E ANÁLISE FATORIAL

Julia Bibiana Zschitschick Souza, Paula Sandri Rhoden, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

RESUMO
Este trabalho analisa comparativamente os fatores que influenciam a satisfação nos deslocamentos da comunidade acadêmica da Universidade Federal de Santa Maria, utilizando as metodologias de Análise Fatorial e Entropia. A partir de respostas de alunos, técnicos e docentes, foram identificados quatro fatores latentes: caminhada, engajamento do usuário, condições de viagem e externalidades, e calculadas as importâncias relativas das variáveis incluídas em cada fator. Os resultados revelaram semelhanças entre os métodos, como a baixa relevância da declividade e da distância percorrida, e diferenças quanto à importância atribuída à fidelidade ao modo de transporte. Infraestrutura e segurança foram apontados como variáveis prioritárias, especialmente iluminação e segurança pública. A comparação entre os métodos possibilita identificar as percepções específicas de cada grupo acadêmico, contribuindo para políticas públicas de mobilidade mais eficazes e oferecendo subsídios para o planejamento voltado à melhoria da qualidade dos deslocamentos, com ênfase nas necessidades distintas de alunos, técnicos e docentes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os padrões de mobilidade urbana apresentam características próprias quando se trata da comunidade universitária. Alunos, professores e demais funcionários diferem de outros grupos populacionais devido às peculiaridades intrínsecas ao deslocamento acadêmico, como horários específicos de aulas e refeições, menores recursos econômicos dos alunos, bem como menor disponibilidade de veículos e carteiras de habilitação entre os mais jovens (Alomari *et al*., 2023; Ruiz-Padillo *et al*., 2024). Essas particularidades destacam a importância de compreender a mobilidade urbana não apenas de forma geral, mas considerando também os padrões e necessidades específicas desse grupo, especialmente no que diz respeito à experiência de deslocamento.

De forma mais ampla, a mobilidade urbana diz respeito à capacidade de deslocamento das pessoas no espaço urbano e está diretamente relacionada à qualidade de vida (Ruiz-Padillo *et al*., 2024). Esses deslocamentos são influenciados por escolhas de vida de longo prazo, como moradia, trabalho, educação e estrutura familiar, que moldam os padrões diários de viagem. Tais escolhas refletem o estilo de vida dos indivíduos, entendido como um conjunto de preferências e comportamentos que afetam e são afetados pela forma como se movimentam na cidade (Krizek e Waddell, 2002; Walker e Li, 2007).

A percepção, a experiência e a satisfação dos usuários em seus deslocamentos são diretamente afetadas por esses padrões e pelas particularidades do grupo acadêmico. Dentre os fatores que mais influenciam essa avaliação, destacam-se a percepção de segurança, tanto em relação a acidentes quanto à violência e criminalidade, o que impacta diretamente a avaliação da qualidade do serviço (Alomari *et al*., 2023). Além disso, o modelo de planejamento urbano nas cidades brasileiras tem favorecido o aumento da frota de veículos, gerando externalidades como poluição sonora e do ar, que afetam negativamente os usuários do transporte público (Kamal *et al*., 2020). Ademais, a satisfação é significativamente influenciada pelo tempo gasto no deslocamento (Tavares *et al*., 2021) e, independentemente do modo de transporte utilizado, todos os indivíduos são pedestres em algum momento da viagem. Portanto, garantir condições adequadas para a caminhada é fundamental, como pavimento das calçadas em bom estado, com faixas bem sinalizadas e ilhas de refúgio (Welle *et al*., 2015), enquanto o conforto físico ao caminhar pode ser impactado por elementos como a inclinação das vias (Aghaabbasi *et al*., 2017).

Os padrões de mobilidade urbana, portanto, estão condicionados por estas experiências de viagem dos usuários, além da relação entre os ritmos diários de deslocamento e o uso do solo, cuja compreensão é essencial para planejadores urbanos e autoridades de trânsito. Considerando as especificidades da comunidade acadêmica, esses elementos tornam-se ainda mais relevantes para a formulação de políticas públicas eficazes e para o desenvolvimento de estratégias de programação, roteirização e planejamento urbano (Kim *et al*., 2016).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar, de forma comparativa, os fatores que influenciam a satisfação no deslocamento pelos membros da comunidade acadêmica em suas viagens rotineiras até a

Universidade. Para isso, serão utilizadas as metodologias de Análise Fatorial e Entropia nas opiniões de estudantes, docentes e técnicos administrativos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em seus deslocamentos principais, com o intuito de identificar convergências e diferenças entre os métodos na identificação dos fatores mais e menos importantes e entre estes três grupos de usuários.

2. METODOLOGIA

O cenário de estudo do presente trabalho foram os quatro campi da UFSM, a qual tem o campus sede localizado na cidade de Santa Maria, na região central do estado do Rio Grande do Sul, e os outros três nas cidades de Cachoeira do Sul, Frederico Westphalen e Palmeiras das Missões, também no interior do estado. Para a coleta de dados, foi aplicado à população acadêmica (alunos, técnicos e docentes) da universidade, via portal institucional, um questionário de opinião que coletou informações pessoais, socioeconômicas, bem como sobre percepção dos diferentes fatores que influenciam a satisfação nos deslocamentos diários da comunidade até a UFSM obtidos da literatura. A avaliação foi realizada através de uma escala Likert de cinco graus de concordância, variando de “discordo fortemente” até “concordo fortemente”. Das respostas, 1.142 foram de alunos, 287 de técnicos e 268 de docentes.

Sabendo da influência de diferentes variáveis na satisfação dos deslocamentos, foram utilizadas análises estatísticas multivariadas para obter informações iniciais sobre a estrutura de agrupamento das variáveis a partir de Análise Fatorial Exploratória (*Exploratory Factor Analysis*, EFA) (Hair *et al.*, 2009) e, na sequência, a aplicação de Análise Fatorial Confirmatória (*Confirmatory Factorial Analysis*, CFA), de modo a estimar as importâncias relativas das variáveis observadas dentro de cada fator latente através das cargas fatoriais padronizadas (Kline, 2011). Para os três grupos (alunos, técnicos e docentes) foi aplicada a mesma estrutura fatorial, e consequentemente o mesmo modelo de medida.

Além disso, para estimar os pesos para cada variável, foi aplicada a técnica da Entropia, que analisa o quão homogêneas são as respostas de cada grupo sobre os aspectos pesquisados. Quanto maior a variação entre os valores de uma variável, mais informação ela transmite e essa variação é medida por meio do conceito de entropia. Quando os valores da amostra são similares, a entropia é máxima, ou seja, não fornece informações relevantes e pode se entender que é pouco importante na análise. Porém, quando os valores são bem distintos, a entropia é menor, indicando que o atributo tem alto poder de influência na decisão (Xu *et al.*, 2024). O uso da entropia é uma escolha conveniente para a detecção de mudanças de comportamento, representado tipicamente por séries temporais discretas e multidimensionais, já que as medidas de entropia as abstraem em um único fluxo de dados numéricos (Zhaoa *et al.*, 2018). Como resultados, obtém-se valores de peso associados a cada variável (Xu *et al.*, 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao iniciar as técnicas estatísticas multivariadas, a amostra dos três grupos se mostrou adequada aos parâmetros de ajuste da EFA, segundo os valores do teste de esfericidade de Bartlett (p-valor $\leq 0{,}001$) e do teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO $\geq 0{,}6$). Assim, o estudo teve inicialmente 22 variáveis observadas, porém, ao ajustar o modelo de medida da CFA para os três grupos, foi finalizado com 14 variáveis. Desta maneira, foi possível identificar quatro fatores latentes relacionados à caminhada, engajamento do usuário, condições de viagem e externalidades. Na sequência foi aplicado o mesmo modelo de medida para alunos, técnicos e docentes, representado na Figura 1. Na estimação dos modelos foi aplicada a correção de Satorra-Bentler (sb), usual para valores de variáveis discretas em escala Likert (Kline, 2011). A Figura 1 apresenta também os valores de ajuste aproximado dos modelos, que resultaram adequados para os 3 grupos, já que valores para CFI e TLI a partir de 0,70 são aceitáveis e maiores que 0,90 são excelentes e para RMSEA e SRMR são aceitáveis até 0,07 e excelentes se resultarem em valores menores que 0,05.

Através dos fatores gerados na EFA, foi possível a aplicação da técnica da entropia dentro de cada fator e a realização da comparação do ranqueamento dos pesos com as cargas fatoriais padronizadas de cada variável observada dentro do correspondente fator latente, obtido da CFA, conforme ilustra a Figura 2. Sendo assim, referente ao fator de caminhada, é possível observar que os alunos e docentes tiveram percepções semelhantes sobre a variável de acessibilidade pela entropia, sendo essa a mais importante para os grupos, seguido da condição das calçadas, porém para os técnicos a ordem se inverte, pois para essa amostra, a variável com maior peso é a condição das calçadas. Ou seja, nos deslocamentos a pé os técnicos priorizam mais as condições das

calçadas e os alunos e docentes a acessibilidade, porém todos percebem a declividade com o menor peso de influência. Nesse mesmo fator, os resultados da CFA não seguiram a mesma tendência com as três primeiras variáveis como na entropia, porém todos os grupos coincidiram nas suas preferências, declarando como principal variável a qualidade das calçadas, seguido da qualidade das faixas de perdestes (Welle *et al*., 2015), acessibilidade e, por fim, como na entropia, a declividade durante o trajeto. Ou seja, para a comunidade acadêmica da UFSM, as inclinações do terreno durante seus deslocamentos não representam uma questão significativa ao deslocamento a pé, sendo menos determinantes na escolha.



Teste	Alunos	Técnicos	Docentes
RMSEA [sb]	0,072	0,074	0,052
CFI [sb]	0,912	0,917	0,957
TLI [sb]	0,887	0,893	0,945
SRMR	0,058	0,066	0,062

Figura 1: Modelo de medida utilizado para a CFA e parâmetros de ajuste

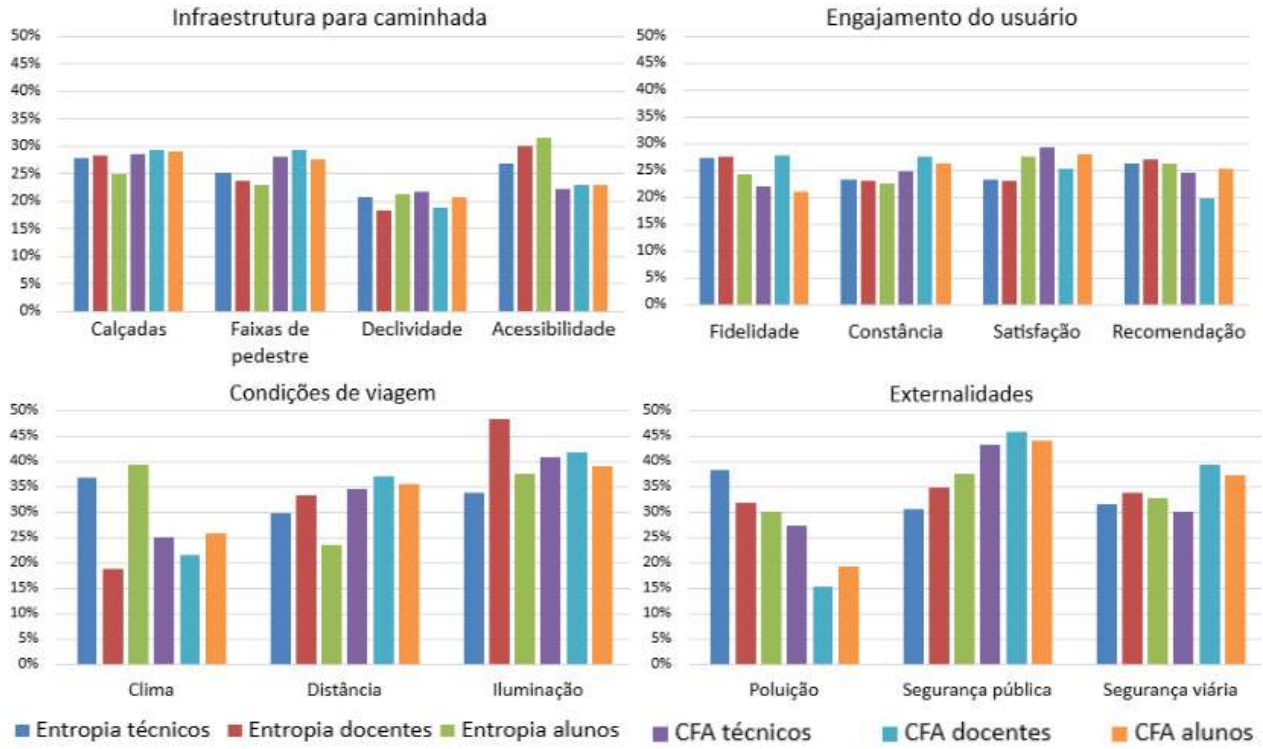


Figura 2: Resultados dos pesos de entropia e CFA para cada variável observada e para cada grupo de respondentes

Referente ao segundo fator, de engajamento do usuário, pela entropia os docentes e técnicos têm a mesma percepção de importância para a fidelidade ao modo, o que reflete uma preferência por estabilidade e previsibilidade nos deslocamentos, alinhado também a horários fixos de trabalho e menor flexibilidade, diferentemente dos alunos, que priorizam a satisfação com os deslocamentos, demonstrando que suas escolhas de transporte estão associadas a experiências individuais. Apesar de discordarem sobre a primeira variável do ranking, os três grupos acadêmicos concordam sobre a posição da última variável, de constância com o modo de transporte até a UFSM, ou seja, sugere que a frequência de uso do modo escolhido não é vista como a variável principal de engajamento. Já na CFA, as únicas ordens de prioridade que coincidiram foram as dos docentes (fidelidade) e dos alunos (satisfação), o restante não foi condizente nas duas metodologias aplicadas. Assim, a fidelidade foi a variável menos impactante para os técnicos e alunos, enquanto para os docentes isso se aplica para recomendação.

Para os resultados sobre as variáveis das condições de viagem segundo a entropia, os alunos e técnicos coincidem que condições climáticas locais são favoráveis para o modo de transporte utilizado, enquanto percebem a distância percorrida como a última colocada, sendo essa a terceira variável com maior peso para os docentes, que consideram o clima como menos influente em seus deslocamentos. Isso pode estar relacionado à predominância de deslocamentos com veículos particulares no grupo dos docentes, menos vulneráveis às variações climáticas. Este grupo tem ainda a iluminação pública como mais determinante, indicando maior preocupação com a segurança em deslocamentos noturnos. Já na CFA, da mesma maneira que na entropia, os três grupos priorizam primeiramente a iluminação, seguido da distância percorrida, e por último, as condições climáticas. Ou seja, independente do grupo, existe uma concordância de que as condições de infraestrutura para a segurança viária (iluminação) exercem papel prioritário.

No quarto fator, de externalidades do transporte, encontra-se a mesma tendência para os docentes e os alunos segundo os resultados da entropia, tendo o ranqueamento de segurança pública, segurança viária e, por fim, a exposição à poluição (Alomari *et al*., 2023). Esse padrão não está presente no grupo dos técnicos, uma vez que eles têm suas preferências ao contrário, priorizando a exposição a poluição, seguida da segurança viária e por último, segurança pública, ou seja, priorizam as condições do ambiente em relação ao receio de sofrer algum tipo de violência e assaltos, e não demonstram uma maior preocupação com o risco de acidentes no trânsito. No entanto, nos resultados da CFA, os alunos e docentes mantiveram a ordem de prioridades, o que não se manteve para os técnicos, uma vez que determinaram a segurança pública como mais influente, seguido da exposição à poluição, e por fim, a segurança viária.

Assim, os resultados discutidos possibilitam um melhor entendimento sobre as variáveis com maior influência para a população acadêmica da UFSM sobre sua satisfação em relação aos deslocamentos rotineiros até a universidade e ressaltam a importância de atender as necessidades dos três grupos observados, de modo que, apesar dos alunos serem maioria nas instituições de ensino (Ruiz-Padillo *et al*., 2024), também devem ser atendidas as demandas e exigências dos técnicos e docentes. Para isso, ao priorizar investimentos e auxiliar para uma tomada de decisão mais direcionada, de maneira a atender o máximo de usuários, percebe-se que as condições das calçadas, bem como de infraestrutura para iluminação e os aspectos de segurança pública atendem a maior parte dos grupos em ambas as metodologias aplicadas no estudo, além de especial atenção aos requisitos de segurança viária.

Por outro lado, cabe destacar as diferenças de prioridades encontradas nos grupos segundo as técnicas utilizadas em diversas variáveis observadas, o que pode ser explicado pelas diferentes experiências vivenciadas durante os deslocamentos (Krizek e Waddell, 2002; Walker e Li, 2007). Como exemplo, são citados os fatores de engajamento do usuário e de condições de viagem, onde cada grupo apresenta uma predileção segundo a metodologia utilizada, não seguindo uma tendência como ocorre sobre a infraestrutura para caminhada e as externalidades. Estas divergências indicam que as propriedades das variáveis utilizadas para cálculo dos pesos são distintas e, portanto, os resultados podem ser complementares: a entropia mostra que a variabilidade das respostas implica que todas as variáveis devem ser levadas em conta nas análises de satisfação de viagens, porém não com a mesma intensidade, enquanto que a CFA ressalta a influência relativa entre as variáveis dentro de cada fator para construir a percepção dos fatores latentes identificados. No entanto, é possível observar uma tendência entre os dois métodos para muitas das variáveis, de forma que, apesar da entropia não ser uma técnica tão robusta quanto a CFA, pode ser combinada à EFA para análises similares, sobretudo em amostras menores, que é o grande limitador do CFA, ou para descartar aspectos não relevantes no estudo.

4. CONCLUSÕES

A mobilidade urbana reflete a qualidade de vida nas cidades, sendo afetada por questões pessoais e socioeconômicas, além de ser influenciada por variáveis relacionadas à infraestrutura, segurança, condições para caminhada e tempo de viagem. Para isso, a percepção dos usuários sobre esses aspectos é essencial para avaliar a qualidade dos deslocamentos, pois reflete diretamente na experiência de viagem dos usuários. No caso da comunidade acadêmica, há particularidades que diferenciam os alunos, técnicos e docentes de outros grupos e entre eles. Sendo assim, o objetivo do estudo foi analisar os fatores que influenciam a satisfação nos deslocamentos principais da comunidade universitária da Universidade Federal de Santa Maria, comparando resultados mediante as metodologias de Análise Fatorial Confirmatória (CFA) e Entropia, de modo a identificar as variáveis mais relevantes de acordo com a percepção de estudantes, técnicos e docentes.

A partir das informações gerais coletadas sobre os deslocamentos da população acadêmica, foram identificados quatro fatores latentes, dentro dos quais foram calculadas as cargas fatoriais de cada variável para os alunos, técnicos e docentes, assim como o peso através da técnica da entropia. Assim, observou-se que para infraestrutura, nas duas metodologias, os três grupos coincidem ao considerar a declividade como menos impactante em seus deslocamentos, porém a mesma concordância não ocorre ao analisar o fator de engajamento do usuário, onde a fidelidade ao modo é prioridade para os técnicos e docentes pela entropia, e somente para os docentes isso se manteve na CFA. Já nas condições de viagem, pela CFA, todos concordam que iluminação é prioridade e que a distância percorrida tem menos significância. Em relação às externalidades em suas viagens, alunos e docentes priorizam a segurança pública segundo as duas metodologias. Por outro lado, foram identificadas questões prioritárias para a maioria dos grupos nas duas técnicas utilizadas, podendo ser apontada a qualidade das calçadas, aspectos vinculados à infraestrutura para iluminação e segurança.

Ainda, sobre o comparativo entre técnicas, a entropia mostrou-se eficiente quando comparada com a CFA, o que indica a possibilidade de uso em futuras pesquisas, além de facilitar a complementação de resultados, considerando as limitações específicas. Assim, analisando as variáveis através dos dois métodos, é possível fornecer um auxílio mais consistente e direcionado para que os gestores possam traçar planos institucionais de mobilidade urbana, identificando as necessidades e prioridades de cada grupo acadêmico, de modo a atender suas necessidades. Para trabalhos futuros, sugere-se a análise dos modos de transportes utilizados por cada grupo, de modo a estudar a influência de variáveis específicas sobre a satisfação do usuário. Sugere-se também, a aplicação em universidades de diferentes portes, assim como em cidades com diferentes contextos urbanos.

Agradecimentos
Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processos 305384/2025-2, 141239/2025-5 e 138253/2025-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aghaabbasi, M.; M. Moeinaddini; M. Z. Shah e Z. Asadi-Shekari (2017) A new assessment model to evaluate the microscale sidewalk design factors at the neighbourhood level. *Journal of Transport & Health*, v. 5, p. 97–112.

Alomari, A. H.; T. S. Khedaywi; A. A. Jadah e A. R. O. Marian (2023) Evaluation of public transport among university commuters in rural areas. *Sustainability*.

Hair Jr., J. F.; W. C. Black e A. S. Sant'Anna (2009) *Análise multivariada de dados* (6ª ed.). Porto Alegre: Bookman.

Kamal, N. M.; Y. Jinca e S. Wunas (2020) The effect of traffic volume on noise of housing and shopping area of Manggala District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 473, n. 1, 012127.

Kim, M. K.; S. P. Kim; J. Heo e H. G. Sohn (2016) Ridership patterns at subway stations of Seoul capital area and characteristics of station influence area. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 20, n. 3, p. 964–975.

Kline, R. B. (2011) *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (3rd ed.). New York: Guilford Press.

Krizek, K. e P. Waddell (2002) Analysis of lifestyle choices: neighborhood type, travel patterns, and activity participation. *Transportation Research Record*, v. 1807, p. 119–128.

Ruiz-Padillo A., L. B. de Moraes, P. S. Rhoden e J. de Oña (2024) Analysis of the factors influencing university community satisfaction about public transport trips in small and medium-sized cities in Brazil. *Research in Transportation Business & Management* 57, 101233.

Tavares, V. B.; S. T. Lucchesi; A. M. Larranaga e H. B. B. Cybis (2021) Influence of public transport quality attributes on user satisfaction of different age cohorts. *Case Studies on Transport Policy*, v. 9, n. 3, p. 1042–1050.

Walker, J. L. e J. Li (2007) Latent lifestyle preferences and household location decisions. *Journal of Geographic Systems*, v. 9, n. 1, p. 77–101.

Welle, B.; Q. Liu; W. Li; C. Adriazola-Steil; R. King; C. Sarmiento e M. Obelheiro (2015) *Cities safer by design: guidance and examples to promote traffic safety through urban and street design.* World Resources Institute. Washington, D.C, USA.

Xu, K., H. Wang, Z. Wang e K. Mei (2024) Distribution justice and regional equity of urban public transport services: Evidence from China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 126, 104033.

Zhao, Z.; H. N. Koutsopoulos e J. Zhao (2018) Detecting pattern changes in individual travel behavior: A Bayesian approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 112, p. 73–88.

Julia Bibiana Zschitschick Souza (julia.zschitschick@acad.ufsm.br)
Paula Sandri Rhoden (paula.sandri@acad.ufsm.br)
Alejandro Ruiz Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE LOCAL A EQUIPAMENTOS PÚBLICOS URBANOS DE EDUCAÇÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO ENTRE 2010 E 2022

Gabriel Maggio de Moraes[1], **Karin Regina de Castro Marins**[1]
[1]Universidade de São Paulo

RESUMO
As condições de acesso a equipamentos públicos urbanos são fundamentais para garantia dos direitos sociais previstos na Constituição Federal Brasileira. Visando analisar parâmetros urbanos que subsidiem políticas públicas, este trabalho tem como objetivo avaliar a acessibilidade a equipamentos públicos urbanos de educação no Município de São Paulo, entre 2010 e 2022. A análise emprega métricas de acessibilidade local pelo método 2SFCA para identificar as regiões acessíveis em 15 minutos em malhas hexagonais dasimétricas. Adicionalmente, indicadores de equidade, como o Coeficiente de Gini e a Curva de Lorenz, são utilizados para avaliar a distribuição do acesso. Os resultados destacam a importância de análises urbanas para a compreensão das diferentes condições de acesso, fornecendo subsídios para a tomada de decisão estratégica pelo poder público.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conceito de acessibilidade é entendido como o potencial de acesso a oportunidades espacialmente distribuídas, podendo ser considerado um dos principais resultados do desenvolvimento espacial, sendo consequência da distribuição geográfica da oferta de transporte e de oportunidades (Páez *et al*., 2012). Vários autores mencionam a importância da identificação e qualificação da acessibilidade às atividades urbanas para avaliar a equidade e a justiça social (Bittencourt e Giannotti, 2021; Pereira *et al.*, 2019). Além do arcabouço teórico, legislações municipais regulam diretrizes de acessibilidade a equipamentos públicos urbanos, em especial os de educação, como as escolas. O Plano Diretor Estratégico de São Paulo, por exemplo, prevê tal diretriz no art. 351, orientando a sua consideração na elaboração dos Planos de Bairro (PMSP, 2023).

A acessibilidade local, conforme proposta por Geurs e Van Wee (2004), é compreendida a partir de quatro componentes: espacial, temporal, de transporte e individual. O componente espacial, também chamado de localização, diz respeito aos locais e as características das demandas e das oportunidades, que são diretamente relacionadas ao território. A oferta e a demanda são distribuídas pelas áreas urbanas e tal organização cria melhores ou piores acessos a depender dos atributos do local. O componente temporal considera que as atividades ocorrem em horários e durações específicas. Já o componente de transporte avalia a acessibilidade com base na infraestrutura e nos modos de locomoção disponíveis, pois estes fatores condicionam a velocidade e o tempo de trajeto entre a oferta e a demanda. Por fim, o componente individual está diretamente relacionado às condições socioeconômicas das pessoas. Características como renda, gênero, nível de escolaridade, dentre outras, que qualificam as condições da densidade populacional e capacidade de acesso às oportunidades.

A avaliação da acessibilidade baseada na localização é de suma relevância, posto que diz respeito diretamente ao território e estrutura das cidades. A medida mais simples é a do tipo cumulativa, na qual os indicadores dessa categoria consideram o somatório do número de oportunidades alcançadas em um determinado tempo, distância ou custo especificados (Papa *et al.*, 2015). A formulação da medida cumulativa consiste em somar todas as oportunidades dentro de um limiar de custo de viagem escolhido, e tem como principal vantagem a facilidade de interpretação. Apesar da simplicidade do indicador, bem como sua fácil compreensão, a definição arbitrária de limites e a falta de diferenciação entre as distâncias das oportunidades dentro de um mesmo limiar comprometem a sua utilização para avaliações sociais e econômicas de mudanças no uso do solo e nos transportes (Geurs e Van Wee, 2004).

Um modelo de acessibilidade mais refinado é o *two-step floating catchment area* (2SFCA), que estima a acessibilidade a oportunidades entre duas áreas dentro de um tempo de viagem, porém considerando efeitos de competição. Ele permite combinar vários tipos de informações relacionadas e resulta em análises mais precisas do comportamento real, apesar de exigir maior processamento dos dados (Neutens, 2015). Diversas aplicações recentes avaliaram áreas urbanas e a acessibilidade a equipamentos sociais a partir do método 2SFCA, destacando Rahman, Ashik e Mouli (2022) que realizam, no contexto de estudo de áreas de Desenvolvimento Orientado ao Transporte (DOT), a aplicação da acessibilidade local com impedâncias. Os autores evidenciam como as métricas de acessibilidade orientam na tomada de decisão de políticas públicas com relação à oferta de equipamentos públicos sociais e as condições de caminhabilidade das cidades.

Dada a importância em se avaliar condições de acessibilidade em áreas urbanas, este trabalho tem como objetivo avaliar a acessibilidade local a equipamentos públicos de educação no Município de São Paulo (MSP), comparando-se os resultados do ano de 2010 e 2022. Como objetivos específicos, busca-se a comparação de distritos mais e menos providos de condições de acesso, bem como a avaliação de indicadores de desigualdade como o índice de Gini e a Curva de Lorenz.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método proposto consiste na avaliação da acessibilidade a pé a equipamentos urbanos públicos de educação com base na localização por meio do método 2SFCA. Para isso, é utilizado o pacote de R chamado "r5r" para realizar, de maneira eficiente, análises de roteamento em redes de transporte do modo a pé. Desenvolvido por Pereira *et al.* (2021), o pacote apresenta uma interface simples e permite calcular matrizes de tempo de viagem usando computação em paralelo via Interface de Programação de Aplicação (API) conectada ao *OpenStreetMap* (OSM). Para tal análise, são calculados os tempos de viagem em até 15 minutos – tempo de caminhada próximo aos raios teóricos definidos na literatura (Moreno, 2021). Da posse da matriz dos tempos de viagens, utiliza-se o pacote "accessibility" para cálculo da acessibilidade local pelo método 2SFCA.

Dado o foco do método em avaliar áreas urbanas, considerou-se como área de estudo apenas aquela delimitada pela mancha urbana, obtida a partir da Coleção da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil produzidas pela MapBiomas. Da posse da área definida, executa-se uma malha hexagonal de 500 m, que utiliza os princípios do *Modifiable Areal Unit Problem* (MAUP) e auxilia na padronização para o tratamento de áreas de diferentes formas e tamanhos (Pereira *et al.*, 2019), como acontece com os limites administrativos intraurbanos brasileiros, como subprefeituras e distritos. Associado a cada hexágono, atribui-se por operações espaciais a quantidade de oportunidades e a demanda de cada polígono. Dado o foco do estudo em avaliar o acesso educacional, as oportunidades compreendem as matrículas escolares dos níveis infantil, fundamental I e fundamental II, obtidas com base no censo da educação básica (INEP, 2010; 2022). Já as demandas são avaliadas pela população em idade escolar, respectivamente de cada nível de ensino, obtida pela interpolação dos resultados dos setores censitários (IBGE, 2010; 2023) e da malha definida.

No estudo, a comparação entre os resultados dos diferentes anos é feita pelo teste de hipótese de comparação de médias entre os anos de 2010 e 2022 para cada rede de ensino, de modo a identificar se houve variações estatisticamente significativas nos valores de acessibilidade. Inicialmente, são removidos os outliers em cada grupo para evitar distorções. Em seguida, testou-se a normalidade das amostras utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Caso as amostras apresentem distribuição normal, aplica-se o t-teste de Welch; caso contrário, utiliza-se o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Os parâmetros de entrada foram os valores de acessibilidade para cada amostra (Infantil, Fundamental I e Fundamental II) nos anos avaliados. Por fim, o método propõe a quantificação das condições de equidade e desigualdade presentes na acessibilidade a equipamentos de educação. São calculados indicadores como o Coeficiente de Gini e a Curva de Lorenz, que representa a distribuição acumulada da população em função do nível de acessibilidade acumulada, permitindo visualizar o grau de desigualdade socioeconômica relativamente à acessibilidade considerada. Tais indicadores consistem em ferramentas representativas e bastante utilizadas em estudos de acessos baseados em localização (Tomasiello e Giannotti, 2023; Bittencourt e Giannotti, 2021; Pereira *et al.*, 2019). A Figura 1 apresenta um esquema resumido das etapas do processamento proposto para análise da acessibilidade baseada na localização dos equipamentos de educação.

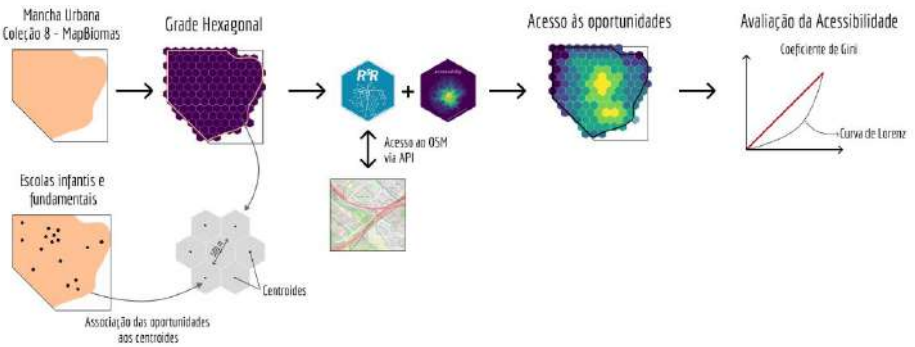


Figura 1: Fluxo geral do procedimento proposto para avaliação da acessibilidade

2.1. Estudo de caso

Visando aplicar o método de análise descrito, realizou-se um estudo de caso cujo escopo territorial abrange o município de São Paulo. O município é considerado o maior do Brasil em termos populacionais, contando com 11,4 milhões de pessoas e densidade populacional igual a 7,5 mil hab/km² (IBGE, 2023). Ainda que a densidade tenha aumentado em relação a 2010, quando era de aproximadamente 7,38 hab/ha, há de se ressaltar que entre 2010 e 2022, 46 dos 96 distritos de São Paulo perderam população. As áreas de redução populacional se concentram no centro expandido e em partes do norte e leste, enquanto os maiores crescimentos ocorrem no sul e extremo oeste da capital. Além disso, as taxas de crescimento reduziram, indicando uma mudança da pirâmide etária, cuja base estreitou-se, representando uma menor presença de pessoas com até 15 anos na composição demográfica municipal.

Quanto aos equipamentos de educação no município de São Paulo, estes são ofertados por diferentes esferas administrativas (municipal, estadual e federal), sendo predominantes no ensino infantil e no ensino fundamental as escolas municipais. A rede conta com 958 escolas públicas infantis, 1583 escolas públicas de ensino fundamental e 5 escolas que atendem simultaneamente ambas as redes. A rede de educação ainda é complementada pelas escolas de dependência privada, que somam 2941 de rede infantil, 271 de ensino fundamental e 1114 de mais de um nível de ensino, englobando infantil e fundamental (PMSP, 2025).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação de acessibilidade urbana baseada na localização é apresentada para o acesso às oportunidades em 15 minutos, considerando o modo a pé. Dado que o cálculo da acessibilidade considera a rede viária e a quantidade de matrículas escolares, melhores acessos serão previstos em áreas que combinem o maior número de equipamentos junto à melhor conectividade da malha urbana. Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os mapas com os resultados do cálculo da acessibilidade urbana por nível de ensino para o ano de 2010 e 2022.

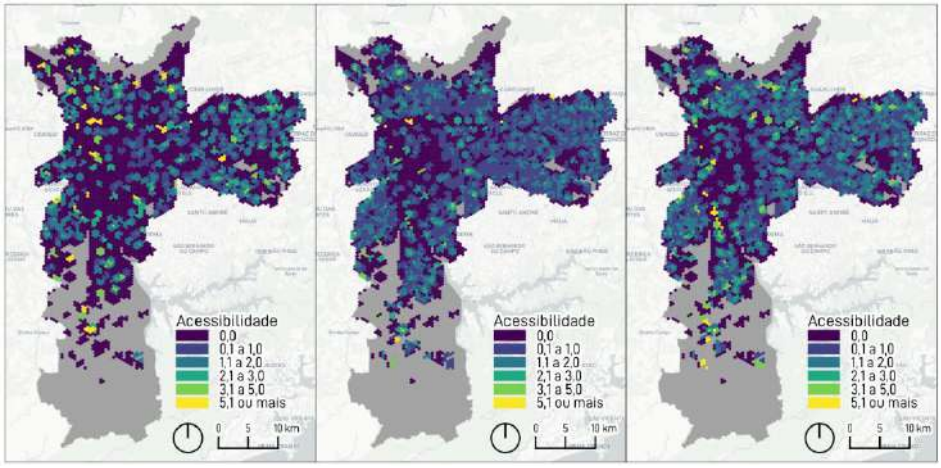


Figura 2: Acessibilidade para ensino infantil (direita), fundamental I (centro) e fundamental II (esquerda) – 2010

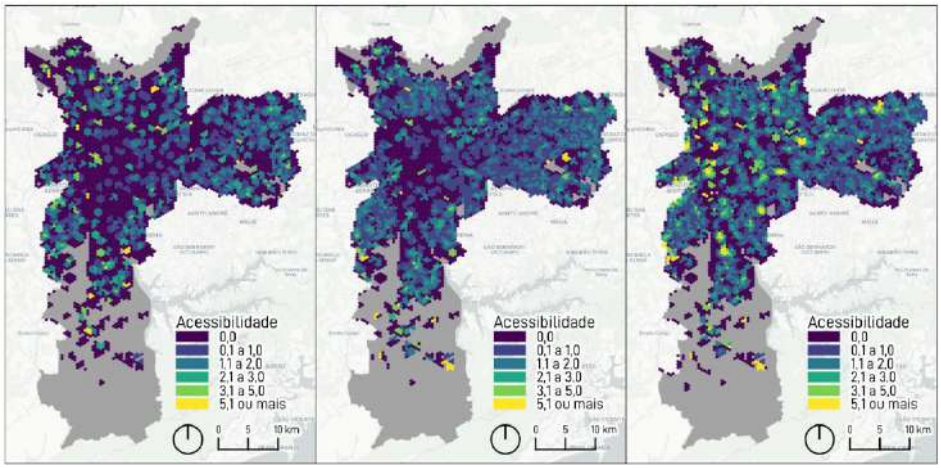


Figura 3: Acessibilidade para ensino infantil (direita), fundamental I (centro) e fundamental II (esquerda) – 2022

As áreas mais acessíveis, ou com mais oportunidades em equipamentos de educação em até 15 minutos, são os distritos na região do Campo Limpo, Capão Redondo e Itaim Paulista. Um dos motivos que levam ao acesso em tais locais ser mais elevado em comparação ao restante do MSP é o número de escolas públicas, que é maior em tais regiões. Em contraste, tanto as franjas urbanas na divisão com os territórios rurais, quanto a porção central, em direção ao quadrante sudoeste, nota-se um maior vazio de acesso em ambos os limiares avaliados. Na região sudoeste de São Paulo, observa-se baixa acessibilidade às redes de ensino em todas as etapas avaliadas, apesar de ser uma área com alta densidade populacional de alta renda, infraestrutura viária e oferta de cultura e lazer. Como discutido por Villaça (1998), essa região concentrou investimentos públicos e privados e se consolidou como um dos centros econômicos da cidade. Assim, é provável que a demanda por educação nessa área seja majoritariamente atendida pela rede privada.

Visando comparar as distribuições entre o ano de 2010 e 2022 são realizados testes de hipótese. Os resultados foram avaliados à luz do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney e indicaram que não houve variação estatisticamente significativa na acessibilidade para o Ensino Infantil ($p - value \cong 2{,}23 \times 10^{-1}$), enquanto houve variação significativa para o Ensino Fundamental I ($p - value \cong 3{,}49 \times 10^{-4}$) e para o Ensino Fundamental II ($p - value \cong 8{,}09 \times 10^{-9}$). Esses resultados sugerem estabilidade na acessibilidade para a etapa Infantil, mas mudanças relevantes nos padrões de acessibilidade para os níveis do Ensino Fundamental no período entre 2010 e 2022, sinalizando possíveis alterações na oferta pública ou influência da mudança demográfica no período. Há de se ressaltar que a população em idade escolar sofreu uma redução considerável, como se observam nos dados de pirâmide etária divulgados pelo censo (IBGE, 2010; 2023). Para avaliar as condições gerais de equidade do Município de São Paulo, são avaliados o Coeficiente de Gini e a Curva de Lorenz. A distribuição dos valores de acessibilidade por nível de ensino é apresentada na Figura 4 e os parâmetros relacionados às condições de equidade são apresentados na Figura 5.

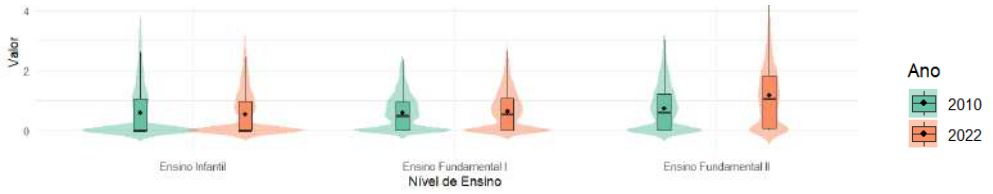


Figura 4: Distribuição dos valores de acessibilidade às escolas em 15 minutos

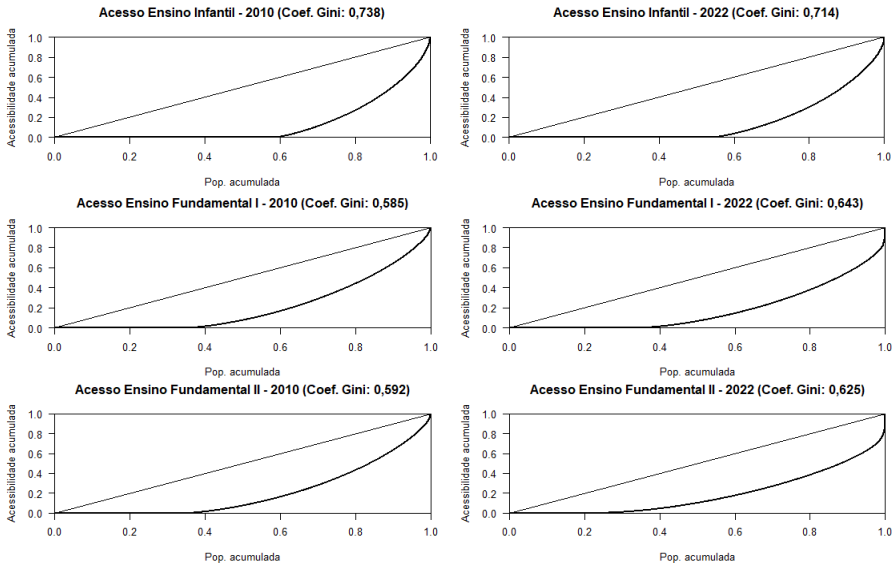


Figura 5: Curva de Lorenz e Coeficiente de Gini por ano e nível de ensino

Nota-se que as curvas presentes na Figura 5 apresentam grande desvio da linha de igualdade perfeita, o que representa o desigual acesso às escolas no MSP. De maneira complementar, é apresentando o Coeficiente de Gini, cuja medida numérica resume a desigualdade representada pela Curva de Lorenz em um único valor. No acesso em até 15 minutos, os coeficientes de Gini para os seis casos analisados mostram-se elevados, ainda que tendam a diminuir à medida que aumenta o nível de ensino avaliado. Ainda assim, para as situações

avaliadas o valor fica acima de 0,500, indicando que o acesso às oportunidades em tempos adequados de caminhada em até 15 minutos é realizado por pouco mais da metade da população, enquanto os demais estudantes encontram-se em regiões inacessíveis no limiar de tempo proposto. Adicionalmente, recomenda-se avaliações complementares na escala local e com recortes sociais, como raça ou renda, que permitem investigar as condições de equidade entre os diferentes grupos, como apontado por Tomasiello e Giannotti (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo encontrou estabilidade na acessibilidade da educação infantil, mas evidenciou alterações nos padrões para o ensino fundamental no período de 2010 a 2022, cujas variações podem ser atribuídas a mudanças na oferta pública ou a fatores demográficos. A análise mostra que a maior parte dos distritos possui acesso a pé a alguma escola em até 15 minutos, cobrindo os níveis de ensino avaliados. Contudo, o Coeficiente de Gini, que ultrapassa 0,5, revela uma distribuição desigual desse acesso. Regiões localizadas nas bordas da mancha urbana, em particular, apresentam poucas ou nenhuma oportunidade, demonstrando as disparidades territoriais. O mesmo padrão aparece na região do quadrante sudoeste do município de São Paulo: embora a região seja bem servida por equipamentos de lazer e cultura, permanece uma quantidade insuficiente de equipamentos públicos de educação. Esses resultados permitem subsidiar a tomada de decisão em políticas educacionais, indicando possíveis déficits na oferta de equipamentos e análises críticas das potencialidades de desenvolvimento local na microescala urbana, especialmente no planejamento de bairros.

Agradecimentos

À FAPESP pelo financiamento e incentivo à pesquisa (Processo 2023/10015-7).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bittencourt, T. A.; M. Giannotti (2021) The unequal impacts of time, cost and transfer accessibility on cities, classes and races. *Cities*, v. 116, p. 103257, 2021.

Geurs, K. T.; B. Van Wee (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport geography*, v. 12(2), 127-140.

IBGE (2010) *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBGE (2023) *Censo Brasileiro de 2022*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Inep (2010) *Censo da educação básica 2010*. Brasília: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira.

Inep (2022) *Censo da educação básica 2022*. Brasília: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira.

Neutens, T. (2015) Accessibility, equity and health care: review and research directions for transport geographers. *Journal of Transport Geography*, v. 43, p. 14-27.

Páez, A.; D. M. Scott; C. Morency. (2012) Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. *Journal of Transport Geography*, v. 25, p. 141-153.

Papa, E.; C. Silva; M. Brömmelstroet; A. Hull (2015) Accessibility instruments for planning practice: a review of European experiences. *Journal of Transport and Land Use*, v. 9, n. 3, p. 57–75.

Pereira, R. H. M.; D. Banister; T. Schwanen; N. Wessel (2019) Distributional effects of transport policies on inequalities in access to opportunities in Rio de Janeiro. *Journal of Transport and Land Use*, v. 12, n. 1, p. 741-764.

Pereira, R. H. M.; M. Saraiva; D. Herszenhut; C. K. V. Braga; M.W. Conway (2021) *r5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R5 in R.* Transport Findings, 21262. https://doi.org/10.32866/001c.21262.

PMSP (2023) Lei N° 17.975/2023, de 8 de julho de 2023. *Dispõe sobre a revisão intermediária do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo, aprovado pela Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014, nos termos da previsão de seu art. 4º*. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo.

PMSP (2025) *Sistema de Consulta do Mapa Digital da Cidade de São Paulo*. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo. Disponível em: https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/ (acesso em 01 de jun. de 2025).

Rahman, M. H; F. R. Ashik; M. J. Mouli (2022) Investigating spatial accessibility to urban facility outcome of transit-oriented development in Dhaka. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 14, p. 100607.

Tomasiello, D. B.; M. Giannotti (2023) Unfolding time, race and class inequalities to access leisure. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 50, n. 4, p. 927-941.

Villaça, F. (1998) *Espaço intra-urbano no Brasil*. São Paulo: Studio Nobel, p. 392.

Gabriel Maggio de Moraes (gabriel.maggio@usp.br)
Karin Regina de Castro Marins (karin.marins@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Construção Civil, Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 nº. 83. Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil) – São Paulo, Brasil.

ANÁLISE DA CAMINHABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO DA ÁREA HOSPITALAR DE BELO HORIZONTE (MINAS GERAIS, BRASIL)

Erik Fillipy de Oliveira[1], Natália Machado Vieira[1], Eloisa Lima Borges[1], Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos[1], Leandro Cardoso[1], Daniela Antunes Lessa[2], Júlia Hubner Oliveira[3], Nayane Leocádio Conde de Souza[3]

[1] Universidade Federal de Minas Gerais, [2] Universidade Federal de Ouro Preto, [3] Empresa de Transporte e Trânsito de Belo Horizonte

RESUMO

A mobilidade ativa e acessível em contextos urbanos representa um desafio central para o planejamento das cidades, especialmente em áreas com alta circulação de pessoas em situação de vulnerabilidade funcional, como idosos, pessoas com deficiência e em reabilitação. Este estudo analisa a caminhabilidade na Área Hospitalar de Belo Horizonte (MG), território que concentra equipamentos de saúde e fluxo intenso de pedestres com distintas limitações de mobilidade. Para isso, aplicou-se o Índice de Caminhabilidade proposto por Freitas (2023), composto por 27 indicadores organizados em 8 categorias. A análise, realizada em 41 segmentos, fez-se o uso de ferramentas de georreferenciamento e observação sistemática. Os resultados revelaram nota média de 62 pontos, com melhor desempenho nas categorias conforto, segurança pública e uso do solo, e avaliação negativa para segurança viária. A coexistência de qualidades urbanas e barreiras à acessibilidade evidencia um ambiente ambíguo, reforçando a necessidade de políticas públicas orientadas ao desenho universal.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, a mobilidade urbana brasileira tem se estruturado com base em um modelo centrado no transporte motorizado individual, em detrimento dos deslocamentos a pé. Essa lógica de desenvolvimento urbano, fortemente influenciada por princípios modernistas, fomentou o espraiamento das cidades e o alargamento das vias, consolidando um ambiente hostil à circulação de pedestres (Jacobs, 2011). Como consequência, a infraestrutura voltada à mobilidade ativa tornou-se precária, fragmentada e, por vezes, inexistente, comprometendo o direito à cidade e à promoção da acessibilidade universal (Gehl, 2015). Essa precariedade afeta especialmente os grupos populacionais em situação de vulnerabilidade funcional, como pessoas idosas, pessoas com deficiência e aquelas com mobilidade reduzida temporária ou permanente (Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento - ITDP Brasil, 2018). As especificidades funcionais associadas ao envelhecimento e às deficiências — sejam motoras, sensoriais ou cognitivas — reforçam a urgência de espaços inclusivos e acessíveis. Essa diretriz está em consonância com os princípios do Guia Global Cidade Amiga das Pessoas Idosas, publicado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2007), que destaca a importância de ambientes urbanos acessíveis, seguros e integrados para garantir a participação plena das pessoas idosas na vida comunitária. Contudo, esses elementos seguem frequentemente negligenciados na gestão das cidades brasileiras.

Apesar de avanços normativos, como o Estatuto da Pessoa com Deficiência (Lei nº 13.146/2015, atualizado pela Lei nº 14.863/2024) e o Estatuto da Pessoa Idosa (Lei nº 10.741/2003, atualizado pela Lei nº 14.423/2022), o espaço urbano ainda apresenta lacunas significativas em termos de acessibilidade (Brasil, 2003; Brasil, 2022). Segundo o Censo Demográfico de 2022, aproximadamente 18,6 milhões de brasileiros declararam ter algum tipo de deficiência, o que corresponde a cerca de 8,9% da população (IBGE, 2022). Paralelamente, 15,6% da população nacional já tem 60 anos ou mais, representando um crescimento de 56% em relação a 2010 — uma tendência que deve se acentuar, conforme projeções que estimam que 16% da população mundial será idosa até 2050, publicado pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2023). Essas estatísticas ganham ainda mais relevância em contextos urbanos com grande circulação de pessoas em condições de saúde vulnerável, como é o caso da Área Hospitalar de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais. Um complexo assistencial, atraindo diariamente um volume expressivo de pedestres, muitos dos quais com limitações temporárias ou permanentes de mobilidade (Borges *et al*., 2024). Diante da intensa circulação de pessoas em situação de vulnerabilidade funcional, torna-se relevante investigar se as condições da infraestrutura pedonal local atendem adequadamente às demandas de acessibilidade e segurança.

Nos últimos anos, esse conceito tem sido explorado em diferentes estudos realizados na capital mineira, sob múltiplas perspectivas. As abordagens iniciais foram desenvolvidas por Carvalho (2018) e Barros (2018), que estabeleceram as bases metodológicas para a avaliação da caminhabilidade em áreas urbanas. Posteriormente, Barros (2021) aprofundou essa discussão ao analisar a caminhabilidade sob a ótica de crianças, evidenciando

os desafios enfrentados por esse grupo etário. Dando continuidade, Freitas (2023) também focou nesse grupo etário e propôs uma reformulação metodológica do índice anteriormente utilizado, resultando em um instrumento analítico mais robusto, capaz de integrar variáveis técnicas e dimensões sensíveis às especificidades territoriais.

Vale destacar o estudo de Borges *et al.* (2024), desenvolvido com base nas contribuições de Gualberto e Barbosa (2016) e Gualberto *et al*. (2017), que teve como foco a análise dos tempos semafóricos na Área Hospitalar de Belo Horizonte. A pesquisa avaliou a duração do tempo verde em travessias sinalizadas e identificou que, em determinados pontos, os intervalos destinados à travessia de pedestres não estavam adequados à velocidade de caminhamento de pessoas com mobilidade reduzida. Isso porque, verificou-se a incompatibilidade com a velocidade de 0,4 m/s - parâmetro mínimo recomendado pela norma técnica NBR 9050:2020 para o dimensionamento de travessias acessíveis (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2020). Essa inadequação pode comprometer a segurança de pedestres em situação de maior vulnerabilidade, como pessoas idosas, com deficiência física ou em processo de reabilitação (Borges *et al*., 2024). Apesar de sua contribuição relevante para a discussão, o estudo apresentou uma abordagem pontual, centrada na análise dos tempos semafóricos, sem considerar outros aspectos fundamentais da infraestrutura pedonal.

Dessa forma, evidencia-se a necessidade de aprofundar o diagnóstico da caminhabilidade na Área Hospitalar por meio de uma abordagem mais abrangente, que leve em conta a continuidade das calçadas, a acessibilidade do mobiliário urbano, a sinalização e os obstáculos presentes no percurso. Com esse propósito, este artigo propõe a aplicação do Índice de Caminhabilidade desenvolvido por Freitas (2023), a fim de preencher essa lacuna analítica. Ao identificar os fatores que comprometem o deslocamento seguro e autônomo de pedestres com diferentes graus de limitação funcional, a pesquisa busca contribuir para a (re)construção de ambientes urbanos inclusivos, resilientes e alinhados aos princípios da equidade e do direito à cidade.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação da caminhabilidade com foco em pedestres em situação de vulnerabilidade funcional, a análise concentrou-se na Área Hospitalar de Belo Horizonte (MG), no bairro Santa Efigênia. Essa região, marcada por intensa circulação diária de idosos, pacientes em reabilitação e acompanhantes, destaca-se por concentrar importantes hospitais e unidades de saúde, como o Hospital das Clínicas da UFMG, Santa Casa de Misericórdia, Hospital João XXIII, Maternidade Odete Valadares, Hospital Infantil João Paulo II, Hospital São Lucas e Hospital Governador Israel Pinheiro (Morais, 2019). Foram definidos 41 segmentos pedonais, correspondentes às principais rotas entre os hospitais e as paradas do BRT-MOVE e a estação Santa Efigênia do metrô, por serem os principais pontos de acesso ao transporte público. Essa delimitação priorizou trajetos de uso cotidiano por usuários, tornando a análise mais pertinente para fins de planejamento urbano inclusivo.

Considerando essas características e a complexidade do público atendido, optou-se por uma ferramenta metodológica desenvolvida por Freitas (2023), a qual contempla 27 indicadores distribuídos em 8 categorias distintas (Tabela 1). Para a presente aplicação, os indicadores relacionados à atratividade visual, permeabilidade visual e uso misto do solo foram desconsiderados somente nos segmentos de 14 a 17, 19, 20 e de 23 a 28, por serem segmentos localizados em praças. Ressalta-se que a atribuição das notas foi realizada conforme os critérios definidos por cada indicador estabelecido. Para a coleta, representação espacial e sistematização dos dados, foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento (QGIS, Google Earth, Google Street View). Esses recursos permitiram a visualização, a mensuração e a análise georreferenciada dos elementos observados em campo.

Tabela 1: Categorias e indicadores do Índice de caminhabilidade.

Categoria	Indicadores	Categoria	Indicadores
Conforto	Bancos para sentar Proteção contra intempéries Bancos para sentar	Interseção	Acesso à travessia Número de ruas na interseção Sinalização na interseção
Acessibilidade	Largura efetiva do passeio Conservação do pavimento	Estética	Atratividade visual Permeabilidade visual

	Desníveis na calçada Sinalização tátil Topografia do trecho		Arborização Limpeza Poluição sonora
Segurança pública	Iluminação Presença de pedestres (seguridade)	Uso do solo	Uso misto do solo Parques e áreas verdes a uma distância caminhável
Segurança viária	Velocidade dos veículos Largura do leito carroçável Barreiras de proteção (buffers) Possibilidade de conflito entre pedestres e veículos na calçada	Conectividade	Tamanho do quarteirão Acesso ao transporte público Infraestrutura cicloviária

Fonte: Freitas (2023).

Para se obter a nota do índice, foi necessária a normatização das avaliações atribuídas a cada indicador, de modo a ajustá-las a um mesmo padrão de variação (conforme Equação 1). Após o cálculo da nota normalizada para cada indicador, procedeu-se à ponderação por categorias de avaliação, utilizando uma escala de 0 a 100 pontos. Os valores correspondem entre 0 a 20,99 (Péssimo), 21 a 40,99 (Ruim), 41 a 60,99 (Regular), 61 a 80,99 (Bom) e 81 a 100 (Ótimo).

$$X_i = \frac{(R_i - R_{min})}{(R_{máx} - R_{min})} \times IN \quad (1)$$

Onde: X_i: valor normalizado; R_i: valor da variável a ser normalizada; R_{min}: valor mínimo da variável; $R_{máx}$: valor máximo da variável e IN: intervalo normalizado.

3. RESULTADOS

A aplicação do Índice de Caminhabilidade na Área Hospitalar de Belo Horizonte permitiu identificar o desempenho geral da infraestrutura pedonal com base em 41 segmentos analisados (Figura 1). A nota média obtida foi de 62 pontos, o que corresponde à classificação “Bom”, segundo a escala definida por Freitas (2023). Dos segmentos avaliados, 20 (49%) foram classificados como “Bom”, enquanto 21 (51%) receberam a classificação “Regular”. Não foram identificados segmentos com classificação “Ótimo”, “Ruim” ou “Péssimo”. Esse panorama evidencia que, embora a região apresente um nível mínimo aceitável de qualidade para o deslocamento a pé, persistem fragilidades importantes, sobretudo para pedestres em situação de maior vulnerabilidade funcional. Em áreas com elevada circulação de pessoas idosas, pacientes em reabilitação e acompanhantes, como é o caso da Área Hospitalar, garantir condições adequadas de caminhabilidade é uma exigência ética e normativa. Segundo a NBR 9050:2020 (ABNT, 2020) e diretrizes da OPAS (2023), a infraestrutura urbana deve possibilitar o deslocamento autônomo e seguro de todos os cidadãos.

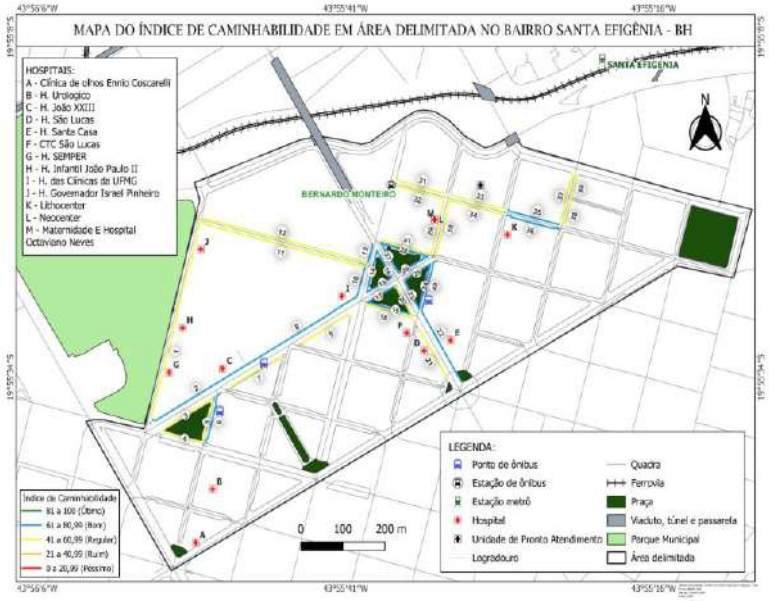


Figura 1: Classificação das avaliações.

Observa-se que as categorias “Conforto” (75 pontos), “Segurança Pública” (73 pontos) e “Uso do Solo” (69 pontos) apresentaram os melhores desempenhos, sendo classificadas como “Boas”. Esse resultado indica a presença de elementos urbanos favoráveis ao pedestre, como bancos para descanso, iluminação pública e acesso próximo à áreas verdes. Segundo Gehl (2015), tais atributos contribuem para a vitalidade urbana e para a permanência de pessoas nos espaços públicos. Em contrapartida, “Segurança Viária” (41 pontos) foi a única categoria avaliada como “Ruim”. Essa classificação reflete a presença de vias com três, ou mais faixas de rolamento, ausência de barreiras de proteção e velocidades incompatíveis com o deslocamento seguro de pessoas vulneráveis. Essa constatação vai ao encontro dos resultados de Borges *et al*. (2024), que indicam a inadequação dos tempos semafóricos à velocidade recomendada de 0,4 m/s (parâmetro da NBR 9050:2020), tornando a travessia insegura para as pessoas idosas ou com deficiência. De forma semelhante, o ITDP Brasil (2018) já havia apontado a segurança viária como um dos pilares estruturantes da caminhabilidade em contextos urbanos inclusivos. As demais categorias: “Interseções”, “Acessibilidade”, “Estética” e “Conectividade”, obtiveram classificação “Regular”, demonstrando desempenho mediano.

Ao analisar individualmente os 27 indicadores, verifica-se que 5 foram classificados como “Péssimos”: “sinalização tátil”, “infraestrutura cicloviária”, “velocidade dos veículos”, “uso misto do solo” e “acesso à travessia”. Esses elementos refletem a negligência quanto à acessibilidade universal e ao desenho de um ambiente seguro e inclusivo (Figura 2A, 2B). Tendo em vista o uso prioritário de equipamentos hospitalares, a categoria Uso do solo obteve nota baixa (17 pontos) por não haver diversificação. Outros 6 indicadores foram avaliados como “Ruins”, entre eles: “largura do leito carroçável”, “poluição sonora” e “sinalização na interseção”. Esses resultados evidenciam a persistência de uma lógica viária centrada no automóvel, em detrimento da mobilidade ativa. Como aponta Barros (2021), tal configuração urbana desconsidera as especificidades de grupos vulneráveis, limitando sua autonomia e segurança nos deslocamentos cotidianos.



Figura 2: Calçada com pavimentação comprometida (Segmento 5) (A); Piso tátil fora das normas (Segmento 8) (B).

Por outro lado, alguns indicadores apresentaram desempenho “excelente”, com destaque para “Iluminação da via”, “Presença de pedestres”, “Parques e áreas verdes a uma distância caminhável” e “Acesso ao transporte coletivo”, todos classificados como “Ótimos”. Esses resultados indicam que, apesar das fragilidades estruturais, a área ainda possui atributos urbanos importantes que favorecem o deslocamento a pé, como vitalidade urbana e a acessibilidade ao transporte público, conforme discutido por Jacobs (2011). A presença de pedestres e a boa conexão com espaços e equipamentos urbanos essenciais contribuem para uma paisagem ativa e segura, que incentiva a permanência e reforça o sentimento de pertencimento.

Nesse sentido, ainda que a infraestrutura da região apresente elementos pontuais de qualidade, ela não configura um ambiente plenamente acessível. De forma geral, os resultados evidenciam uma ambiguidade estrutural: a região oferece condições mínimas de conforto e acesso, mas falha em garantir segurança e acessibilidade plenas para os públicos mais vulneráveis. Assim como aponta Harvey (2012), essa tensão revela um ambiente urbano que, embora convidativo, perpetua exclusões concretas ao desconsiderar as necessidades e as condições específicas para se deslocar com autonomia. Para além do diagnóstico, os resultados reforçam a urgência de políticas públicas orientadas à equidade, acessibilidade e à promoção do direito à cidade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da caminhabilidade na Área Hospitalar de Belo Horizonte evidencia a complexidade dos desafios enfrentados por pedestres em contextos urbanos com alta demanda por acessibilidade. Apesar de a média do índice indicar um desempenho “Bom”, os resultados revelam fragilidades estruturais importantes, especialmente no que diz respeito à segurança viária e à acessibilidade. Persistem barreiras significativas à mobilidade autônoma, como a ausência de sinalização tátil, ausência de semáforos sonoros e velocidades veiculares incompatíveis com a travessia segura. Essa ambiguidade estrutural demonstra que a infraestrutura

atual ainda não atende plenamente às diretrizes de marcos legais como o Estatuto da Pessoa com Deficiência (Brasil, 2015) e às recomendações do Guia Cidade Amiga da Pessoa Idosa (OPAS, 2023). Reconhece-se que a aplicação de índices contribui significativamente para o diagnóstico das condições de mobilidade ativa, auxiliando na identificação de fragilidades e potencialidades nos espaços observados. Destaca-se, ainda, a importância de expandir essas análises para outras áreas urbanas e regiões periféricas que possam promover ambientes revitalizados e acessíveis. O alinhamento entre a produção científica e as políticas públicas é fundamental para fomentar o diálogo sobre cidades justas sob a ótica dos pedestres, a promover a qualidade de vida e bem-estar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020) NBR 9050: acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT.

Barros, R. M. (2018) Caminhabilidade em grandes centros urbanos: uma proposta metodológica para o município de Belo Horizonte (Minas Gerais). Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Barros, R. M. (2021) A infância e o pedestrianismo: um estudo exploratório da percepção de crianças sobre indicadores de caminhabilidade. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Borges, E. L. *et al*. (2024) Análise das velocidades de travessia seguindo as especificidades das pessoas idosas: um estudo de caso para Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil). In: Anais do 10º Congresso PLURIS (Guimarães, PT). Guimarães: [s.n.].

Brasil (2003) Ministério da Mulher, da Família e dos Direitos Humanos. Estatuto da Pessoa Idosa. Brasília.

Brasil (2015) Senado Federal. Estatuto da Pessoa com Deficiência. Brasília.

Carvalho, I. R. (2018) Caminhabilidade como instrumento de mobilidade urbana: um estudo de caso em Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Freitas, A. P. O. (2023) Ciência cidadã e requalificação do espaço urbano: redescobrindo a caminhabilidade sob a ótica infanto-juvenil. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Gehl, J. (2015) Cidades para pessoas (3ª ed.). Tradução de Anita Di Marco. São Paulo: Perspectiva.

Gualberto, F.; Barbosa, H. M. (2016) Estudo dos fatores que influenciam o comportamento de pedestres em travessias de vias urbanas. Anais do XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, ANPET, Ouro Preto.

Gualberto, F. *et al*. (2017) Velocidade de pedestres em área hospitalar – um estudo exploratório. In: Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET (Recife, PE). Recife: ANPET, p. [número de páginas não informado].

Harvey, D (2012) O direito à cidade. Lutas sociais, n 29: 73-89.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) Prévia do censo demográfico 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ITDP Brasil - Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (2018) Índice de Caminhabilidade Versão 2.2 – Ferramenta. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2019/05/Caminhabilidade_Volume-3_Ferramenta-ALTA.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2024.

Jacobs, J. (2011) Morte e vida de grandes cidades. São Paulo: Martins Fontes.

Morais, R. (2019) Projeto Circunvizinhança resgata história do bairro Santa Efigênia. Notícias Externas da UFMG, Belo Horizonte, 26 abr. Disponível em: https://ufmg.br/comunicacao/noticias/projeto-circunvizinhanca-resgata-historia-do-bairro-santa-efigenia. Acesso em: 23 jun. 2025.

OMS – Organização Mundial da Saúde (2007) Guia global das cidades amigas das pessoas idosas. Genebra: OMS.

OPAS – Organização Pan-Americana da Saúde (2023) Guia dos programas nacionais de cidades e comunidades amigas das pessoas idosas. Organização Mundial da Saúde. Washington, D.C.

Erik Fillipy de Oliveira (erikfillipy.ufmg@gmail.com)
Natália Machado Vieira (nataliamv@ufmg.br)
Eloisa Lima Borges (eloisalibor@gmail.com)
Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos (ana.santos5@aluno.ufop.edu.br)
Leandro Cardoso (leandro@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil
Daniela Antunes Lessa (daniela.lessa@ufop.edu.br)
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil
Júlia Hubner Oliveira (julia.hubner@edu.pbh.gov.br)
Nayane Leocádio Conde de Souza (nayanelcs@edu.pbh.gov.br)
Empresa de Transporte e Trânsito de Belo Horizonte S.A. (BHTRANS) - Av Engenheiro Carlos Goulart, 900 - Estoril - Belo Horizonte, MG, Brasil

ANÁLISE DA MATURIDADE DE INICIATIVAS PARA A INTEGRAÇÃO DA MOBILIDADE COMO UM SERVIÇO (MAAS)

Marianna Lucinda de Oliveira[1], **Mariana Aparecida Rodrigues**[1], **Érica Aline Ferreira Silva Yamamoto**[1], **Josiane Palma Lima**[1]
[1] Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

RESUMO
O objetivo deste trabalho é analisar os níveis de maturidade das iniciativas de Integração condizentes com a MaaS. A Integração é um dos pilares de um modelo de avaliação que considera Acesso, Integração e Governança. Foi realizada uma pesquisa exploratória, utilizando a escala CMMI (*Capability Maturity Model Integration*), com um diagnóstico no município de São Paulo, SP. A análise indicou que a iniciativa Inovações tecnológicas encontra-se no nível 1 de maturidade, com projetos ainda em desenvolvimento. Por outro lado, as iniciativas Terminais multimodais, Interfaces digitais integrativas, Compartilhamento de dados e informações e Contribuições no Plano de Mobilidade Urbana atingiram o nível 2 de maturidade, por apresentarem práticas já estabelecidas e regulamentadas, avançando numa futura aplicação de MaaS. O estudo contribui para as dificuldades de implementar e efetivar um sistema de MaaS no contexto brasileiro e oferece subsídios para a formulação de estratégias e políticas de mobilidade urbana integradas.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Mobilidade como um serviço (MaaS) tem o propósito de oferecer serviços de mobilidade contínua e de porta em porta, adaptados às necessidades individuais dos viajantes, por meio do compartilhamento e da integração multimodal (Basu; Ferreira, 2021). Este conceito é inovador ao fornecer uma proposta de valor abrangente de pacotes de assinatura mensal ou por viagem (Caballini *et al.,* 2022). O intuito é priorizar a diminuição do uso de automóveis particulares para as atividades urbanas diárias (Audouin; Finger, 2018).

A MaaS é discutida por políticas públicas, setor de transporte e academia como uma solução para promover a mobilidade sustentável (Servou; Behrendt; Horst, 2023). Seu uso crescente pode contribuir para reduzir congestionamentos, demanda por estacionamento, acidentes, poluição, além de promover acessibilidade, inclusão social e eficiência energética (Rey-Moreno; Periáñez-Cristóbal; Calvo-Mora, 2023). No entanto, dada sua natureza complexa e multidimensional, a MaaS apresenta diferentes níveis de integração, ainda que nem todos os atores estejam envolvidos, sendo que um esquema mínimo deve reunir ao menos dois modos de transporte em uma interface digital única, com funções de planejamento, reserva, pagamento e emissão de bilhetes (Alyavina; Nikitas; Njoya, 2022).

Para que a MaaS atinja seus objetivos e altos níveis de integração, é essencial que sua implementação seja ajustada às características específicas do local, considerando o nível de maturidade da cidade em termos de multimodalidade, infraestrutura, regulamentações, e a disposição dos usuários para utilizar e pagar pelos serviços (Caballini *et al.*, 2022). Assim, a avaliação da preparação para a MaaS desempenha um papel fundamental para sua adaptação e sucesso, refletindo a capacidade local de integrar e gerenciar soluções de mobilidade de forma eficaz (Aba; Esztergár-Kiss, 2024).

Em relação aos fatores operacionais, foram identificados alguns trabalhos que avaliaram a maturidade da MaaS, mas há a limitação quanto a identificação de critérios direcionados ao cumprimento dos objetivos de sustentabilidade (Aba; Esztergár-Kiss, 2024; Corazza; Carassiti, 2021). Com isso, aborda-se uma lacuna de pesquisa, que é considerar a maturidade de um contexto em preparação para a MaaS, verificando requisitos operacionais e para sua manutenção a longo prazo. Para avaliar a maturidade da MaaS considera-se três pilares, sendo: Acesso, Integração e Governança. O foco deste estudo é o pilar de Integração, que aborda os recursos que viabilizam a combinação dos diferentes modais, o interesse em cooperar e a participação da rede de atores no compartilhamento de dados e na formulação de políticas de mobilidade.

Dessa forma, apresenta-se a seguinte questão de pesquisa: “Qual é o grau de maturidade das iniciativas para promover a integração da MaaS?”.O objetivo deste trabalho é analisar os níveis de maturidade das iniciativas de Integração condizentes com a MaaS. A Integração é um dos pilares de um modelo de avaliação que considera Acesso, Integração e Governança. Foi realizada uma pesquisa exploratória, utilizando a escala CMMI *(Capability Maturity Model Integration)*, com um diagnóstico no município de São Paulo, SP. Foi escolhido o município de São Paulo como objeto de estudo, por ser de grande porte e mais propenso a ter

diretrizes e práticas condizentes com a MaaS.

2. METODOLOGIA

O processo de pesquisa deste estudo pode ser classificado como de natureza aplicada, uma vez que os resultados obtidos são utilizados na solução de problemas reais. A pesquisa realizou uma análise qualitativa exploratória por meio de dados secundários (projetos, pesquisas acadêmicas, relatórios, leis e regulamentações), visando compreender a maturidade de iniciativas de Integração para a MaaS no contexto de São Paulo (SP).

Para medir a performance em relação a cada iniciativa proposta, foi utilizado um modelo de maturidade adaptada da escala do CMMI (Figura 1), que fornece uma estrutura para a integração e a melhoria contínua dos processos de desenvolvimento e gerenciamento de produtos e serviços (Chrissis; Konrad; Shrum, 2006).



Figura 1: Níveis de maturidade para iniciativas da MaaS, com base no CMMI.

A seguir, são apresentados os resultados e discussão do pilar Integração, cujo os dados obtidos referem-se ao diagnóstico de cada iniciativa utilizado para atribuir o nível de maturidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pilar Integração é composto por 2 abordagens e 5 iniciativas. Na abordagem Combinação Modal, tem-se como iniciativas: *Inovações tecnológicas*, representando a viabilidade do uso de recursos tecnológicos inovadores, como IA e IoT para auxiliar na combinação modal, especialmente, no processamento de dados em tempo real; *Terminais multimodais*, relacionados à implementação e à manutenção de terminais que facilitam as trocas de modo de transporte de forma eficiente; e *Interfaces digitais integrativas* a partir da disponibilidade de plataforma única para pagamento de bilhete e integração entre diversos modos de transporte. Na abordagem Cooperação e Rede de Atores, tem-se como iniciativas: *Compartilhamento de dados e informações*, que visa verificar a estrutura ou facilidade de compartilhamento de dados entre diferentes atores para promover a integração eficiente do sistema de transporte; e *Contribuições no Plano de Mobilidade Urbana*, como forma de compreender e analisar a participação dos atores no desenvolvimento e implementação do plano de mobilidade local.

Em relação à iniciativa de *Inovações tecnológicas - Nível de maturidade 1 (Inicial)*, a SPTrans (São Paulo Transporte S.A.), responsável pela gestão do Transporte Público (TP) por ônibus na cidade, está desenvolvendo (implementação prevista até 2026) o Sistema de Monitoramento e Gestão Operacional (SMGO), uma solução tecnológica baseada em ITS CAD/AVL - Sistema de Transporte Inteligente com Despacho Assistido por Computador e Localização Automática de Veículos. O sistema vai permitir controle centralizado das operações, comunicação em tempo real, geração de relatórios e uso de dados para decisões estratégicas (São Paulo, 2024), facilitando o processamento de dados em tempo real. Também a ampla cobertura de conectividade é fator essencial para viabilizar a integração modal. Segundo o Ranking Connected Smart Cities, a cobertura 5G atende 99,95% da população de São Paulo (Urban Systems, 2024).

No que se refere aos *Terminais multimodais - Nível de maturidade 2 (Coordenado)*, o Plano de Mobilidade Urbana (PMU) indicou que a rede de ônibus municipal passou por reestruturação, baseado em um sistema tronco-alimentador, o que demandou a implantação de terminais de integração para viabilizar as transferências entre as linhas (São Paulo, 2015). O PMU também propõe a criação de um sistema de bicicletas compartilhadas integrado às demais redes de transporte, implantando sempre que possível estações de bicicletas nas áreas internas dos terminais de ônibus, estações de metrô e trens. A Lei Municipal nº 16.885/2018, que regulamenta o sistema cicloviário, estabelece diretrizes para essa integração, com a exigência de estacionamento de bicicletas em novos terminais do TP (São Paulo, 2018a).

Na prática, existe uma ampla rede de integração entre diferentes modos e linhas em SP, incluindo metrô, trem e ônibus, com diversos terminais intermodais estrategicamente distribuídos ao longo da malha urbana, permitindo aos usuários realizar transferências entre os sistemas operados por diferentes concessionárias. Esses terminais, além de facilitarem a interconectividade entre os modais, contam com infraestrutura de apoio à mobilidade ativa, como paraciclos e bicicletários, o que incentiva o uso combinado da bicicleta com o transporte público e, algumas dessas estações também oferecem estacionamentos para veículos particulares (Metrô-SP, 2025). Os terminais das áreas centrais e zona oeste estão frequentemente localizados próximos a estações do sistema de compartilhamento de bicicletas Bike Itaú/Tembici (FGV, 2022). O Aquático-SP, primeiro serviço público hidroviário de SP, entrou em operação em 2024 na represa Billings, integrando-se à rede de ônibus municipais e, futuramente, ao Metrô e à CPTM via Bilhete Único (BU), realizando o trajeto entre os terminais Cantinho do Céu e Parque Mar Paulista – Bruno Covas em cerca de 17 minutos, tempo significativamente menor que os até 1h20m da mesma viagem por ônibus (Prefeitura de São Paulo, 2024).

Em relação às *Interfaces digitais integrativas - Nível de maturidade 2 (Coordenado)*, existem alguns apps atuantes em SP que oferecem integração de informações para vários modos de transporte. O Moovit permite planejar rotas combinando ônibus, metrô, trem, barcas e VLT, inclui também informações de bicicletas e patinetes compartilhados, integrando o Uber e Waze também no cálculo das rotas (Moovit, 2022). O SP PASS, da SPTrans, permite recarregar o Bilhete Único (BU) com PIX ou débito sem taxas, planejar viagens exibindo rotas, custos e horários em tempo real, além de localizar estações de bicicletas e consultar serviços complementares como o ClickBus. O app integra ainda informações sobre acessibilidade, Wifi nos veículos e faz parte de um projeto piloto que visa ampliar o pagamento por QR Code e NFC (Near Field Communication) no sistema de transportes (SPTrans, 2022).

Em relação a integração tarifária por BU, nos ônibus, o BU Comum permite quatro embarques em até três horas, enquanto o Vale-Transporte e o Estudante oferecem esse benefício em até duas horas. Há ainda integração com Metrô e CPTM, mas o BU não cobre o custo total da viagem, concedendo apenas 13% de desconto para quem utiliza ônibus e trilhos no mesmo trajeto (FGV Cidades, 2022). O sistema Bike Itaú, permite o desbloqueio via BU cadastrado, oferecendo 1 hora gratuita por viagem, com intervalo de 15 min para nova liberação e R$ 5 por hora adicional. Também o bilhete integrativo "TOP", por intermédio da Arrecadação nos Serviços Públicos de Transporte Coletivo de passageiros do Estado de São Paulo (ABASP), oferta Bilhete Digital QR Code, porém não é integrado aos ônibus da SPTrans (FGV Cidades, 2022).

Sobre o *Compartilhamento de dados e informações - Nível de maturidade 2 (Coordenado)*, a Prefeitura de SP possui uma trajetória relevante no uso de dados abertos, com base normativa bem estruturada e alinhada às diretrizes nacionais de proteção de dados, diante do avanço dos dispositivos de coleta e tratamento de dados pessoais (FGV Cidades, 2022). Em relação a dados de transportes, o Decreto Municipal nº 56.981/16 regulamenta o uso do viário urbano por atividades privadas, como o transporte individual remunerado, carona solidária e compartilhamento de veículos autônomos, exigindo que as operadoras cadastradas compartilhem dados das viagens com a prefeitura, e paguem uma taxa correspondente caso ocorra o uso intensivo do viário (São Paulo, 2016). Originalmente, os dados seriam enviados ao Mobilab, ambiente alinhado à proposta de inovação aberta recomendada para a política de MaaS e, embora hoje não integre mais à governança da mobilidade em São Paulo, sua experiência segue relevante e contribuiu significativamente para as secretarias envolvidas (FGV Cidades, 2022).

O Decreto n° 58.200/2018 estabelece o uso de tecnologias da informação no TP para monitoramento da frota, exigindo infraestrutura tecnológica (*hardware* e *software*) para garantir o processamento, armazenamento,

comunicação e disponibilização dos dados coletados pelos equipamentos embarcados obrigatórios. Esses dados devem ser integralmente disponibilizados ao Poder Concedente, permitindo a realização de atividades de planejamento, monitoramento, fiscalização e avaliação dos indicadores de qualidade e desempenho da frota (São Paulo, 2018b). Complementarmente, a Lei Municipal nº 16.885/18 autoriza a coleta e utilização das estatísticas de uso do sistema de compartilhamento de bicicletas, com o objetivo de subsidiar o planejamento cicloviário da cidade (São Paulo, 2018a).

Os dados de mobilidade urbana de SP destacam-se pelo nível de detalhamento e atualização frequente. Entre as informações disponibilizadas estão os dados sobre radares, linhas e itinerários, além da localização em tempo real dos ônibus, acessível por meio de API no padrão GTFS (*General Transit Feed Specification*). De forma geral, é possível afirmar que esses dados apresentam um grau satisfatório de abertura, com conjuntos de dados consistentes e bem estruturados (FGV Cidades, 2022).

Por fim, as *Contribuições no Plano de Mobilidade Urbana - Nível de maturidade 2 (Coordenado)* contou com a participação de representantes do poder público, por meio das secretarias municipais, de operadores de transporte (sindicatos), e da sociedade civil, incluindo trabalhadores, idosos, jovens, ciclistas e pessoas com mobilidade reduzida. O PlanMob/SP, instituído pelo Decreto 56.834/2015, foi elaborado pela prefeitura com o apoio técnico das empresas públicas SPTrans e CET (São Paulo, 2015). A participação da sociedade é um princípio do PMU, tanto em sua execução quanto em suas revisões. O principal espaço de articulação é o Conselho Municipal de Transporte e Trânsito (CMTT), cujas reuniões abordam temas relacionados ao plano. Além disso, poderão ser promovidas audiências e consultas públicas para aprofundar discussões, bem como iniciativas digitais que ampliem a participação da população. Embora o CMTT seja a principal referência, outras lideranças e representantes da comunidade também devem ser mobilizados e ouvidos (São Paulo, 2015). A revisão do PlanMob deverá incorporar as diretrizes do Programa de Metas da prefeitura em parceria com a sociedade civil (Prefeitura de São Paulo, 2025). A síntese de cada iniciativa é apresentada na Figura 2.

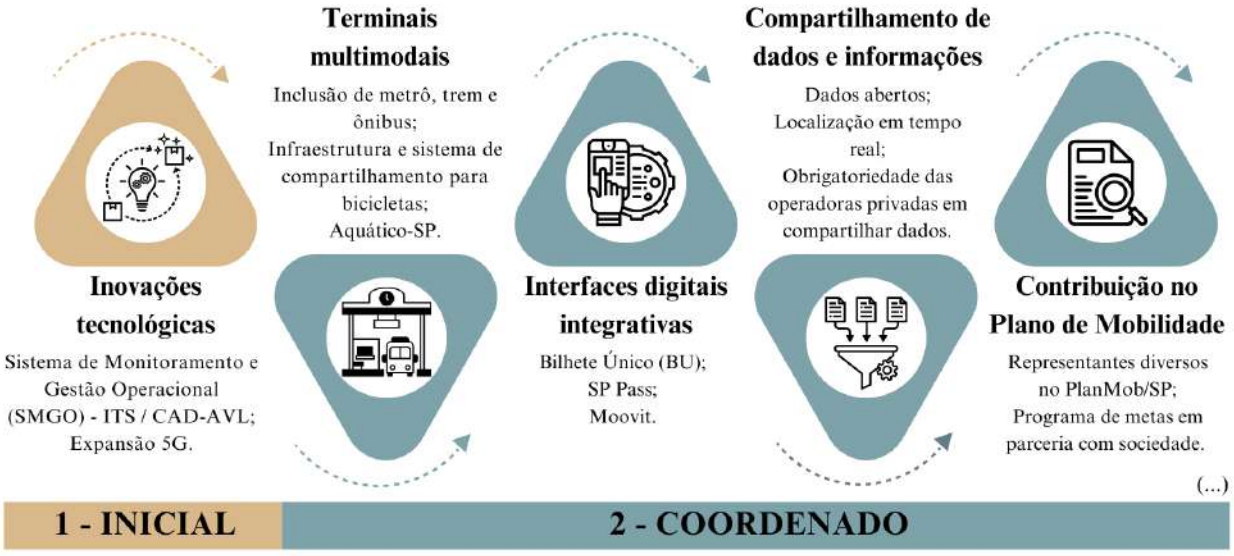


Figura 2: Maturidade das iniciativas de Integração para a MaaS.

Conforme a Figura 2, a iniciativa *Inovações tecnológicas* encontra-se no nível de maturidade 1, uma vez que há projetos em andamento para aplicações futuras de processamentos de dados. Já as iniciativas *Terminais multimodais, Interfaces digitais integrativas, Compartilhamento de dados e informações* e *Contribuições no Plano de Mobilidade Urbana* foram classificadas no nível 2 de maturidade, pois dispõem de práticas estabelecidas e regulamentadas.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste artigo foi analisar os níveis de maturidade das iniciativas de Integração condizentes com a MaaS no município de São Paulo, uma cidade de grande porte com um amplo sistema de transporte público e privado, porém incipiente do ponto de vista da MaaS. No pilar Integração, avaliou-se um conjunto de 5

iniciativas, sendo: *Inovações tecnológicas* – Nível 1; e *Terminais multimodais, Interfaces digitais integrativas*, *Compartilhamento de dados e informações* e *Contribuições no Plano de Mobilidade Urbana* – Nível 2, conforme escala adaptada do CMMI. Ressalta-se que a temática é promissora e está inserida em um ambiente de constante transformação.

O estudo contribui para as dificuldades de implementar e efetivar um sistema de MaaS em cidades sustentáveis e inteligentes, especialmente no contexto brasileiro. Em termos práticos, colabora com gestores públicos e demais atores envolvidos na formulação de estratégias e políticas para mobilidade urbana e na compreensão de como o contexto se aproxima da efetivação da MaaS. Como sugestão de trabalhos futuros, os pilares de Acesso e Governança devem ser investigados, seguido da aplicação de modelo de decisão multicritério para auxiliar na gestão da maturidade da MaaS.

Agradecimentos
As autoras agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiam o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aba, A. e D. Esztergár-Kiss (2024) Creation of the MaaS readiness index with a modified AHP-ISM method. *Communications in Transportation Research*, v. 4. DOI: https://doi.org/10.1016/j.commtr.2024.100122

Alyavina, E.; A. Nikitas e E. T. Njoya (2024) Mobility-as-a-Service and unsustainable travel behaviour: Exploring the car ownership and public transport trip replacement side-effects of the MaaS paradigm. Transport Policy, v. 150.

Audouin, M. e M. Finger (2018) The development of Mobility-as-a-Service in the Helsinki metropolitan area: A multi-level governance analysis. Research in Transportation Business and Management, v. 27, p. 24–35.

Barbieri, A. C. e J. P. Lima (2016) Métodos de análise multicritério aplicados a transportes: uma revisão sistemática. In Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Rio de Janeiro, RJ). Rio de Janeiro: ANPET.

Basu, R. e J. Ferreira (2021) Sustainable mobility in auto-dominated Metro Boston: Challenges and opportunities post-COVID-19. Transport Policy, v. 103, p. 197–210. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.006

Caballini, C.; M. V. Corazza; V. Costa; I. Delponte e E. Olivari (2022) Assessing the Feasibility of MaaS: A Contribution from Three Italian Case Studies. Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 24, p. 1–15.

Christensen, T. H.; F. Friis e M. V. Nielsen (2022) Shifting from ownership to access and the future for MaaS: Insights from car sharing practices in Copenhagen. Case Studies on Transport Policy, v. 10, n. 2, p. 841–850.

Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô (2025) Mapa de rede de transporte metropolitano de São Paulo. São Paulo: Metrô-SP.

Corazza, M. V. e G. Carassiti (2021) Investigating maturity requirements to operate mobility as a service: the rome case. Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 15, p. 1–31. DOI: https://doi.org/10.3390/su13158367

Fundação Getúlio Vargas (FGV Cidades) (2022) Improving the governance of mobility including the specific case study of São Paulo's metropolitan region: Task B: Diagnosis. Relatório.

Prefeitura de São Paulo (2024) Prefeito inaugura primeiro transporte hidroviário público de São Paulo, que irá beneficiar 385 mil moradores da Zona Sul. São Paulo: Prefeitura de São Paulo; SPTrans.

Prefeitura de São Paulo (2025) Programa de Metas 2025–2028. Disponível em: https://programademetas.prefeitura.sp.gov.br/. Acesso em: 04 jul. 2025.

Rey-Moreno, M.; R. Periáñez-Cristóbal e A. Calvo-Mora (2023) Reflections on Sustainable Urban Mobility, Mobility as a Service (MaaS) and Adoption Models. International Journal of Environmental Research and Public Health.

São Paulo (2015) Plano Municipal de Mobilidade Urbana do Município de São Paulo – PlanMob/SP 2015.

São Paulo (2016) Decreto nº 56.981, de 10 de maio de 2016. São Paulo: Decreto Municipal.

São Paulo (2018a) Lei nº 16.885, de 19 de dezembro de 2018. São Paulo: Lei Municipal.

São Paulo (2018b) Decreto nº 58.200, de 19 de abril de 2018.São Paulo: Decreto Municipal.

Servou, E.; F. Behrendt e M. Horst (2023) Data, AI and governance in MaaS – Leading to sustainable mobility? Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 19. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100806

SPTrans (2022) SPTrans amplia piloto para pagamento via QR Code. São Paulo: São Paulo Transporte S.A.

Marianna Lucinda de Oliveira (mariannaoliveira@unifei.edu.br)
Josiane Palma Lima (jplima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Avenida BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil

ANÁLISE ESPACIAL DOS DESERTOS ALIMENTARES EM BELO HORIZONTE

D. F. O. Silva[1], L. Cardoso[1], L. K. Oliveira[2]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este estudo analisa a distribuição espacial dos desertos alimentares em Belo Horizonte, com foco na acessibilidade a alimentos frescos e saudáveis. A partir de dados de estabelecimentos comerciais obtidos no cadastro municipal e variáveis demográficas organizadas em malha hexagonal, foi aplicada uma análise de autocorrelação espacial bivariada, considerando diferentes grupos demográficos. Os resultados identificaram 341 hexágonos classificados como *low-high*, indicando áreas com baixa oferta de alimentos frescos e alta densidade populacional, o que configura desertos alimentares. Desses, 88 hexágonos apresentaram recorrência para sete ou mais grupos demográficos, totalizando 9,68 km. Os desertos alimentares estão concentrados em bairros com alta densidade populacional e infraestrutura urbana consolidada, contrariando a expectativa de sua predominância em áreas vulneráveis. Os achados evidenciam que a acessibilidade a alimentos saudáveis é assimétrica, seletiva e influenciada por lógicas de mercado, reforçando a necessidade de políticas públicas baseadas em justiça alimentar e planejamento urbano territorialmente sensível.

1. INTRODUÇÃO

Os desertos alimentares (*food deserts,* em inglês) são regiões caracterizadas pela dificuldade de acesso a alimentos frescos, saudáveis e a preços acessíveis. Esses locais geralmente apresentam uma escassez de supermercados ou mercearias que ofereçam opções alimentares nutritivas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2009). Nessas regiões, a ausência de alimentos saudáveis pode estar associada a maiores incidências de obesidade, diabetes e outras doenças relacionadas à alimentação inadequada. No entanto, a importância dos desertos alimentares vai além da saúde pública, abrangendo questões de exclusão social e desigualdade no acesso a recursos básicos. Estudos destacam que desertos alimentares geralmente possuem características comuns, como desvantagens econômicas e geográficas, além de fornecimento limitado de alimentos em áreas urbanas e rurais (GUY E DAVID, 2004). Nesse cenário, a acessibilidade urbana emerge como fator-chave para compreensão dos desertos alimentares, visto que a dificuldade de locomoção até pontos de venda adequados pode agravar a insegurança alimentar, mesmo quando há estabelecimentos nas proximidades.

Em Belo Horizonte, a literatura indica que os desertos alimentares se concentram principalmente em áreas com condições socioeconômicas precárias e acesso limitado a serviços básicos (HONÓRIO et al., 2021). Por outro lado, regiões com maior infraestrutura urbana são mais suscetíveis à formação de *food swamps*, caracterizados pela oferta excessiva de alimentos ultraprocessados. Em alguns casos, esses dois fenômenos coexistem, agravando a vulnerabilidade alimentar das populações residentes.

Apesar das contribuições existentes, parte da literatura limita-se à análise de desertos alimentares com base em indicadores socioeconômicos agregados, sem considerar adequadamente a dimensão da acessibilidade territorial. Diante disso, este estudo busca avançar nessa discussão ao investigar a distribuição espacial dos desertos alimentares em Belo Horizonte a partir da relação entre a localização dos estabelecimentos que ofertam alimentos frescos e as características demográficas da população. Ao mapear essas áreas com maior granularidade espacial, espera-se contribuir para a formulação de políticas públicas mais equitativas, orientadas pela justiça alimentar e pelo direito ao acesso digno e saudável à cidade.

2. DADOS E MÉTODOS DE ANÁLISE

Para a análise desenvolvida neste estudo, foram utilizados a localização dos estabelecimentos comerciais que ofertam alimentos frescos e dados demográficos. A localização dos estabelecimentos comerciais foi obtida no BHGEO. Para este estudo, foram considerados os estabelecimentos cuja Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) está descrita na Tabela 1. Usando o endereço disponibilizado no registro do BHMAP, os dados foram georreferenciados para análise espacial.

Para os dados demográficos, foi considerado as informações disponibilizadas pelo IPEA no Projeto Acesso a Oportunidades (AOP). Os dados são organizados em uma grade espacial de hexágonos com área aproximada de 0,11 km² por célula (PEREIRA *et al.*, 2022). Os dados demográficos considerados na análise estão descritos na Tabela 2. Os dados dos estabelecimentos comerciais foram agregados na mesma unidade espacial dos dados

demográficos, isto é, nos hexágonos.

Tabela 1: Relação de códigos CNAEs de alimentos frescos.

Código	Descrição
46.31-1	Comércio atacadista de leite e laticínios
46.32-0	Comércio atacadista de cereais e leguminosas beneficiados, farinhas, amidos e féculas
46.33-8	Comércio atacadista de hortifrutigranjeiros
46.34-6	Comércio atacadista de carnes, produtos da carne e pescado
47.21-1	Comércio varejista de produtos de padaria, laticínio, doces, balas e semelhantes
47.22-9	Comércio varejista de carnes e pescados - açougues e peixarias
47.24-5	Comércio varejista de hortifrutigranjeiros
47.11-3	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - hipermercados e supermercados
47.12-1	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - minimercados, mercearias e armazéns
56.11-2	Restaurantes e outros estabelecimentos de serviços de alimentação e bebidas

Tabela 2: Variáveis demográficas consideradas na análise.

Código	Descrição	Código	Descrição
P001	Quantidade total de pessoas	P007	Quantidade de mulheres
P002	Quantidade de pessoas de cor branca	P012	Quantidade de pessoas de idade 15 a 18 anos
P003	Quantidade de pessoas de cor negra	P013	Quantidade de pessoas de idade 19 a 24 anos
P004	Quantidade de pessoas de cor indígena	P014	Quantidade de pessoas de idade 25 a 39 anos
P005	Quantidade de pessoas de cor amarela	P015	Quantidade de pessoas de idade 40 a 69 anos
P006	Quantidade de homens	P016	Quantidade de pessoas de idade 70 ou mais anos

Para a análise dos dados, foi calculada a associação espacial bivariada, por meio do cálculo do Índice de Moran bivariado. Para tanto, foi utilizado o critério de adjacência (Equação 1) para obtenção de uma matriz de pesos espaciais. O critério de adjacência é amplamente utilizado em estudos que empregam unidades administrativas, como setores censitários, para representar dados espaciais (LUZARDO *et al.*, 2017).

$$I_i = \frac{z_i \sum_{j=1}^{n} w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^{n} z_j^2} \quad (1)$$

Os resultados foram decompostos em índices locais de associação espacial (LISA), para visualizar os resultados em forma de mapa, cujos resultados são mostrados por meio de agrupamentos de valores altos (*high-high*) e baixos (*low-low*) ou áreas de transição (*high-low* e *low-high*). Esses padrões podem ser interpretados a partir do diagrama de espalhamento do índice, que divide os valores observados em quadrantes para facilitar a visualização e a classificação de áreas conforme suas características espaciais. As análises foram feitas no Software GEODA.

Por fim, de interesse deste estudo identificar o resultado correspondente aos hexágonos *low-high*, uma vez que esse valor representa uma baixa concentração de estabelecimentos em uma região com alta densidade populacional, o que configura um deserto alimentar. Como o resultado para grupo demográfico, foi consolidado a análise para os diferentes grupos pela contagem dos hexágonos *low-high,* como forma de explorar os resultados para diferentes grupos demográficos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo os dados disponibilizados pela Prefeitura de Belo Horizonte, o município tem 31.562 estabelecimentos que ofertam alimentos frescos e saudáveis (Figura 1A). Os estabelecimentos que ofertam alimentos frescos estão distribuídos de forma homogênea por todo o território analisado, no entanto, isto não significa uma boa acessibilidade à estes estabelecimentos. Os resultados da autocorrelação espacial dos estabelecimentos comerciais em função da localização da população, apresentados na Figura 1B, indicam que 138 hexágonos foram classificados com *high-high*, indicando locais cuja população tem boa acessibilidade a alimentos frescos, enquanto 194 hexágonos foram classificados como *low-low*, indicando locais sem estabelecimentos e população no entorno, o que é pouco relevante para a discussão de deserto alimentar. Os 35 clusters *high-low* indicam locais com oferta excedente ou má distribuída de alimentos frescos. Ainda, 97

hexágonos são caracterizados como *low-high,* indicando hexágonos com poucos empreendimentos para uma vizinhança com muitos residentes, configurando áreas de alta demanda e pouca oferta de estabelecimentos, situação típica de desertos alimentares.

Analisando apenas os hexágonos que configuram desertos alimentares (*low-high*), eles estão distribuídos de forma dispersa, mas com maior concentração no setor leste e centro-sul do território analisado. Essa distribuição indica bairros densamente povoados que não possuem uma infraestrutura comercial adequada em termos de acesso a alimentos frescos. Em algumas áreas, os hexágonos *low-high* aparecem próximos a regiões *high-high*, o que sugere disparidades espaciais locais: zonas próximas com boa cobertura comercial contrastam com outras vizinhas desassistidas. Este resultado muitas vezes por refletir zonas de segregação urbana, conforme mostrado na Figura 3. Ainda, a distribuição dos hexágonos classificados como *low-high* é fragmentada, não formando grandes manchas contínuas, o que pode dificultar políticas amplas e exigir intervenções pontuais e localizadas. Por fim, a repetição desse padrão em diferentes setores da cidade evidencia que o problema é estrutural e não isolado.

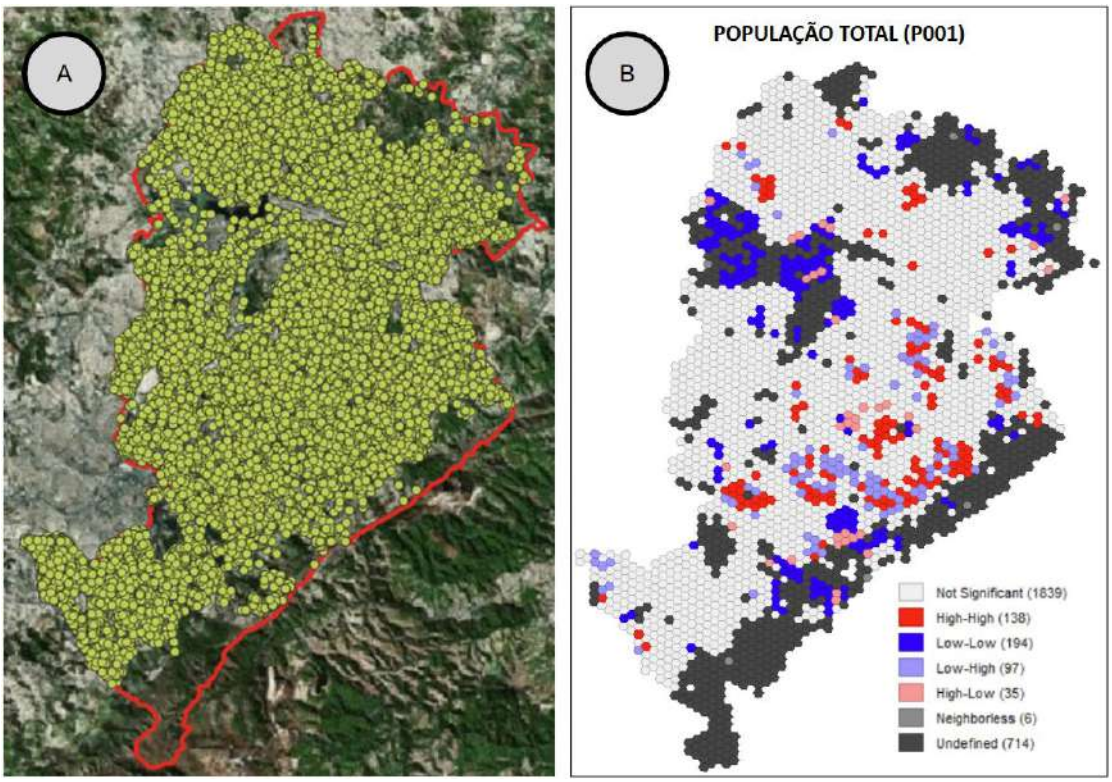


Figura 1: (A) localização dos estabelecimentos que comercializam alimentos frescos; (B) Resultados do LISA

A mesma análise foi realizada para as demais classes demográficas descritas na Tabela 2. Na Figura 2A estão consolidadas as contagens dos hexágonos classificados como *low-high* em todas as análises de autocorrelação espacial. Analisando este resultado, observa-se que hexágonos da região centro-sul, leste e parte do nordeste do território são desertos alimentares recorrentes para diversos grupos populacionais, o que sugere uma exclusão alimentar estrutural e multifatorial. Logo, a sobreposição de desertos alimentares para vários grupos demográficos indica que esses territórios enfrentam múltiplas formas de vulnerabilidade, não apenas são densamente povoados, mas abrigam populações historicamente mais suscetíveis à insegurança alimentar.

As Figuras 2B, 2C e 2D destacam agrupamentos significativos de hexágonos classificados como *low-high* em regiões com elevada densidade populacional e presença consolidada de empreendimentos comerciais. A Figura 2B evidencia uma concentração no bairro Gutierrez e em partes do bairro Grajaú (regional Oeste), composta por 10 hexágonos que abrigam aproximadamente 17.339 habitantes e 58 estabelecimentos distribuídos em uma área de 1,10 km². Já a Figura 2C apresenta um agrupamento mais extenso, localizado nos bairros Santo Antônio, Sion e uma faixa do bairro São Pedro (regional Centro-Sul), totalizando 12 hexágonos, 23.955 habitantes e 93 estabelecimentos em 1,32 km². Por fim, a Figura 2D mostra um agrupamento menor no bairro

Cidade Nova (regional Nordeste), com 4 hexágonos, 5.747 habitantes e 44 empreendimentos concentrados em 0,44 km². Esses agrupamentos sugerem uma dinâmica paradoxal: mesmo em áreas com alta densidade populacional e menor risco de vulnerabilidade socioeconômica, persistem padrões espaciais de exclusão no acesso a alimentos frescos, reforçando a noção de que os desertos alimentares também podem ocorrer em territórios considerados estruturados do ponto de vista urbano.

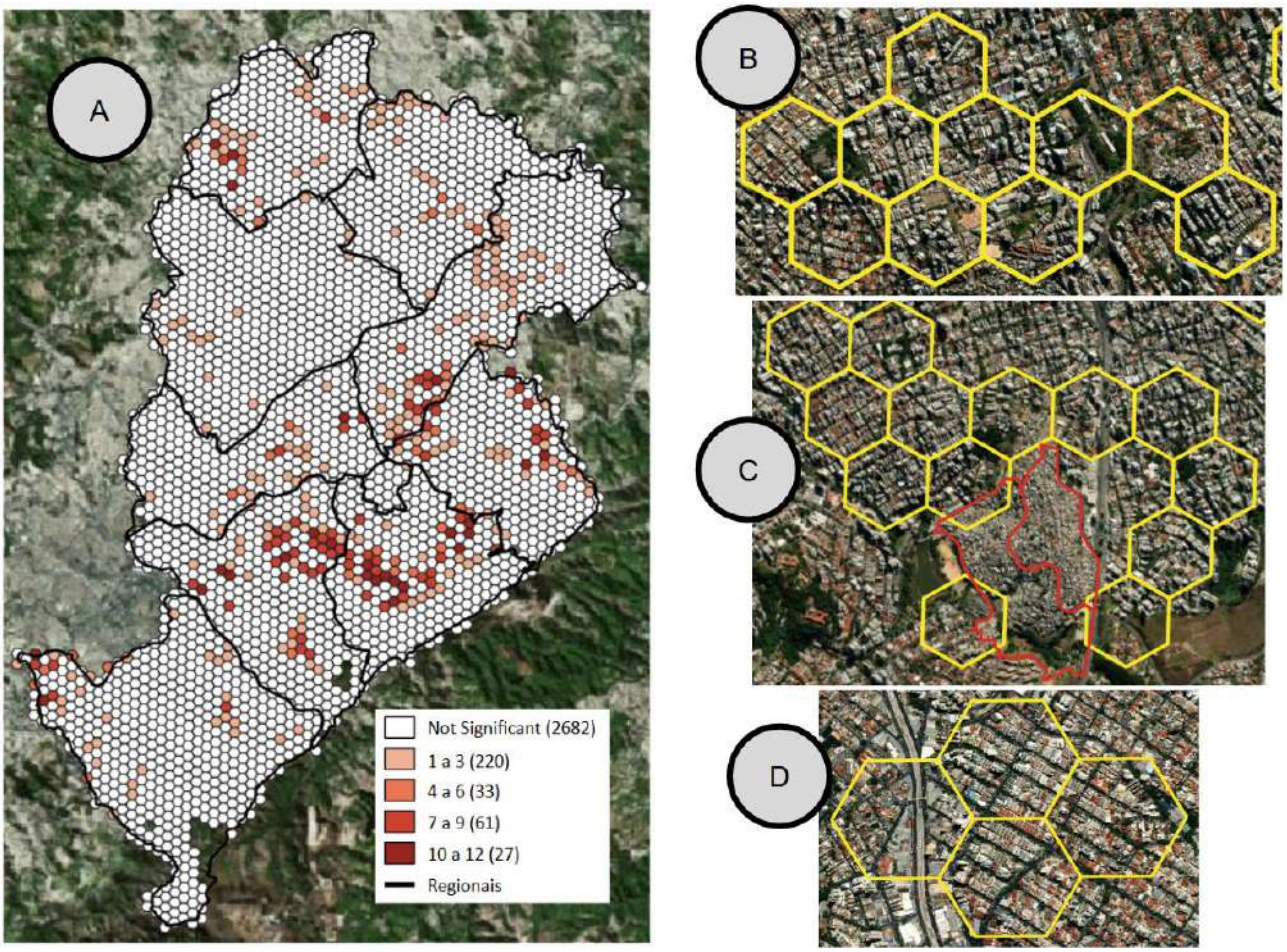


Figura 2: (A) Contagem de ocorrência de *low-high* em cada hexágono, para diferentes grupos demográficos (B) Detalhe Gutierrez (C) Detalhe Santo Antônio e Sion (D) Detalhe Cidade Nova

A análise evidencia que, no contexto estudado, a acessibilidade a alimentos frescos é assimétrica e seletiva, mesmo em áreas densamente povoadas e relativamente favorecidas em termos socioeconômicos. Isso reforça a necessidade de políticas públicas orientadas por critérios de justiça espacial e alimentar, que considerem a diversidade territorial e promovam incentivos para ampliar a oferta de alimentos saudáveis em áreas com baixo atendimento, inclusive naquelas onde, à primeira vista, não se esperaria a ocorrência de desertos alimentares.

Ainda, os achados deste estudo revelam que a acessibilidade a alimentos frescos em Belo Horizonte não está uniformemente distribuída no espaço urbano, mesmo em áreas com infraestrutura consolidada. A presença de desertos alimentares em bairros com alta densidade populacional e baixos níveis de vulnerabilidade socioeconômica indica que a acessibilidade não pode ser entendida apenas em termos físicos ou geográficos, ou seja, proximidade a estabelecimentos, mas sim como um conceito multidimensional que envolve também a disponibilidade real de alimentos saudáveis, a capacidade de aquisição e as condições de mobilidade urbana. A localização dos estabelecimentos, influenciada por lógicas de mercado, nem sempre atende à demanda das populações residentes, gerando assimetrias de acesso em regiões bem servidas em outros aspectos urbanos. Esses resultados evidenciam a necessidade de incorporar critérios de acessibilidade alimentar nas políticas de ordenamento territorial, buscando garantir que o acesso a alimentos frescos seja efetivamente equitativo, funcional e sensível às dinâmicas intraurbanas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo identificar e analisar a distribuição espacial dos desertos alimentares em Belo Horizonte, com base em uma abordagem que integra dados de localização de estabelecimentos que ofertam alimentos frescos e saudáveis e variáveis socioeconômicas. A análise bivariada de autocorrelação espacial (Moran I) permitiu identificar padrões significativos, com destaque para hexágonos classificados como *low-high, cuja* áreas são caracterizadas por baixa oferta de estabelecimentos alimentares, mas com altos indicadores demográficos. Esses hexágonos foram interpretados como desertos alimentares urbanos, evidenciando desigualdades no acesso a alimentos saudáveis mesmo em setores aparentemente favorecidos da cidade. Ao todo, foram identificados 341 hexágonos com ocorrência de desertos alimentares para pelo menos uma variável analisada, sendo que 88 deles apresentaram recorrência em sete ou mais variáveis, abrangendo uma área total de 9,68 km² do território municipal.

A sobreposição das camadas socioeconômicas com a distribuição espacial dos estabelecimentos revelou que grande parte dos desertos alimentares está concentrada em áreas de alto adensamento populacional e baixo risco de vulnerabilidade socioeconômica, como observado nos bairros Santo Antônio, Sion e Gutierrez, localizados em regiões centrais e valorizadas de Belo Horizonte. Esse achado desafia a ideia tradicional de que os desertos alimentares ocorrem apenas em contextos de pobreza urbana, sugerindo que a lógica de localização comercial nem sempre acompanha a demanda real por alimentos saudáveis, mesmo em áreas com infraestrutura consolidada. Tais evidências abrem caminhos para investigações futuras, tanto na área da saúde pública quanto no campo do planejamento urbano e das políticas alimentares, não desconsiderando ainda a possibilidade de incluir dados de renda no modelo.

Os resultados obtidos reforçam a importância da análise espacial como ferramenta para identificar desigualdades urbanas ocultas sob indicadores agregados. A abordagem proposta demonstrou potencial para orientar ações de planejamento e desenvolvimento sustentável, contribuindo para o debate sobre justiça alimentar e acesso equitativo aos recursos urbanos. Além disso, o estudo oferece uma metodologia replicável, aplicável a outras cidades e contextos, fortalecendo o papel das análises geoespaciais na formulação de políticas públicas mais eficazes e territorialmente sensíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHMAP. *Infraestrutura de Dados Espaciais da Prefeitura de Belo Horizonte (IDE-BHGEO)*. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/. Acesso em: out. 2024.

GUY, C. M.; DAVID, G. Measuring physical access to 'healthy foods' in areas of social deprivation: a case study in Cardiff. *International Journal of Consumer Studies*, v. 28, p. 222-234, 2004. https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2003.00340.x.

HONÓRIO, O. S.; PESSOA, M. C.; GRATÃO, L. H. A.; ROCHA, L.R.; CASTRO, I.R.R; CANELLA, D.S.; HORTA, P.M.; MENDES, L.L. Social inequalities in the surrounding areas of food deserts and food swamps in a Brazilian metropolis. *International Journal for Equity in Health*, v. 20, n. 168, 2021. https://doi.org/10.1186/s12939-021-01501-7.

LUZARDO, A. J. R.; CASTAÑEDA FILHO, R. M.; RUBIM, I. B. Análise espacial exploratória com o emprego do Índice de Moran. *GEOgraphia*, v. 40, n. 19, p. 161-179, 2017. https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2017.v19i40.a13807.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *The Public Health Effects of Food Deserts: Workshop Summary*. Washington, DC: The National Academies Press, 2009. https://doi.org/10.17226/12623.

PEREIRA, R. H. M.; HERSZENHUT, D.; BRAGA, C.K.V.; BAZZO, J.P.; OLIVEIRA, J.L.A.; PARGA, J.P.; SARAIVA, M.; SILVA, L.P.; TOMASIELO, D.B.; WARWAR, L. *Distribuição espacial de características sociodemográficas e localização de empregos e serviços públicos das vinte maiores cidades do Brasil.* Texto para Discussão 2772. Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2022. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11225.

Daniel Felipe de Oliveira Silva (danielfos@ufmg.br)
Leandro Cardoso (leandro@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia, Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, Brasil.
Leise Kelli de Oliveira (leise.oliveira@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, Av. Paulo Gama, 110, Bairro Farroupilha, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

ASSESSING AGE-BASED INEQUITIES IN HEALTH CARE ACCESSIBILITY USING THE G2SFCA METHOD: A CASE STUDY IN THE IMMEDIATE REGION OF GOIÂNIA

Lucas Brandão Monteiro de Assis[1], Thiago Vinicius Louro[1], Paulo Cesar Lima Segantine[1], Marcelo Monari[2], Miguel José das Neves Pires Amado[3]
[1]University of São Paulo, [2]Federal University of São Carlos, [3]University of Lisboa

ABSTRACT
The global shift toward aging populations poses major challenges for healthcare systems, especially in ensuring equitable access to primary care. While general healthcare accessibility has been widely studied, limited attention has been given to how age-related mobility constraints affect spatial access to Primary Health Care (PHC). This study addresses that gap by evaluating geographic accessibility to PHC facilities in the Immediate Region of Goiânia, Brazil, using the Gaussian Two-Step Floating Catchment Area (G2SFCA) method with age-sensitive mobility thresholds. Analysis of 2022 Census data and the National Registry of Health Establishments reveals significant disparities across age groups. Smaller cities show higher accessibility due to lower population density and compact urban layouts, while major cities exhibit the lowest scores, particularly for adults aged 60 and over. These findings highlight urgent needs for targeted interventions, such as senior-friendly transportation and community-based care.

1. INTRODUCTION

The global population aged 65 and over has surpassed 10% for the first time, exceeding the number of individuals under 15 (UN, 2022). This demographic shift, driven by increased life expectancy and declining birth rates, has progressed unevenly across regions. In developed countries, particularly in Europe, aging populations raise concerns about pension systems, labor markets, and healthcare sustainability (Guida *et al.*, 2022). Developing countries face slower but significant challenges, including rising healthcare demands and the need for inclusive policies to enhance quality of life (Cotlear, 2018).

This transformation is one of the most critical population changes in recent decades, with profound social, economic, and health-related impacts. Aging populations experience higher incidences of chronic diseases, medical consultations, hospitalizations, and medication use (Medici, 2011). In Brazil, the proportion of individuals aged 65 and older rose from 7.4% in 2010 to 10.9% in 2022, while the share of children under 14 declined from 24.1% to 19.8% (IBGE, 2023).

Healthcare in Brazil is primarily delivered through the Unified Health System, structured into three levels: Primary Health Care (PHC), Secondary Care, and Tertiary Care (Mendes, 2011). PHC stands out for its extensive coverage, cost-effectiveness, equitable distribution, and focus on chronic and noncommunicable diseases, conditions prevalent among the elderly (Bitton *et al.*, 2017; WHO, 2014). Effective PHC management requires long-term care, patient adherence, and early diagnosis (Beaglehole *et al.*, 2008), making it a cornerstone for addressing aging populations and reducing reliance on more complex interventions (WHO, 2018). However, equitable access remains a challenge, as approximately 18.1% of Brazilian users face barriers such as incomplete treatments, long waiting times, and geographic obstacles (Dantas *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2022).

While spatial accessibility models have advanced in recent years, most still treat the population as a homogeneous group, disregarding critical variations in mobility across age groups. This limitation is especially problematic in aging societies, where older adults often face reduced walking speeds and shorter travel ranges, directly affecting their ability to reach health services. Few studies have incorporated these differences into accessibility assessments, particularly within the Brazilian context. This study addresses that gap by applying the Gaussian Two-Step Floating Catchment Area (G2SFCA) method to assess age-sensitive access to Primary Health Care (PHC) facilities in the Immediate Region of Goiânia. By adapting travel thresholds to reflect the walking speeds of different age groups, the analysis offers a more equitable and realistic understanding of geographic accessibility and supports planning efforts that prioritize the needs of diverse population segments.

2. METHODS

The accessibility analysis in this study adopts the Gaussian Two-Step Floating Catchment Area (G2SFCA) method, as approached by Guida *et al.* (2022), Liu *et al.* (2024) and Thakur-Weigold *et al.* (2022), to assess

the geographical accessibility of the population in the Immediate Region of Goiânia. This approach extends the traditional 2SFCA model by incorporating distance decay functions to reflect differences in mobility capacity across age groups.

The basic 2SFCA approach is derived from gravity-based models and estimates accessibility in two main steps: (1) calculating the provider-to-population ratio (PPR) by identifying the population within the catchment area of each health facility, and (2) allocating healthcare supply to the population by identifying which facilities fall within each population cluster's catchment area, summing the PPRs for each population point (Guida *et al.*, 2022; Luo & Wang, 2003).

By integrating a Gaussian distance decay function, the G2SFCA formulation allows for a more realistic representation of accessibility, especially for populations with limited mobility. In this study, the decay function $f(d)$, is defined as shown in Equation (1), where d represents the distance between the population and the facility, and d_0 denotes the maximum service threshold for each age group.

$$f(d) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\times\left(\frac{d}{d_0}\right)} - e^{-\frac{1}{2}}}{1 - e^{-\frac{1}{2}}} \quad ,d \le d_0 \tag{1}$$

The accessibility values (A) to each population area (i) could be determined by the Equation (2):

$$A_i = \sum_{j\in\{d_{ij}\le d_0\}} R_j = \sum_{j\in\{d_{ij}\le d_0\}} \frac{S_j}{\sum_{i\in\{d_{ij}\le d_0\}} D_i \cdot f(d_{ij})} \cdot f(d_{ij}) \tag{2}$$

Where A_i is the accessibility for the population in i, R_j is the supply-demand ratio of facility j, S_j is the capacity of facility j, D_i is the demand scale of point i, $f(d_{ij})$ is the Gaussian decay function, and d_{ij} is the distance between the demand and supply points. The accessibility values obtained by Equation 2 were classified in 5 categories - from Very Low to Very High, based on the quantiles.

The d_0 threshold values adopted for each age group are presented in Table 1:

Table 1: Age groups, average walking speeds, and maximum travel distances (d_0) based on Alves *et al.* (2020).

Age group	Walking Speed (km/h)	Reachable distance in 30 min - d_0 (km)
G1 (0 – 29)	4,82	2,41
G2 (30 – 59)	4,50	2,25
G3 (60 +)	2,16	1,08

This study utilized demographic data from the 2022 Census conducted by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2025), using the most recent population estimates disaggregated by age groups. Although originally aggregated at the census tract level, these data were spatially redistributed through dasymetric interpolation onto a regular hexagonal grid, ensuring a more uniform geographic unit. This approach follows methodologies adopted in studies by Guida *et al.* (2022). Health facility data were sourced from the National Registry of Health Establishments (CNES), provided by the Ministry of Health and accessed via the GeoCNES package (Assis *et al.*, 2024). These data enabled the identification of supply and demand points and the calculation of travel costs between them.

To analyze population movements to healthcare centers, walking was considered as the primary mode of transportation. Despite the existence of motorized travel alternatives, walking remains the most common means for accessing primary healthcare services. Travel distances were computed using the QNEAT plugin in QGIS, based on the street network extracted from OpenStreetMap through the OSMnx package (Boeing, 2025). Finally, data processing and analysis were conducted using Python.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The study area comprises 19 cities within the Immediate Region of Goiânia: Abadia de Goiás, Aparecida de Goiânia, Aragoiânia, Bela Vista de Goiás, Bonfinópolis, Brazabrantes, Caldazinha, Caturaí, Goianira, Goiânia, Guapó, Hidrolândia, Nerópolis, Nova Veneza, Santo Antônio de Goiás, Senador Canedo,

Terezópolis de Goiás, Trindade, and Varjão. Together, these cities are home to over 2.5 million people, served by 262 primary healthcare facilities, including Basic Healthcare Units (UBS), Family Health Units (USF), Health Centers (CS), and Health Posts (PS). The main results of the study are presented in the maps and plots in Figure 1.

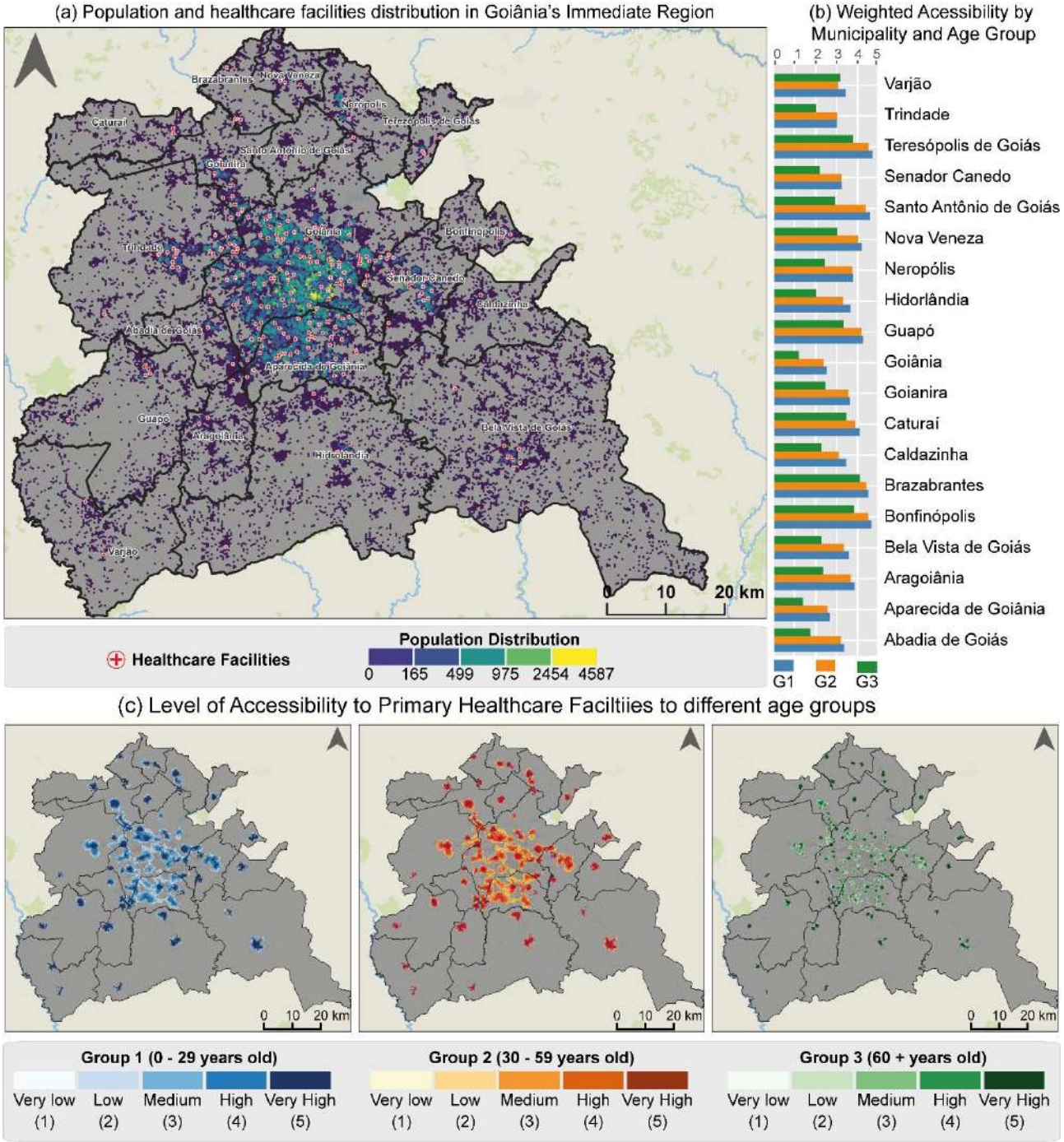


Figure 1 : Population distribution and accessibility levels in Goiânia Immediate Region

In terms of population distribution, Goiânia concentrates 56% of the region's population, followed by Aparecida de Goiânia with 20%. The remaining 24% is distributed among the other 17 cities. This spatial concentration is mirrored in the distribution of healthcare services: Goiânia and Aparecida de Goiânia host 135 health facilities, accounting for over 51% of the total supply in the Immediate Region.

Although Goiânia and Aparecida de Goiânia account for the largest population shares, they exhibit the

lowest accessibility levels across all three age groups. In Goiânia, accessibility scores were 2.5 (G1), 2.4 (G2), and 1.2 (G3), while in Aparecida de Goiânia, the scores were 2.66 (G1), 2.55 (G2), and 1.4 (G3). This is particularly concerning for G3 (older adults), a group with reduced mobility and higher dependence on public healthcare services.

These low accessibility levels may be attributed to high population densities that result in greater demand for services. While these cities do have a higher number of healthcare facilities compared to smaller cities, the distribution of these services is uneven, leading to gaps in coverage. In Goiânia, for example, Setor Bueno and Setor Marista, areas with higher incomes, lack sufficient coverage. Similarly, in Aparecida de Goiânia, neighborhoods like Jardim Buriti Sereno and Nova Brasília show limited accessibility. These areas are typically characterized by greater financial autonomy, which may reduce dependence on public healthcare but does not eliminate the spatial inequality in service provision.

In contrast, smaller cities in the region demonstrate higher accessibility levels, which can be explained by their lower population densities and more compact urban forms, making healthcare services physically closer to residents. Cities such as Bonfinópolis, Caturaí, Nova Veneza, Santo Antônio de Goiás, and Terezópolis de Goiás exhibit accessibility values above 4.0 for G1 and G2, while Brazabrantes stands out for having values above 4.0 for all three age groups. However, these cities also have very small populations, Brazabrantes, for instance, has approximately 4,000 inhabitants served by 4 health facilities.

Overall, the findings indicate a non-uniform distribution of both population and public healthcare infrastructure across the Immediate Region of Goiânia. The spatial concentration of people in Goiânia and Aparecida de Goiânia exacerbates demand pressures, while smaller cities benefit from more favorable access conditions due to their scale and proximity.

In terms of age groups, G1 and G2 (under 60) generally have greater mobility, allowing them to reach facilities over longer distances in less time. Although these groups cover a broad range of ages, their accessibility patterns are relatively similar. On the other hand, the elderly population (G3) faces greater mobility limitations, especially in the most populated cities. Notably, over 80% of the elderly population in the study area resides in Goiânia and Aparecida de Goiânia, where accessibility is lowest.

Given that mobility tends to decline with age, it is essential for urban health systems to be equipped to respond to the specific needs of older adults. While the elderly do not represent the majority of the population, they are among the most vulnerable and in greater need of continuous care. Many health issues affecting older adults could be addressed through early intervention in primary healthcare, preventing the escalation to more severe conditions. Moreover, with projected population aging, it is critical that public health systems adapt to ensure accessibility and quality of care for this growing demographic.

4. CONCLUSIONS

The results of this study highlight important spatial inequalities in access to primary healthcare services within the Immediate Region of Goiânia. Notably, the lowest accessibility levels were observed in the largest and most urbanized cities, such as Goiânia and Aparecida de Goiânia. These findings suggest that, despite having a greater concentration of services and population, the spatial distribution of facilities is still a challenge to achieve better accessibility.

A particularly critical issue concerns the elderly population, who not only exhibit a significantly reduced capacity for mobility but also demonstrate a heightened dependence on continuous healthcare. The reduced accessibility observed for this group underscores the urgent need for targeted mobility strategies, such as age-sensitive transportation solutions or the expansion of community-based care, to mitigate access limitations and support active aging.

From a methodological standpoint, the study would benefit from a more nuanced stratification of the population based on mobility profiles, acknowledging that physical ability, income, gender, and other factors can influence accessibility outcomes. Furthermore, the exclusive consideration of walking as the mode of transportation limits the scope of analysis. Future studies should incorporate public transport data to provide

a more comprehensive understanding of accessibility and extend the analysis to include additional levels of care, enabling a holistic assessment of the population's access to the broader healthcare system.

Ultimately, improving geographic accessibility, especially for the elderly, requires not only expanding service coverage, but also rethinking the service offer from a mobility and transportation perspective, making geographical planning an integral component of public health policy making.

Acknowledgements
The authors gratefully acknowledge the financial support of Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Process number: 88887.886769/2023-00, and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq-Brazil) – Process number: 163811/2021-0.

REFERENCES

Alves, F., Cruz, S., Ribeiro, A., Silva, A. B., Martins, J., e Cunha, I. (2020) Walkability index for elderly health: A proposal. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(18).

Assis, L. B. M. de, Moraes, F. R. de, Segantine, P. C. L., Amado, M. J. das N. P., e Silva, I. da. (2024) GeoCNES: healthcare mapping in Brazilian cities - a computational tool for improved decision-making. *Ciência & Saúde Coletiva*, *29*(11).

Beaglehole, R., Epping-Jordan, J. A., Patel, V., Chopra, M., Ebrahim, S., Kidd, M., e Haines, A. (2008) Improving the prevention and management of chronic disease in low-income and middle-income countries: a priority for primary health care. *The Lancet*, *372*(9642), 940–949.

Bitton, A., Ratcliffe, H. L., Veillard, J. H., Kress, D. H., Barkley, S., Kimball, M., Secci, F., Wong, E., Basu, L., Taylor, C., Bayona, J., Wang, H., Lagomarsino, G., e Hirschhorn, L. R. (2017) Primary Health Care as a Foundation for Strengthening Health Systems in Low- and Middle-Income Countries. *Journal of General Internal Medicine*, *32*(5), 566–571.

Boeing, G. (2025) Modeling and Analyzing Urban Networks and Amenities With OSMnx. *Geographical Analysis*, 1–11.

Cotlear, D. (2018) Population Aging: Is Latin America Ready? D. Cotlear (Ed), *Population Aging: Is Latin America Ready?* (p. 1–41).

Dantas, M. N. P., de Souza, D. L. B., de Souza, A. M. G., Aiquoc, K. M., de Souza, T. A., e Barbosa, I. R. (2021) Factors associated with poor access to health services in Brazil. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, *24*, 1–13.

Dodd, R., Palagyi, A., Jan, S., Abdel-All, M., Nambiar, D., Madhira, P., Balane, C., Tian, M., Joshi, R., Abimbola, S., e Peiris, D. (2021) Organisation of primary health care systems in low- and middle-income countries: Review of evidence on what works and why in the Asia-Pacific region. *BMJ Global Health*, *4*(Suppl8), 1–15.

Guida, C., Carpentieri, G., e Masoumi, H. (2022) Measuring spatial accessibility to urban services for older adults: an application to healthcare facilities in Milan. *European Transport Research Review*, *14*(1).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025) Censo 2022. Obtido 10 de julho de 2025, de https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html

Intituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023) Panorama Censo 2022. Obtido 20 de fevereiro de 2024, de https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/

Kabir, A., Karim, M. N., Islam, R. M., Romero, L., e Billah, B. (2022) Health system readiness for non-communicable diseases at the primary care level: A systematic review. *BMJ Open*, *12*(2).

Lima, J. G., Giovanella, L., Bousquat, A., Fausto, M., e Medina, M. G. (2022) Barreiras de acesso à Atenção Primária à Saúde em municípios rurais remotos do Oeste do Pará. *Trabalho, Educação e Saúde*, *20*.

Liu, L., Gao, R., e Zhang, L. (2024) An Equity Evaluation of Healthcare Accessibility across Age Strata Using the G2SFCA Method: A Case Study in Karamay District, China. *Land*, *13*(8).

Luo, W., e Wang, F. (2003) Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: Synthesis and a case study in the Chicago region. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *30*(6), 865–884. doi:10.1068/b29120

Medici, A. C. (2011) How Age Influences the Demand for Health Care in Latin America. D. Cotlear (Ed), *Population Aging: Is Latin America Ready?* (p. 135–190). World Bank.

Mendes, E. V. (2011) *As redes de atenção à saúde*. Organização Pan-Americana da Saúde, Brasília, DF.

Oliveira, R. A. D. de, Duarte, C. M. R., Pavão, A. L. B., e Viacava, F. (2019) Barriers in access to services in five health regions of Brazil: Perceptions of policymakers and professionals in the Brazilian Unifed National Health System. *Cadernos de Saude Publica*, *35*(11).

OMS. (2018) Building the economic case for primary health care: a scoping review. *Technical Series on Primary Health Care*, *48*, 1–28.

ONU. (2022) *World Population Prospects 2022*. *United Nation*. Obtido de www.un.org/development/ desa/pd/.

Thakur-Weigold, B., Buerki, P., Frei, P., e Wagner, S. M. (2022) Mapping the Swiss Vaccine Supply Chain. *Frontiers in public health*, *10*(July), 935400.

World Health Organization - WHO. (2014) *Global status report on noncommunicable diseases 2014*. Geneva.

Lucas Brandão Monteiro de Assis (lucasbrandao@usp.br)
University of São Paulo - EESC– Department of Transportation Engineering - São Carlos – SP, Brasil

ATRIBUTOS DO AMBIENTE URBANO E ESCOLHA DAS ROTAS DE PEDESTRES: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Rafaela de Sousa Medeiros, Luiz Bueno da Silva
Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

RESUMO
O caminhar nas cidades se apresenta como uma estratégia de transporte sustentável e, para promover e incentivar essa atividade, é necessário entender as percepções e necessidades de quem caminha. Este trabalho realizou uma revisão sistemática da literatura sobre a relação entre atributos do ambiente urbano e escolha das rotas de pedestres entre os anos de 2004 e 2024, sendo identificados 38 trabalhos sobre o tema. As pesquisas mostram que o processo de escolha do caminho não é influenciado apenas pela minimização da distância e do tempo de viagem, mas também por aspectos da geometria viária, infraestrutura para pedestres e uso do solo e amenidades. A compreensão da relação entre o ambiente urbano e a escolha da rota pode auxiliar o desenvolvimento de estratégias voltadas à melhoria das condições para caminhar nas cidades e promover a mobilidade urbana sustentável.

1. INTRODUÇÃO

Caminhar é a forma mais elementar de transporte, com ampla acessibilidade e baixo custo. Além disso, a movimentação a pé promove a prática de exercícios físicos, contribuindo para a saúde e bem-estar dos indivíduos e pode atuar como substituição aos transportes motorizados, mitigando problemas como engarrafamentos e poluição (Timpabi *et al.,* 2023; López-Lambas *et al.*, 2021). Na busca por uma mobilidade urbana mais sustentável, estudar o caminhar e os fatores que o influenciam se tornam cada vez mais relevantes no gerenciamento e no planejamento urbano, visando o aumento do engajamento a esse modo de transporte.

Ao se deslocar no ambiente urbano, os pedestres podem tomar diferentes caminhos para alcançar o destino desejado. O processo de decisão sobre qual rota tomar é complexo e envolve diferentes elementos além da minimização da distância. Estudos mostram diferenças significativas entre o tamanho da rota escolhida pelos pedestres e a rota mais curta para a mesma viagem, indicando que atributos objetivos do ambiente e percepções subjetivas influenciam a decisão (Basu e Sevtsuk, 2022; Lee e Lee, 2021; Shatu e Yigitcanlar, 2018).

Dada a complexidade do tema e a importância de promover a mobilidade ativa, este trabalho analisa o estado da arte sobre a relação entre atributos do ambiente urbano e escolha da rota de pedestres a partir de uma revisão da literatura. O objetivo da revisão é identificar os elementos abordados nos trabalhos e aspectos ainda não explorados, fornecendo um panorama sobre o tema.

2. METODOLOGIA

A revisão foi feita a partir da metodologia PRISMA (Page *et al.*, 2021), a qual apresenta diretrizes e recomendações para reportar a pesquisa dos trabalhos. As buscas foram feitas entre os dias 02 e 04 de junho de 2025 nas plataformas *Scopus* e *Web of Science,* entre os anos de 2004 e 2024, utilizando a seguinte sintaxe de palavras-chave: "*pedestrian" AND ("route choice" or "path choice")*. Os critérios de exclusão utilizados foram:

- Primeiro filtro: trabalhos não publicados em revistas ou conferências;
- Segundo filtro: artigos duplicados;
- Terceiro filtro: artigos em outros idiomas além de inglês, espanhol e português;
- Quarto filtro: artigos que não abordam o tema de escolha de rota no ambiente urbano (exemplo: trabalhos sobre escolha de rota em edificações e ambientes fechados e em zonas rurais).

A Figura 1 mostra o fluxograma da seleção dos artigos. Essa busca não retornou trabalhos realizados no Brasil e, assim, decidiu-se realizar uma pesquisa no catálogo de teses e dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) utilizando os termos "escolha de rota" e "escolha de caminho".



Figura 1: Fluxograma da seleção dos artigos

3. RESULTADOS

A busca feita nas bases de dados retornou em 37 artigos sobre o tema de interesse, sendo 34 artigos de periódicos e 3 artigos de conferências. A Figura 2 mostra a distribuição das publicações ao longo dos anos e, apesar do período de busca ter iniciado em 2004, o primeiro trabalho encontrado foi publicado em 2008. Nos últimos 10 anos, percebe-se um crescente interesse pelo tema, pois aproximadamente 84% dos trabalhos foram publicados nesse período.

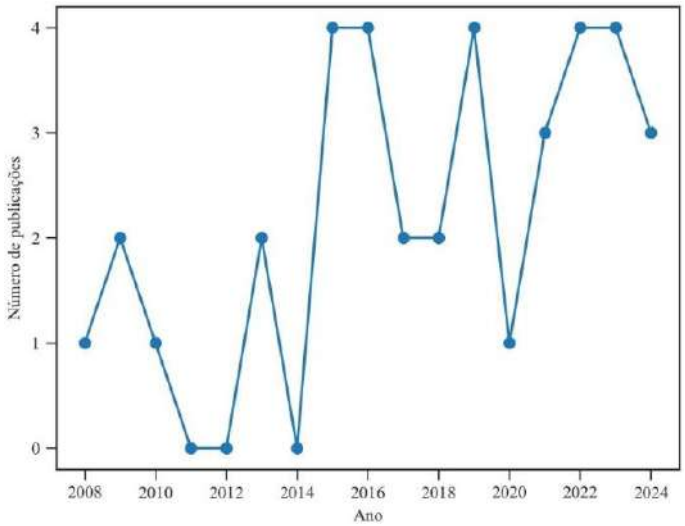


Figura 2: Publicações por ano

A Figura 3 mostra a distribuição das publicações por país, em que se destaca a contribuição de estudos dos Estados Unidos, China, Coreia do Sul e Austrália. Apenas um trabalho foi feito em cidades de diferentes países (Guo e Loo, 2013), o qual mostrou diferenças relevantes entre os modelos desenvolvidos para as localidades analisadas. Isso indica que as características espaciais de diferentes ambientes urbanos podem influenciar a percepção dos pedestres e, consequentemente, o processo de escolha da rota. Apesar da China ser o segundo país com mais publicações, ela e Gana são os únicos representantes do Sul Global entre os países citados. Não foram encontrados trabalhos na América do Sul, o que destaca a falta de pesquisas sobre o tema nessa região.

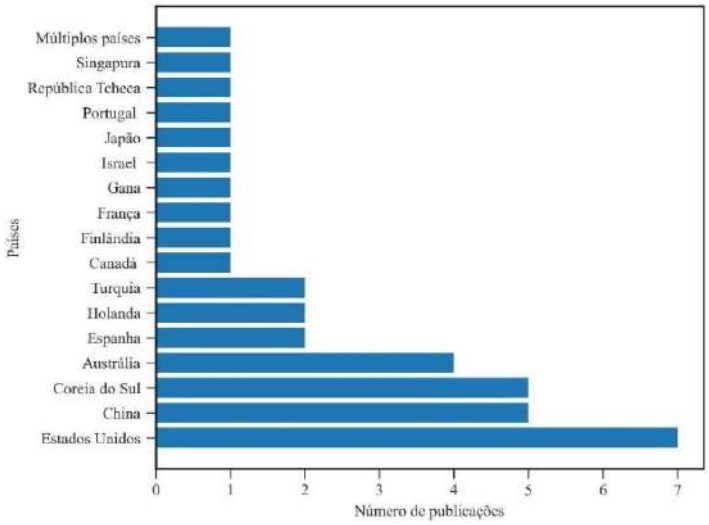


Figura 3: Países onde os trabalhos foram realizados

Na busca feita no catálogo de teses e dissertações da CAPES, apenas um trabalho sobre o tema foi encontrado. Vargas (2015) analisou a influência da forma urbana nas rotas de pedestres em Porto Alegre e concluiu que, além da distância, elementos como tamanho dos segmentos das vias, densidade de edificações e espaços abertos influenciaram o processo de decisão dos pedestres. O trabalho mostrou que os pedestres preferiram trechos de vias mais longos e com poucas travessias, ou seja, uma menor densidade de interseções atuou positivamente para a escolha de uma rota.

A Tabela 1 apresenta os atributos do ambiente urbano analisados em relação à escolha da rota pelos pedestres. Distância e tempo de viagem são frequentemente citados como determinantes para o processo de decisão, entretanto, diversos elementos do ambiente urbano também figuram como importantes. Basu e Sevtsuk (2022) mostram que o comprimento da rota explica 57% da variação no comportamento de escolha da rota, mas conseguiram melhorar o desempenho do modelo ao incluir variáveis relacionadas ao ambiente urbano. Shatu *et al.* (2019) concluíram que 34% da variação do comportamento de escolha se deve à distância, enquanto a mudança de direção explica 46%. Isso mostra que a consideração dos aspectos urbanos pode oferecer resultados mais esclarecedores sobre a preferência dos pedestres em relação às rotas.

Tabela 1: Atributos do ambiente urbano relacionados à escolha da rota dos pedestres

Grupo	Subgrupo	Descrição
Rede e geometria viária	Distância e tempo de viagem	A distância é um fator constantemente considerado pelos pedestres para minimizar o tempo de viagem (Basu *et al.*, 2024; Jin *et al.*, 2022; Shatu e Yigitcanlar, 2018; Kim *et al.,* 2016).
	Mínima mudança direcional	Rotas com menos curvas provocam efeitos positivos sobre os pedestres, que tendem a minimizar distância e mudança de direção quando possível (Kim e Gong, 2024; Jin *et al.,* 2022; Shatu *et al.*, 2019).
	Conectividade e densidade de interseções	Esses elementos refletem as diferentes ligações entre vias e caminhos em uma área, o que pode favorecer (Shatu e Yigitcanlar, 2018) ou prejudicar (Moran *et al.*, 2018) a escolha da rota.
	Largura da via e número de faixas	Pedestres tendem a evitar vias de trânsito rápido e intenso e preferem locais mais calmos (Kim e Gong, 2024; Ge *et al.*, 2023).
	Topografia e inclinação	Escadas e inclinações elevadas podem provocar barreiras ao caminhar, principalmente para idosos (Kim e Gong, 2024; Borst *et al.*, 2009).
Infraestrutura para pedestres	Largura e condição da calçada	Calçadas largas e em boas condições favorecem o caminhar (Shatu *et al.,* 2019; Ozbil *et al.*, 2016; Ferrer *et al.,* 2015).
	Travessias para pedestres	Interseções com faixas de pedestres e semáforos podem ser preferidas (Rodriguez *et al.,* 2015) ou evitadas (Dessing *et al.*, 2016) pelos pedestres.
	Iluminação pública	A iluminação contribui para a segurança dos pedestres, influenciando positivamente a escolha da rota (Jin *et al.,* 2022; Barros *et al.,* 2015; Ferrer *et al.*, 2015).
	Mobiliário urbano	A presença de bancos e lixeiras pode favorecer a escolha de uma rota, contribuindo para conveniência e segurança percebida (Jin *et al.,* 2022; Shatu *et al.*, 2019).
	Obstáculos	Elementos fixos na calçada atuam como barreiras e prejudicam o deslocamento dos pedestres (Ferrer *et al.*, 2015).
	Sinalização	A presença de placas de sinalização pode favorecer a escolha de uma rota (Argin e Ozbil, 2015).
	Estacionamento de veículos	Estacionamentos na calçada causam efeitos negativos nos pedestres, prejudicando a escolha de rotas com estacionamentos (Barros *et al.*, 2015).
Uso do solo e amenidades	Diversidade do uso do solo	Diferentes usos do solo ao longo da rota aumentam a probabilidade de escolha de rotas com essas características (Shatu e Yigitcanlar, 2018; Koh e Wong, 2013).
	Presença de comércio e lojas	Lojas e serviços podem aumentar (Ozbil *et al.,* 2016; Koh e Wong, 2013; Borst *et al.,* 2009) ou diminuir (Tribby *et al.*, 2017) a atratividade da rota.
	Instalações institucionais	Edificações com escritórios e estabelecimentos institucionais podem favorecer a escolha da rota (Shatu e Yigitcanlar, 2018).
	Densidade residencial e populacional	Edificações residenciais ao longo da rota podem influenciar positiva (Borst *et al.,* 2009) ou negativamente (Ozbil *et al.,* 2016) a escolha da rota.
	Parques e espaços verdes	Áreas verdes são associadas a rotas mais agradáveis e saudáveis (Kim e Gong, 2024; Ge *et al.,* 2023; Rodriguez *et al.,* 2015).
	Proximidade dos edifícios à calçada	O recuo das edificações à calçada provoca efeitos negativos nos pedestres, que preferem construções mais próximas (Ozbil *et al.,* 2016).
	Terrenos vazios ou abandonados	Terrenos não ocupados causam preocupação com a segurança, prejudicando a escolha da rota (Basu *et al.*, 2023).

Em relação à infraestrutura para pedestres, a Tabela 1 mostra que largura e condição da calçada, iluminação pública, presença de mobiliário urbano e sinalização são aspectos que atuam positivamente sobre o caminhar, favorecendo a escolha de rotas que possuem esses elementos. A presença de obstruções como barracas e vendedores no caminho prejudicam o deslocamento, sendo evitados pelos pedestres. Já para o uso do solo e amenidades, a presença de usos diversificados, estabelecimentos institucionais e áreas verdes aumentam a probabilidade de escolha de uma rota, enquanto terrenos vazios e edificações abandonadas são evitados. Outro fator relevante é o recuo dos edifícios em relação à calçada, pois a proximidade das fachadas provoca um efeito de vigilância passiva (Shatu *et al.*, 2019), o que favorece a percepção de segurança e, consequentemente, a escolha da rota.

Percebe-se que os estudos consideram atributos tanto na escala macro ao nível do bairro, como distância e características do uso do solo, como na escala micro ao nível da rua, como largura e condição da calçada e iluminação. Algumas variáveis como densidade de interseções, travessias para pedestres e presença de estabelecimentos comerciais e áreas residenciais apresentaram resultados conflitantes na literatura. Isso se deve a diferenças na área de análise ao redor da rota (*buffer*) (Ge *et al.*, 2023; Sarjala, 2019; Dessing *et al.,* 2016), no propósito da viagem (Jin *et al.*, 2022; Rodríguez *et al.,* 2015), nas características demográficas (Basu *et al.*, 2023; Borst *et al.*, 2009) e nas características urbanas do local de estudo (Basu e Sevtsuk, 2022; Shatu e Yigitcanlar, 2018; Guo e Loo, 2013).

Apesar da diversidade de atributos urbanos citados na literatura, existem elementos ainda pouco explorados, como qualidade do paisagismo e atratividade, cobertura de árvores, volume e velocidade do tráfego e percepção de segurança pessoal. Ainda, apenas dois trabalhos (Tribby *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2015) apresentaram análises sobre a interação e a moderação entre os atributos, o que se apresenta como limitação do estado da arte atual e oportunidades de pesquisas futuras.

4. CONCLUSÕES

A revisão mostrou que a escolha de rotas pelos pedestres é um processo complexo, influenciado não apenas pela minimização da distância e do tempo de viagem, mas também por características do ambiente urbano. Elementos da rede viária, da infraestrutura e do uso do solo atuam no processo de decisão, favorecendo ou prejudicando a escolha dos caminhos. A inclusão desses aspectos nos estudos sobre escolha de rota aprimora o entendimento sobre a percepção dos pedestres sobre o ambiente urbano e o desempenho das análises. Destaca-se ainda que os atributos podem provocar diferentes efeitos sobre o caminhar, por influência da escala de análise, do propósito da viagem, de características demográficas e da configuração espacial do local de estudo, sendo necessário considerar essas especificidades ao aplicar os resultados em outros contextos.

Viu-se que existe uma escassez de estudos sobre escolha de rota em países do Sul Global e da abordagem de atributos de paisagismo e atratividade, tráfego de veículos próximo aos pedestres e percepção de segurança, bem como a investigação dos efeitos das interações entre as variáveis. A consideração desses aspectos pode auxiliar a construção de modelos de escolha de rota mais abrangentes e que capturem as nuances dos ambientes urbanos e da experiência dos pedestres. Este trabalho buscou contribuir para um melhor entendimento sobre a relação entre o ambiente urbano e a escolha da rota pelos pedestres, de modo a auxiliar o desenvolvimento de estratégias e políticas públicas de promoção a cidades mais caminháveis, saudáveis e inclusivas e à mobilidade urbana sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argin, G. e A. Ozbil (2015) Walking to school: The effects of street network configuration and urban design qualities on route selection behaviour of elementary school students. *Proceedings of the 10th International Space Syntax Symposium.*

Barros, A. P. *et al.* (2015) A new approach to understand modal and pedestrians route in Portugal. *Transportation Research Procedia,* v. 10, p. 860-869.

Basu, N. *et al.* (2023) What do pedestrians consider when choosing a route? The role of safety, security, and attractiveness perceptions and the built environment during day and night walking. *Cities,* v. 143, v. december 2023, 104551.

Basu, R. e A. Sevtsuk (2022) How do street attributes affect willingness to walk? City-wide pedestrian route choice analysis using big data from Boston and San Francisco. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 163, n. july 2022, p. 1-19.

Basu, R. *et al.* (2024) Hot and bothered: Exploring the effect of heat on pedestrian route choice behavior and accessibility. *Cities,* v. 155, n. december 2024, 105435.

Borst, H. C. *et al.* (2009) Influence of environmental street characteristics on walking route choice of elderly people. *Journal of Environmental Psychology,* v. 29, n. 4, p. 477-484.

Dessing, D. *et al.* (2016) Children's route choice during active transportation to school: difference between shortest and actual route. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity,* v. 13, n. 48.

Ferrer, S. *et al.* (2015) A qualitative study on the role of the built environment for short walking trips. *Transportation Research Part F,* v. 33, n. august 2015, p. 141-160.

Ge, Y. *et al.* (2023) Influence of the built environment on pedestrians' route choice in leisure walking. *International Journal of Geo-Information*, v. 12, n. 9, 384.

Guo, Z. e B. P. Y. Loo (2013) Pedestrian environment and Route choice: evidence from New York City and Hong Kong. *Journal of Transport Geography*, v. 28, n. april 2013, p. 124-136.

Jin, L. *et al.* (2022) Preference for street environment based on route choice behavior while walking. *Frontiers in Public Health,* v. 10, 880251.

Kim, E. J. e Y. Gong (2024) Perceived built environments correlated to route choice for healthy leisure walking. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering,* v. 24, n. 4, p. 2936-2947.

Kim, B. *et al.* (2016) Pedestrian path choice with diagonal streets. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering,* v. 15, n. 3, p. 463-470.

Koh, P. P. e Y. D. Wong (2013) Influence of infrastructural compatibility factors on walking and cycling route choices. *Journal of Environmental Psychology*, v. 36, n. december 2013, p. 202-213.

Lee, S. e M. H. Lee (2021) Impact of neighborhood environment on pedestrian route selection among elementary schoolchildren in Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 13.

López-Lambas, M. E. *et al.* (2021) The walking health: A route choice model to analyze the street factors enhancing active mobility. *Journal of Transport & Health*, v. 22, n. september 2021, 101133.

Moran, M. R. *et al.* (2018) Examining the role of trip destination and neighborhood attributes in shaping environmental influences on children's route choice. *Transportation Research Part D,* v. 65, n. december 2018, p. 63-81.

Ozbil, A. *et al.* (2016) Pedestrian route choice by elementary school students: the role of street network configuration and pedestrian quality attributes in walking to school. *International Journal of Design Creativity and Innovation,* v. 4, n. 2, p. 67-84.

Page, M. J. *et al.* (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71.

Rodriguez, D. A. *et al.* (2015) Influence of the built environment on pedestrian route choices of adolescent girls. *Environment and Behavior,* v. 47, n. 4, p. 359-394.

Sarjala, S. (2019) Built environment determinants of pedestrians' and bicyclists route choices on commute trips. Applying a new grid-based method for measuring the built environment along the route. *Journal of Transport Geography,* v. 78, p-56-69.

Shatu, F. e T. Yigitcanlar (2018) Development and validity of a virtual street walkability audit tool for pedestrian route choice analysis – SWATCH. *Journal of Transport Geography,* v. 70, n. june 2018, p. 148-160.

Shatu, F. *et al.* (2019) Shortest path distance vs. least directional change: Empirical testing of space syntax and geographic theories concerning pedestrian route choice behaviour. *Journal of Transport Geography,* v. 74, n. january 2019, p. 37-52.

Timpabi, A. P. *et al.* (2023) The role of infrastructure and route type choices for walking and cycling in some cities in Ghana. *Urban, Planning and Transport Research*, v. 11, n. 1, 2222838.

Tribby, C. P. *et al.* (2017) Analyzing walking route choice through built environments using random forests and discrete choice techniques. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science,* v. 44, n. 6, p 1145-1167.

Vargas, J. C. B. (2015) *Forma urbana e rotas de pedestres*. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127812 (acesso em 02/07/2025).

Rafaela de Sousa Medeiros (rafaela.medeiros@academico.ufpb.br)
Luiz Bueno da Silva (bueno@ct.ufpb.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, *Campus* I, Cidade Universitária – João Pessoa, PB, Brasil.

AVALIAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DAS DIRETRIZES DO TRANSPORTE POR BICICLETAS PROPOSTAS NO PLANO DE MOBILIDADE DO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS

Edson Rodrigues da Silva Júnior, Lyneker Souza de Moura
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este estudo avalia a implementação das políticas de transporte por bicicleta previstas no Plano de Mobilidade Urbana (PMU) de São Luís/MA, identificando avanços, desafios e oportunidades de aprimoramento. A metodologia envolveu análise documental do plano, mapeamento da malha cicloviária existente e levantamento de campo em trechos representativos, considerando conservação, sinalização e integração. Os resultados indicaram que apenas 47,9% da infraestrutura planejada foi executada, com grande heterogeneidade na qualidade e conectividade das ciclovias. A estagnação na expansão da rede e a precariedade da infraestrutura aumentam os riscos para ciclistas e limitam o uso cotidiano da bicicleta. Apesar disso, iniciativas recentes, como a adesão ao Programa Bicicleta Brasil, a requalificação de trechos e a revisão do plano cicloviário, apontam para uma possível mudança de cenário. O estudo reforça a necessidade de uma abordagem sistêmica e integrada para consolidar a bicicleta como componente estratégico da mobilidade urbana sustentável em São Luís.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A gestão da mobilidade nos grandes centros urbanos brasileiros se configura como um desafio persistente, agravado pela escassez de investimentos destinados ao transporte público e pelo crescimento expressivo da motorização individual. Esse cenário tem fomentado intensos debates políticos e acadêmicos, destacando a urgência na busca por soluções que minimizem os impactos sociais e ambientais negativos (Grazi, 2021).

Nesse contexto, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída pela Lei Federal nº. 12.587/2012, estabelece como prioridade a promoção dos modos não motorizados de transporte, especialmente em municípios com mais de 20 mil habitantes. No entanto, apesar da obrigatoriedade legal, a efetivação dessas diretrizes ainda é limitada na maioria das cidades brasileiras. Lourenço e Bernardinis (2019) apontam que a PNMU carece de um processo sistemático de avaliação, e que sua efetividade depende da capacidade local de interpretar e aplicar as orientações conforme as especificidades municipais.

Entre os modos de transporte não motorizados, destaca-se o uso da bicicleta, que apresenta diversas vantagens, como a redução de impactos ambientais, a melhoria da qualidade de vida e a promoção da equidade no uso do espaço urbano (ITDP Brasil, 2021). Contudo, a implementação de políticas cicloviárias enfrenta barreiras técnicas, orçamentárias e culturais. De acordo com Monari *et al*. (2024), uma das principais dificuldades para o avanço do ciclismo em países emergentes está na ausência de diretrizes técnicas que orientem a definição de locais prioritários para investimentos.

Diante desses desafios, diversas metodologias vêm sendo propostas para nortear o planejamento de redes cicloviárias. Cardoso e Campos (2016) propuseram o Índice de Adequação do Segmento para Viagens por Bicicletas, ferramenta que permite avaliar a adequação de trechos viários para a implantação de infraestrutura cicloviária, considerando critérios técnicos e a percepção dos usuários. De forma complementar, Torres e Silva (2024) enfatizam a importância da geometria urbana, destacando aspectos como a largura e a inclinação das vias como elementos fundamentais na definição de locais apropriados para a implantação de ciclovias, especialmente em cidades de pequeno porte.

Além dos aspectos técnicos, a dimensão social desempenha papel crucial no sucesso das políticas de mobilidade por bicicleta. A participação da população no planejamento é considerada um fator decisivo para a aceitação e eficácia das intervenções. Estudos indicam que o planejamento participativo constitui um pré-requisito fundamental para que a população se aproprie dos Planos de Mobilidade Urbana Sustentável, pois contribui para aumentar a aceitação social, conferir legitimidade às ações implementadas (Glauser e Lima, 2022) e alinhar as propostas às necessidades reais dos usuários (Lourenço e Bernardinis, 2019). Elementos como a percepção de segurança, a cultura local e a imagem social da bicicleta influenciam diretamente a adesão ao modo. Nesse sentido, Silveira e Maia (2015) ressaltam que fatores como a existência de infraestrutura adequada, o comportamento dos usuários no trânsito e a sensação de segurança são

determinantes para a intenção de uso da bicicleta, sobretudo em contextos urbanos com forte predominância da cultura automobilística.

Para lidar com essa complexidade, a literatura especializada aponta que pacotes integrados de medidas são mais eficazes do que ações isoladas. Glauser e Lima (2022) argumentam que a combinação de ações diretas e indiretas tende a produzir resultados mais efetivos, englobando desde a implantação de infraestrutura cicloviária até programas de educação para o trânsito, políticas de restrição ao uso de automóveis e incentivos comportamentais.

A análise da cidade de São Luís se insere em um cenário nacional caracterizado por desafios persistentes na formulação e implementação de políticas cicloviárias. O presente estudo examina essa complexidade com base no PMU de São Luís/MA, elaborado em 2016, em consonância com os princípios orientadores da PNMU. Considerando que o plano se aproxima do fim de seu ciclo legal de dez anos, torna-se imprescindível avaliar os resultados alcançados, uma vez que não se trata de uma política recente, mas de uma estratégia cuja execução já deveria ter gerado impactos mensuráveis. Evidencia-se, portanto, a necessidade de articulação entre planejamento técnico, participação social e abordagens multidimensionais, com ênfase na priorização dos modos de transporte não motorizados e coletivos como diretriz para a promoção da equidade viária, do desenvolvimento sustentável e da inclusão social.

Assim, o objetivo central deste trabalho é avaliar a implementação das políticas de transporte por bicicleta propostas no plano de mobilidade de São Luís, identificando as vantagens e os desafios associados. A análise será conduzida com foco em três aspectos principais: a implementação da malha cicloviária e a comparação entre o planejamento e a execução; o estado de conservação das ciclovias implantadas; e a comparação com outras cidades brasileiras. Ao examinar o progresso e os impactos dessas políticas, pretende-se contribuir para o aprimoramento das políticas públicas de mobilidade, promovendo o desenvolvimento de uma cidade mais inclusiva, integrada e sustentável.

2. METODOLOGIA

Para a seleção amostral, no segundo semestre de 2024 foram escolhidos diversos segmentos representativos das ciclovias planejadas no PMU. A escolha dos segmentos para elaboração das rotas cicláveis considerou critérios como tipologia viária, relevância no sistema cicloviário municipal e estado de conservação, entre outros (Agostinho *et al*., 2016; Crow, 2007). Para a mensuração da extensão da malha viária de São Luís, foram utilizados os aplicativos móveis Adidas *Running* e Google Earth. Complementarmente, o aplicativo "Medida" e uma trena manual foram empregados para aferição precisa das dimensões das ciclovias. A Figura 1 detalha as principais rotas cicláveis presentes no PMU de São Luís (2016).



Figura 1: Localização das principais ciclovias na cidade e imagens de sua implantação

Realizou-se uma análise detalhada do plano de mobilidade, identificando as ciclovias propostas e suas características específicas. Em seguida, foi feita a coleta de dados *in loco* em cada trecho, registrando informações como existência da ciclovia, largura, condições de conservação, sinalização, conexões com outras vias e possíveis obstáculos. Os dados foram comparados com as diretrizes do plano de mobilidade para verificar a conformidade das ciclovias, sua adequação às necessidades dos ciclistas e o cumprimento das normas de segurança. Com base nas análises, foi elaborado um relatório detalhando as ciclovias implementadas corretamente, aquelas com problemas ou não construídas, e recomendações para melhorias no sistema cicloviário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A cidade de São Luís apresenta, atualmente, uma malha cicloviária composta por 40 km de ciclovias implantadas e operacionais (Aliança Bike, 2024). Este quantitativo representa menos da metade da extensão prevista no PMU de São Luís, que estabeleceu como meta a implantação de 80,9 km de infraestrutura cicloviária exclusiva até 2026, prazo de dez anos após sua publicação (São Luís, 2016). Este atraso expressivo parece indicar não apenas limitações na capacidade executiva municipal, mas também uma fragilidade histórica das políticas públicas voltadas para a mobilidade cicloviária. Tal diagnóstico evidencia a baixa priorização da bicicleta enquanto componente estratégico da mobilidade urbana sustentável.

Tabela 1: Rotas cicláveis de São Luís (MA) em 2024

Planejado	km	Não planejado e executado	km	Planejado e executado	km
Av. Daniel de La Touche	7,4	Parque do Rangedor	3,5	Av. dos Africanos	1,3
Av. dos Portugueses + Av. dos Africanos	10,2	Parque do Itapiracó	3,8	Via Expressa	4,6
Av. Camboa + Av. Beira Mar	5,1	Península	8,0	Av. Litorânea + Golden shop.	9,9
Av. dos Franceses + Av. Guajajaras	9,7	Av. Tibiri	1,4	Lagoa da Jansen	5,6
Ponte Bandeira Tribuzzi + Av. Prof Carlos Cunha	4,4	Radional	0,6	Av. São Luís Rei de França	6,0
Av. Ana Jansen + Av. dos Holandeses	3,3			Cohab + Cohatrac	8,6
Via Expressa	4,7			Av. Quarto Centenário	2,7
Av. Quarto Centenário	3,8				
Av. Colares Moreira + Jerônimo de Albuquerque	7,4				
Av. Litorânea	7,8				
Ponte José Sarney + Av. Marechael Castelo Branco	1,9				
Avs. Governador Luís Rocha + Getúlio Vargas	4,0				
Avs. Cajazeiras + Guaxenduba + Getúlio Vargas	3,7				
Cruzeiro do Anil + Cohab	3,9				
Av. Ferreira Gullar	2,2				
Rua do Egito + Av. Magalhães de Almeida	1,4				
Total (km)	80,9	**Total (km)**	17,3	**Total (km)**	38,8
Total (%)	100,0	**Total (%)**	21,4	**Total (%)**	47,9

A análise do avanço cicloviário revela lacunas significativas. Conforme a Tabela 1, apenas 47,9% da meta planejada foi implantada conforme o planejamento inicial, enquanto 21,4% das estruturas foram instaladas de forma não sistemática. A falta de continuidade na infraestrutura limita o uso da bicicleta e reforça, segundo Castañon (2011), que a insegurança é um dos principais entraves à sua adoção.

São Luís ocupa a 23ª posição na evolução da malha cicloviária entre as capitais brasileiras desde a elaboração do plano. Segundo a Aliança Bike (2024), não houve ampliação das rotas cicláveis entre 2023 e 2024. Além disso, proporcionalmente, a cidade está em 26º lugar com 3,85 km de ciclovias por 100 mil habitantes, à frente apenas de Manaus. Esse cenário reforça a urgência por infraestrutura exclusiva, dado o maior risco de acidentes em vias compartilhadas (Moreira *et al*., 2016).

A falta de infraestrutura cicloviária em São Luís tem aumentado os riscos para ciclistas, que precisam dividir espaço com veículos motorizados. Segundo dados da SMTT e do Detran-MA (2025), mais de 1.480 acidentes envolvendo ciclistas foram registrados entre 2016 e 2025, com média anual acima de 160 casos. As causas incluem sinalização deficiente, ciclovias precárias e comportamentos inseguros. Esse cenário evidencia a urgência de políticas públicas voltadas à mobilidade ativa. Em consonância, Silveira *et al*. (2013)

destacam que a construção de espaços exclusivos à circulação de bicicletas é a principal ação para garantir segurança nos deslocamentos.

São Luís tem avançado nas políticas de mobilidade ativa, impulsionada pelo Programa Bicicleta Brasil, que destinou cerca de R$ 2 milhões entre 2022 e 2024 para ampliar a infraestrutura cicloviária e promover ações educativas (Brasil, 2024). Entre as iniciativas recentes, destacam-se a requalificação de 4 km de ciclovias integradas ao transporte público na Região Central e Praia Grande (2025), a revisão do Plano Diretor Cicloviário Integrado (2024), com apoio da UFMA e do ITDP Brasil, e o programa São Luís Cidade Amiga da Bicicleta (2025), voltado à instalação de bicicletários e educação no trânsito. A experiência de outras cidades brasileiras, como Fortaleza, mostra que investimentos em infraestrutura cicloviária, aliados a políticas públicas estruturadas, podem reduzir drasticamente os índices de acidentes e ampliar a adesão ao modal (WRI Brasil, 2022).

Apesar dos avanços, a infraestrutura cicloviária da cidade permanece aquém das necessidades populacionais e das metas previstas. A consolidação de uma política cicloviária efetiva exige a execução plena dos projetos, manutenção contínua e articulação com os princípios da PNMU, como proposto por Silveira (2010) e ratificado pelo Programa Bicicleta Brasil (2018).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação da infraestrutura cicloviária em São Luís revela um grande descompasso entre o Plano de Mobilidade Urbana (2016) e sua execução até 2025. Com apenas 47,9% da meta cumprida e muitas ciclovias fora do planejamento, evidenciam-se fragilidades nas políticas públicas, comprometendo a funcionalidade da rede e o uso seguro e integrado da bicicleta como transporte viável.

O estudo revelou que, além da extensão insuficiente da malha cicloviária em São Luís, há falhas na qualidade da infraestrutura, na conectividade entre os trechos e na sinalização, comprometendo a segurança e a adesão ao uso da bicicleta. A ausência de uma abordagem sistêmica tem resultado em ações pontuais e pouco eficazes. No entanto, observa-se nos últimos anos um esforço de reestruturação institucional, com a requalificação de trechos, revisão do Plano Diretor Cicloviário e programas de educação e incentivo à intermodalidade, sinalizando avanços rumo a uma política mais integrada, apesar dos desafios persistentes. Embora as ações ainda sejam pontuais, recentes iniciativas indicam avanços, como a requalificação de 4 km de ciclovias na Região Central e Praia Grande, que melhorou pavimento e sinalização, integrou-se ao transporte público e foi acompanhada de bicicletários e programas de incentivo. Apesar de limitados, esses resultados já produzem efeitos práticos na mobilidade cotidiana.

A efetivação de uma política cicloviária eficaz vai além da infraestrutura física, exigindo planejamento integrado, gestão técnica, financiamento contínuo e inclusão social. Em São Luís, esses elementos vêm sendo aplicados por meio da revisão do Plano Diretor Cicloviário Integrado (2024), da implantação de ciclovias integradas ao transporte coletivo, da criação de bicicletários e de ações educativas, com apoio de instituições como a UFMA e o ITDP Brasil. Tais medidas evidenciam o cumprimento dos princípios da Política Nacional de Mobilidade Urbana, com foco na priorização da bicicleta, na sustentabilidade e na inclusão.

Nesse sentido, este estudo evidenciou avanços e limitações da política cicloviária em São Luís, contribuindo para o aprimoramento do planejamento urbano sob as perspectivas da equidade, sustentabilidade e segurança viária. Os resultados apresentados podem subsidiar decisões e inspirar outras iniciativas no contexto nacional. Recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem dimensões sociais, institucionais e os efeitos de longo prazo dessas políticas, ampliando a base empírica sobre mobilidade urbana ciclável.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Andrade, V.; Rodrigues, J. M.; Marino, F.; Lobo, Z. (2016) Mobilidade por bicicleta no Brasil. Rio de Janeiro: Prourb/ufrj.

Agostinho, F. M. *et al*. (2016) Ciclovias: avaliação da satisfação e dos efeitos socioambientais em São Paulo. Revista de Saúde Pública, v. 50, p. 1-9.

Aliança Bike (2024) Levantamento de Ciclovias e Ciclofaixas nas Capitais Brasileiras. São Paulo: Aliança Bike. Disponível em: https://aliancabike.org.br.

Brasil. Lei nº 12.587 (2012) Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 4 jan. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: 26 maio 2025.

Cardoso, Pablo de Barros; CAMPOS, Vânia Barcellos Gouvêa (2016) Metodologia para planejamento de um sistema cicloviário. Revista Transportes, v. 24, n. 4, p. 39-48. Disponível em: https://doi.org/10.14295/transportes.v24i4.1158. Acesso em: 21 maio 2025.

Castañon, C. A. (2011) A bicicleta como meio de transporte: um estudo sobre sua inserção na cidade de São Paulo. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

Crow (2007) *The Cycle Inclusive Planning Concepts*. *Design Manual for Bicycle Traffic*.

Departamento Estadual de Trânsito do Maranhão (2025) Dados de acidentes envolvendo ciclistas. São Luís.

Grazi, G. *et al*. (2021). Bicycle infrastructure in Brazilian cities: Challenges and solutions. Sustainability, 13(5), 2679.

Gestão da mobilidade para cidades inclusivas. São Paulo: ITDP Brasil. Disponível em: https://itdp.org/wp-content/uploads/2021/03/Gestao-da-Mobilidade-para-Cidades-Inclusivas.pdf.

Glauser, R. C. A.; Lima, J. P. (2022) Políticas de incentivo aos modos ativos nos Planos de Mobilidade Urbana Sustentável: estudo comparativo Brasil e Portugal. Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/4141.

ITDP Brasil (2025) Relatório de revisão do Plano Diretor Cicloviário Integrado de São Luís.

Lourenço, G. H.; Dal Bosco Jr, Alceu; Bernardinis, M. A. P. (2019) Respostas à Política Nacional de Mobilidade Urbana: comparativo entre capitais dos incentivos ao transporte público e à bicicleta. Revista Transportes, v. 27, n. 2, p. 1-15. Disponível em: https://www.scielo.br/j/transportes/a/H9qRwCcNhYmvXvQpQGyMhrk/?lang=pt.

Ministério das Cidades (2024) Programa Bicicleta Brasil (PBB).

Monari, M.; Segantine, P. C. L.; Rodrigues da Silva, A. N.; Rodrigues, M. R; Silva, Irineu da (2024) Comparação entre centralidades baseadas na distância e no estresse para ranquear locais prioritários para investimentos em infraestrutura cicloviária em cidades de pequeno porte. Revista Transportes, v. 32, n. 2, e2890. Disponível em: https://doi.org/10.58922/transportes.v32i2.2890.

Moreira, A. V. *et al*. (2016) Acidentes com ciclistas em vias urbanas: uma análise da relação entre infraestrutura e segurança viária. Revista Transportes, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 47–56.

Plano de Mobilidade Urbana de São Luís (2016) Produto 08: Avaliação da Infraestrutura Urbana, Viária e da Mobilidade de São Luís – Ma. São Luís: SMTT/Sistran.

Plano de Mobilidade de São Luís (2016) Produto 10: Instrumentos Institucionais Propostos – Plano Estratégico de Implantação. São Luís: SMTT/Sistran.

Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (2025) Relatório Anual de Acidentes de Trânsito. São Luís, 2025.

Silveira, J. D. L. (2010) A mobilidade urbana por bicicleta: desafios e perspectivas para sua inserção nas cidades brasileiras. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Silveira, J. D. L. *et al*. (2013) Mobilidade ativa e segurança no trânsito: uma abordagem sobre ciclovias no Brasil. Revista dos Transportes Públicos, São Paulo, n. 35, p. 89–108.

Silveira, M. O.; Maia, M. L. A. (2015) Variáveis que influenciam no uso da bicicleta e as crenças da Teoria do Comportamento Planejado. Revista Transportes, v. 23, n. 1, p. 24-36. Disponível em: https://doi.org/10.4237/transportes.v23i1.848. Acesso em: 21 maio 2025.

Torres, L. M. A.; Silva, B. O. (2024) Avaliação geométrica de vias urbanas para implantação de rotas cicláveis em uma cidade de pequeno porte. Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET. Disponível em: https://proceedings.science/p/190859?lang=pt-br.

WRI Brasil (2022) Como Fortaleza se tornou referência em mobilidade por bicicleta. Porto Alegre: WRI Brasil. Disponível em: https://wribrasil.org.br. Acesso em: 10 jun. 2025.

Edson Rodrigues da Silva Júnior (edson.junior@ufpe.br)
Lyneker Souza de Moura (lyneker.moura@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Avenida Professor Moraes Rego, s/n - Iputinga - Recife, PE, 50670-901.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SERVIÇO NA CAMINHADA À ESCOLA SOB A PERCEPÇÃO DOS ALUNOS: ESTUDO DE CASO EM MAGÉ (RJ)

Débora Pinheiro da Silva, Licinio da Silva Portugal
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Este estudo analisa os fatores de insatisfação sobre o deslocamento a pé no trajeto escolar, com base na percepção de alunos da Escola Municipal Paulo Freire, em Magé (RJ). A partir de um modelo metodológico em seis etapas, foram avaliados nove atributos da caminhabilidade, considerando simultaneamente sua importância e o grau de insatisfação percebido pelos alunos. No entanto, neste artigo, será dado destaque somente ao grau de insatisfação. Os resultados indicam que acessibilidade, estética, segurança pessoal e conforto concentram os maiores níveis de insatisfação, com variações por gênero: alunas demonstraram maior sensibilidade à segurança e à confiabilidade, enquanto alunos destacaram a estética e a acessibilidade. A análise evidencia que deficiências na infraestrutura urbana e na percepção de segurança comprometem a qualidade dos deslocamentos a pé. Conclui-se que políticas públicas devem priorizar intervenções nesses atributos críticos, promovendo trajetos escolares mais seguros, inclusivos e saudáveis, e consolidando a mobilidade ativa como estratégia integrada de saúde, educação e planejamento urbano.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade ativa, que envolve os deslocamentos feitos a pé ou de bicicleta, tem ganhado destaque como uma alternativa importante para melhorar a saúde pública, diminuir a poluição e tornar as cidades mais agradáveis para se viver (Castro & Kanashiro, 2015). No entanto, para que essa forma de mobilidade seja, de fato, uma escolha viável, é essencial contar com infraestrutura de qualidade, um ambiente seguro e políticas públicas que apoiem sua adoção.

A insatisfação dos estudantes com a caminhada até a escola evidencia barreiras físicas, ambientais e sociais — como calçadas precárias, falta de iluminação e insegurança — que comprometem a qualidade do espaço urbano e a eficácia das políticas de mobilidade (Lins et al., 2019; Vieira & Morastoni, 2013). Nesse contexto, a qualidade do acesso a pé deve ocupar lugar central no planejamento urbano, como expressão da inclusão e da justiça espacial, atendendo às necessidades de grupos diversos e integrando saberes do urbanismo, engenharia, saúde pública e psicologia ambiental (Belisario et al., 2018; Dorneles et al., 2013; Santilli et al., 2021).

As escolas têm papel estratégico na promoção da mobilidade ativa, pois o modo de deslocamento influencia hábitos futuros, saúde física e mental dos estudantes, além de gerar benefícios ambientais e reduzir o tráfego urbano(Pinheiro et al., 2017). Iniciativas como melhorias de infraestrutura, campanhas educativas e parcerias intersetoriais são fundamentais para combater o sedentarismo precoce e consolidar uma cultura de mobilidade equitativa e sustentável, reforçando a dimensão educativa do deslocamento ativo e sua conexão com a saúde pública e o direito à cidade (Coelho et al., 2018).

Diante disso, este estudo busca compreender os fatores que contribuem para a insatisfação com a qualidade percebida pelos estudantes do ensino básico ao caminharem para a escola do município de Magé (RJ), de acordo com o conceito de “Qualidade de Serviço” e respectivos atributos. A pesquisa parte do reconhecimento de que Magé apresenta grande diversidade territorial, com áreas bem estruturadas e outras com sérias carências urbanas. Essa realidade torna o município um exemplo relevante para investigar os desafios e as possibilidades de estimular o acesso à mobilidade ativa.

2. MOBILIDADE ATIVA E O CONTEXTO ESCOLAR

A mobilidade ativa no contexto escolar constitui um componente central das políticas de mobilidade urbana sustentável, ao incentivar deslocamentos a pé ou de bicicleta entre crianças e adolescentes. Os trajetos escolares representam uma oportunidade estratégica para estimular hábitos saudáveis e promover maior autonomia infantil (Prince et al., 2022; Timperio, 2004).

A revisão bibliográfica desta pesquisa identificou nove atributos de Qualidade de Serviço (QS) que influenciam diretamente a caminhabilidade no entorno escolar: facilidade de acesso (Ac) (Aguiar, 2010), rapidez (Ra) (Miao et al., 2023), conforto (CFT) (Darwish et al., 2016a), confiabilidade (CON) (Bates et al.,

2001), conveniência (CNV) (Cardoso, 2012), segurança pessoal (SEP) (Campos, 2008), segurança no trânsito (SET) (Moreno-Monroy et al., 2018), estética (EST) (Ferreira & Sanches, 2001; ager et al., 2013) e sociabilidade (SOC) (Moudon et al., 2006; Neves, 2014).

A análise dos atributos de mobilidade permite compreender como o ambiente escolar pode incentivar ou inibir a caminhada, sendo essencial para políticas públicas que promovam trajetos seguros, acessíveis e acolhedores (Carver et al., 2014; Darwish et al., 2016a). No entanto, ainda são escassos os estudos que incorporam a percepção direta dos alunos, sobretudo no ensino básico e em cidades pequenas e médias, marcadas por vulnerabilidade socioeconômica e infraestrutura precária.

A avaliação da insatisfação dos usuários surge como estratégia relevante para estimar a importância atribuída a diferentes aspectos do deslocamento, subsidiando políticas mais sensíveis à experiência cotidiana dos estudantes (Batalha, 2021). Com base nisso, este artigo fundamenta-se em uma revisão teórica que sustenta a análise da insatisfação percebida por alunos de territórios periféricos, ampliando o debate sobre mobilidade escolar em contextos pouco explorados na literatura.

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Esta pesquisa adotou a abordagem proposta por Stradling et al. (2007) para avaliar a qualidade do deslocamento a pé até a escola sob a ótica dos alunos. A escolha desse modelo justifica-se por sua flexibilidade metodológica e pela ampla aplicabilidade demonstrada em estudos voltados à avaliação da mobilidade ativa em diferentes contextos e modais de transporte. Além disso, sua estrutura em seis etapas favorece a integração de dados objetivos e subjetivos, permitindo captar com maior precisão as percepções dos usuários — especialmente no que tange à relação entre a importância atribuída a atributos da mobilidade e os níveis de insatisfação. Tal abordagem mostrou-se particularmente adequada ao contexto escolar de Magé (RJ), contribuindo para a identificação dos aspectos mais críticos da experiência cotidiana dos estudantes. O procedimento metodológico envolveu desde o planejamento e a elaboração do instrumento de coleta até a sistematização dos dados e análise dos resultados, apoiando-se em evidências experenciadas, para fundamentar propostas de intervenção voltadas à promoção, principalmente, dos deslocamentos a pé no trajeto escolar.

A pesquisa foi realizada com alunos da Escola Municipal Paulo Freire, localizada no bairro Praia de Mauá, em Magé (RJ), região de caráter predominantemente residencial, marcada por desigualdades socioeconômicas e desafios de acessibilidade no entorno escolar. A instituição atende majoritariamente estudantes do Ensino Fundamental II, público que representa mais de 80% das matrículas da escola. No total, participaram 460 alunos, sendo 357 entrevistas validadas, distribuídas entre o 6º (79 alunos), 7º (81 alunos), 8º (107 alunos) e 9º ano (90 alunos), o que corresponde a uma faixa etária aproximada de 11 a 15 anos. Essa caracterização da amostra reforça a relevância dos dados coletados para compreender a experiência cotidiana dos estudantes no deslocamento a pé para a escola.

Aplicou-se um questionário estruturado com base em nove atributos de Qualidade de Serviço identificado na revisão (item 2). Dessa forma, foi possível obter a percepção sobre a importância e também sobre o grau de insatisfação atribuídos a cada atributo, permitindo mapear as principais dificuldades relacionadas à caminhabilidade.

As questões foram elaboradas a partir da literatura e abordaram dimensões como condições das calçadas, sensação de segurança, paisagem urbana e possibilidade de interação social. Utilizou-se escala Likert para captar percepções, e a análise integrada dos dados permitiu indicar prioridades para intervenções no entorno escolar.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos dados de insatisfação dos estudantes em relação ao deslocamento a pé até a escola revelou que os atributos Acessibilidade, Estética, Segurança Pessoal e Conforto concentram os maiores níveis de insatisfação agregada, com valores entre 53% e 63%. Especificamente: Estética (62,70%) e Acessibilidade

(62,61%) apresentaram os maiores índices de insatisfação média entre os nove atributos avaliados, seguidos de perto por Segurança Pessoal (62,01%) e Conforto (53,15%).

Tabela 1: Insatisfação agregada e por gênero por atributo

Atributo	Agregado	Feminino	Masculino
	Insatisfação	Insatisfação	Insatisfação
Acessibilidade	62,61%	64,46%	64,83%
Conforto	53,15%	55,95%	50,69%
Segurança pessoal	62,01%	65,63%	58,14%
Estética	62,70%	46,58%	61,59%
Confiabilidade	35,96%	65,03%	33,09%
Segurança de tráfego	39,09%	37,20%	17,65%
Conveniência	19,14%	20,24%	32,81%
Sociabilidade	15,81%	18,45%	12,59%
Rapidez	58,53%	59,30%	60,27%

A análise segmentada por gênero revela **padrões distintos de percepção**, o que sugere a necessidade de políticas públicas **sensíveis às diferenças de gênero**. Entre as **alunas**, os maiores níveis de insatisfação foram observados em: **Confiabilidade** (65,03%); **Segurança Pessoal** (65,63%); **Rapidez** (59,30%); **Conforto** (55,95%). Já entre os **alunos**, os índices mais elevados concentram-se em: **Rapidez** (60,27%); **Acessibilidade** (64,83%); **Estética** (61,59%); **Conforto** (50,69%). Chama a atenção a **discrepância em relação à estética**, cuja insatisfação foi significativamente mais alta entre os **alunos (61,59%)** do que entre as **alunas (46,58%)**, contrariando ideais iniciais de que as meninas teriam maior sensibilidade em relação a esse aspecto.

Atributos como **Confiabilidade**, **Segurança no Tráfego** e **Conveniência** apresentaram **níveis intermediários de insatisfação**, mas com importante variação por gênero. Embora a **confiabilidade** tenha média agregada de 35,96%, ela é percebida como insatisfatória por **65,03% das alunas**, sugerindo que o planejamento urbano deve considerar medidas específicas voltadas à previsibilidade e continuidade do percurso escolar, especialmente para o público feminino.

Os atributos com **menor insatisfação agregada** foram: **Sociabilidade** (15,81%); **Conveniência** (19,14%); **Segurança no Tráfego** (39,09%). O atributo **Rapidez**, embora com média elevada (58,53%), apresentou pouca diferenciação por gênero e baixa urgência relativa, sugerindo que não constitui fator limitante prioritário para a adoção da mobilidade ativa.

Assim, a análise evidencia que **as prioridades de intervenção devem recair sobre Acessibilidade, Estética, Segurança Pessoal e Conforto**, com ênfase em medidas que reduzam a fragmentação e as desigualdades do ambiente urbano escolar. A **variação por gênero** reforça a urgência de abordagens segmentadas, com ações que reconheçam diferentes experiências de deslocamento entre meninas e meninos. Essa abordagem é coerente com os princípios da justiça espacial e da equidade no acesso à cidade.

5. CONCLUSÃO

A análise da insatisfação com a mobilidade ativa no contexto escolar de Magé (RJ) evidenciou que os atributos **Acessibilidade, Estética, Segurança Pessoal e Conforto** concentram os maiores níveis de insatisfação entre os estudantes, revelando fragilidades estruturais e ambientais que comprometem a qualidade e a atratividade do deslocamento a pé até a escola. As diferenças observadas entre os gêneros — com **alunos demonstrando maior insatisfação com a acessibilidade e a estética**, e **alunas com níveis mais elevados de desconforto em relação à segurança pessoal e à confiabilidade** — reforçam a necessidade de políticas públicas sensíveis às distintas percepções e experiências dos usuários.

A metodologia adotada, fundamentada em Stradling et al. (2007), permitiu captar, de forma sistemática e integrada, tanto a importância atribuída quanto o grau de insatisfação percebido em relação aos atributos da caminhabilidade. Essa abordagem revelou lacunas críticas na infraestrutura urbana, na percepção de segurança e na acessibilidade ao ambiente escolar, especialmente para grupos historicamente vulnerabilizados, apontando para a urgência de intervenções direcionadas e baseadas em evidências. Resultados semelhantes são observados em estudos nacionais e internacionais, como os de Schlossberg et al. (2006b),Darwish et al. (2016b), Medrano & Carvalho (2021) e Humberto et al. (2020), que também identificam a acessibilidade, segurança e conforto como fatores-chave de insatisfação nos deslocamentos escolares a pé, particularmente em contextos urbanos periféricos.

Os achados deste estudo reforçam que a promoção da mobilidade ativa no contexto escolar exige uma abordagem intersetorial, que articule **planejamento urbano, políticas educacionais e estratégias de saúde pública**. Ao priorizar os atributos mais críticos identificados, gestores públicos, educadores e urbanistas poderão desenvolver trajetos mais seguros, acolhedores e inclusivos. Mais do que facilitar o deslocamento a pé, trata-se de incentivar uma cultura urbana comprometida com a equidade no acesso aos espaços, o bem-estar coletivo e a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, F. de O. (2010). *Acessibilidade Relativa dos Espaços Urbanos para Pedestres com Restrições de Mobilidade* [Tese de Doutorado]. Escola de Engenharia de São Paulo, USP.

Bates, J., Polak, J., Jones, P., & Cook, A. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *37*(2–3), 191–229. https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00011-9

Belisario, T. M. M., WAGNER, M. S., ALVES, A. C. D., ANGELIM, P. B., & SANTIAGO, Z. M. P. (2018). A ACESSIBILIDADE NO PROCESSO DE INCLUSÃO NAS ESCOLAS PÚBLICAS DE FORTALEZA. *Blucher Design Proceedings*, 477–488. https://doi.org/10.5151/eneac2018-037

Campos, J. , 2008. (2008, June). O sentimento de insegurança na cidade do Rio de Janeiro: As percepções e a mudança na rotina de vida. *Fórum Da 26ª Reunião Brasileira de Antropologia*.

Cardoso, B. C. (2012). *UM PROCEDIMENTO PARA A TRANSFERÊNCIA MODAL DO USUÁRIO DO ÔNIBUS PARA O TREM* [Tese de Doutorado]. UFRJ.

Castro, C. C. de, & Kanashiro, M. (2015). MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: PROPOSTA DE UM SISTEMA CICLOVIÁRIO PARA LONDRINA. *Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes*, *3*(8). https://doi.org/10.17271/23178604382015984

Coelho, V. A. C., Aquino, M. A. M. e, Montebelo, M. I. de L., & Tolocka, R. E. (2018). (Des) Valorização da atividade física na pré-escola por professores. *Revista Brasileira de Ciências Do Esporte*, *40*(4), 381–387. https://doi.org/10.1016/j.rbce.2018.03.013

Cozens, P., Neale, R., Whitaker, J., & Hillier, D. (2003). Managing crime and the fear of crime at railway stations—a case study in South Wales (UK). *International Journal of Transport Management*, *1*(3), 121–132. https://doi.org/10.1016/j.ijtm.2003.10.001

Darwish, N., Gabr, H., & Shehayeb, D. (2016a). Where do Cairene Children Walk to Primary School? *Procedia Environmental Sciences*, *34*, 411–422. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.036

Darwish, N., Gabr, H., & Shehayeb, D. (2016b). Where do Cairene Children Walk to Primary School? In A. Sotoca, A. Catalani, M. Y. Ghoneem, & M. S. Amer (Eds.), *IMPROVING SUSTAINABILITY CONCEPT IN DEVELOPING COUNTRIES (ISCDC)* (Vol. 34, pp. 411–422). ELSEVIER SCIENCE BV. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.036

D'Haese, S., Vanwolleghem, G., Hinckson, E., De Bourdeaudhuij, I., Deforche, B., Van Dyck, D., & Cardon, G. (2015). Cross-continental comparison of the association between the physical environment and active transportation in children: a systematic review. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, *12*(1), 145. https://doi.org/10.1186/s12966-015-0308-z

Dorneles, V. G., Afonso, S., & Bins Ely, V. H. M. (2013). O DESENHO UNIVERSAL EM ESPAÇOS ABERTOS: UMA REFLEXÃO SOBRE O PROCESSO DE PROJETO. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, *1*(8). https://doi.org/10.4237/gtp.v1i8.251

Ferreira, M. A. G. ;, & Sanches, S. P. ,. (2001). Índice de Qualidade das Calçadas – IQC. *Revista Dos Transportes Públicos*.

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research

directions. *Journal of Transport Geography*, *12*(2), 127–140. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

Hager, E. R., Witherspoon, D. O., Gormley, C., Latta, L. W., Pepper, M. R., & Black, M. M. (2013). The perceived and built environment surrounding urban schools and physical activity among adolescent girls. *Annals of Behavioral Medicine*, *45*(SUPPL.1). https://doi.org/10.1007/s12160-012-9430-1

Humberto, M., Moura, F., & Giannotti, M. (2021). Can outdoor activities and inquiry sessions change the travel behavior of children and their caregivers? Empirical research in public preschools in São Paulo (Brazil). *Journal of Transport Geography*, *90*. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102922

Humberto, M., Pizzol, B., Moura, F., Giannotti, M., & de Lucca-Silveira, M. P. (2020). Investigating the Mobility Capabilities and Functionings in Accessing Schools Through Walking: A Quantitative Assessment of Public and Private Schools in São Paulo (Brazil). *Journal of Human Development and Capabilities*, *21*(2), 183–204. https://doi.org/10.1080/19452829.2020.1745163

Kotoula, K., Botzoris, G., Morfoulaki, M., & Aifandopoulou, G. (2017). The existing school transportation framework in Greece - Barriers and problems comparing to other European countries. *Transportation Research Procedia*, *24*, 385–392. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.096

Lins, L. S. C., Santana, L. A. C. de, Souza, B. T. C. de, & Santos, C. A. B. (2019). Schooling of Itinerant Children: Circus Families – A bibliographical Study. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, *6*(11), 511–519. https://doi.org/10.22161/ijaers.611.76

Medrano, R. M. A., & Carvalho, W. L. (2021). Factors that influence the evaluation of the "Caminho da Escola" Program: An analysis based on the perception of managers, school principals and members of the social monitoring and control council. *Case Studies on Transport Policy*, *9*(4), 1677–1687. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.09.002

Miao, S., Li, T., Zheng, L., Tan, B., & Ma, Q. (2023). Analysis of Factors Affecting Walking Speed Based on Natural Field Data: Considering the Attributes of Travelers and the Travel Environment. *Sustainability*, *15*(14), 11433. https://doi.org/10.3390/su151411433

Moreno-Monroy, A. I., Lovelace, R., & Ramos, F. R. (2018). Public transport and school location impacts on educational inequalities: Insights from São Paulo. *Journal of Transport Geography*, *67*, 110–118. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.08.012

Moudon, A. V., Lee, C., Cheadle, A. D., Garvin, C., Johnson, D., Schmid, T. L., Weathers, R. D., & Lin, L. (2006). Operational Definitions of Walkable Neighborhood: Theoretical and Empirical Insights. *Journal of Physical Activity and Health*, *3*(s1), S99–S117. https://doi.org/10.1123/jpah.3.s1.s99

Neves, J. M. de J. (2014). *Os Atributos da Qualidade de Serviço para Pedestres no Contexto de Megaeventos Esportivos: O Caso do Estádio do Maracanã* [Dissertação de mestrado]. UFRJ.

New Zealand Transport Agency – NZTA. (2009). *Pedestrian planning and design guide*.

Pinheiro, L. E., Trindade, R. F. C. da, Silva, M. A. I., Machado, D. R. L., & Santos, C. B. dos. (2017). PRÁTICA DE ATIVIDADE FÍSICA DE ESCOLARES DO 4º E 5º ANOS DO ENSINO FUNDAMENTAL DA REDE PÚBLICA ESTADUAL. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, *23*(4), 308–313. https://doi.org/10.1590/1517-869220172304143657

Prince, S. A., Lancione, S., Lang, J. J., Amankwah, N., de Groh, M., Garcia, A. J., Merucci, K., & Geneau, R. (2022). Are people who use active modes of transportation more physically active? An overview of reviews across the life course. *Transport Reviews*, *42*(5), 645–671. https://doi.org/10.1080/01441647.2021.2004262

Santilli, D., D'Apuzzo, M., Evangelisti, A., & Nicolosi, V. (2021). Towards Sustainability: New Tools for Planning Urban Pedestrian Mobility. *Sustainability*, *13*(16), 9371. https://doi.org/10.3390/su13169371

Schlossberg, M., Greene, J., Phillips, P. P., Johnson, B., & Parker, B. (2006a). School trips: Effects of urban form and distance on travel mode. *Journal of the American Planning Association*, *72*(3), 337–346. https://doi.org/10.1080/01944360608976755

Schlossberg, M., Greene, J., Phillips, P. P., Johnson, B., & Parker, B. (2006b). School trips: Effects of urban form and distance on travel mode. *Journal of the American Planning Association*, *72*(3), 337–346. https://doi.org/10.1080/01944360608976755

Timperio, A. (2004). Perceptions about the local neighborhood and walking and cycling among children. *Preventive Medicine*, *38*(1), 39–47. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2003.09.026

Vieira, R., & Morastoni, R. (2013). Qualidade das calçadas na cidade de Camboriú/SC: em busca da acessibilidade e mobilidade sustentável para área turística. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Turismo*, *7*(2), 239–259. https://doi.org/10.7784/rbtur.v7i2.516

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS ESPAÇOS PÚBLICOS PARA PEDESTRES SEGUNDO A PERCEPÇÃO DO USUÁRIO: ESTUDO DE CASO NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Felipe Pereira da Silva, Otavio Henrique da Silva
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO
Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade dos espaços públicos para pedestres no Campus Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília (UnB), com base na percepção de seus usuários. Para isso, foi elaborada uma escala do tipo Likert composta por dez indicadores, cujo somatório final (0 a 50) foi associado a diferentes níveis de percepção de caminhabilidade. Também foi analisado o nível de satisfação geral dos pedestres em relação aos espaços caminháveis. Os resultados indicaram que a escala apresentou consistência interna adequada (α de Cronbach = 0,723) e que a maioria dos participantes classificou a qualidade dos espaços como Regular. Observou-se ainda uma correlação moderada (R = 0,66) entre o resultado da escala e o nível de satisfação, sugerindo que o instrumento é eficaz para representar a experiência dos usuários. Esses achados destacam a relevância da percepção do pedestre como forma de apoiar o planejamento e gestão da infraestrutura universitária.

1. INTRODUÇÃO

No contexto de uma crescente urbanização e da necessidade de adotar práticas mais sustentáveis nas cidades, a mobilidade a pé surge como uma alternativa aos modos de transporte motorizados. Além de contribuir para a redução dos impactos ambientais, o deslocamento a pé promove benefícios significativos à saúde da população e representa uma opção economicamente acessível, especialmente para viagens de curta distância (Singh, 2016). A partir disso, Stefánsdóttir *et al*. (2024) afirmam que é fundamental que os espaços destinados à circulação de pedestres apresentem condições de qualidade satisfatórias, para que os deslocamentos a pé sejam realizados de forma adequada.

Frente a essas questões, Ferreira e Sanches (2001) afirmam que a avaliação da qualidade dos espaços para caminhada é crucial para determinar o nível de serviço que eles proporcionam aos transeuntes, servindo como uma ferramenta essencial para o planejamento urbano. A qualidade dos ambientes caminháveis abrange diversos fatores, como as condições de fluidez, segurança e conforto oferecidos durante a caminhada (Santos *et al*., 2022). Nesse sentido, a percepção dos usuários torna-se um elemento de extrema importância para avaliar o grau de utilidade do passeio e compreender a relação do indivíduo com o sistema oferecido.

Quando se trata de campi universitários, a relevância de estudos específicos é acentuada, pois, em comparação com grandes centros urbanos, esses ambientes possuem uma menor diversidade de atividades e um público-alvo bem definido, tornando a compreensão da percepção dos seus usuários fundamental (Silva *et al*., 2020). Avaliar a qualidade dos ambientes caminháveis em campi universitários permite identificar as principais falhas e problemas, possibilitando um planejamento direcionado para a solução de situações conflitantes e promovendo a mobilidade sustentável dentro do ambiente acadêmico.

Nesse cenário, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a qualidade dos espaços públicos para pedestres no Campus Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília (UnB), a partir da percepção de seus usuários. Busca-se, assim, contribuir para o planejamento e a gestão da infraestrutura de campi universitários, visando aprimorar a segurança, o conforto e a acessibilidade dos seus espaços para toda a comunidade acadêmica.

2. MÉTODO

Com o intuito de analisar como os pedestres percebem a qualidade dos ambientes destinados à caminhada no Campus Darcy Ribeiro, foi desenvolvido e aplicado um questionário. A estrutura do instrumento baseou-se em uma escala do tipo Likert, permitindo que os participantes avaliassem dez indicadores associados à qualidade dos espaços caminháveis. Após a coleta dos dados, foram conduzidas análises estatísticas com o objetivo de verificar a consistência e confiabilidade do instrumento, bem como de subsidiar a interpretação dos resultados.

2.1. Área de estudo

A Universidade de Brasília (UnB) é a principal instituição pública de ensino superior do Distrito Federal, contando com quatro campi estrategicamente distribuídos pelo território da unidade federativa. O maior e mais

tradicional deles é o Campus Darcy Ribeiro, localizado na Asa Norte, entre a via L3 Norte e as margens do Lago Paranoá. Com uma área aproximada de 400 hectares, diversas atividades são desenvolvidas em seu interior, sendo frequentado por mais de 50 mil pessoas diariamente (UnB, 2024).

Destaca-se que a grande extensão territorial do campus, aliada ao seu crescimento disperso ao longo do tempo, resultou em significativas distâncias entre os prédios que o compõem. Essa configuração desconcentrada acaba por desestimular a caminhada como modo de deslocamento interno, tornando os trajetos mais longos e, em muitos casos, pouco acessíveis. Nos últimos anos, entretanto, a qualidade da infraestrutura destinada aos pedestres dentro do campus tem recebido maior atenção, com ações como a revitalização de calçadas e a ampliação do sistema de iluminação, por exemplo (UnB, 2022). Essa iniciativa busca tornar os deslocamentos a pé mais confortáveis, seguros e atraentes, promovendo um ambiente mais favorável à mobilidade ativa.

2.2. Escala de Percepção de Caminhabilidade

Considerando as particularidades do ambiente de um campus universitário, foi elaborada uma escala com dez indicadores de percepção de qualidade dos espaços para caminhada, mensuráveis a partir de afirmativas do tipo Likert (Tabela 1). Esses indicadores foram selecionados tendo como base o Índice de Serviço das Calçadas (ISC), metodologia originalmente desenvolvida para definição do Nível de Serviço de calçadas em pequenas cidades (Silva e De Angelis Neto, 2019).

Tabela 1: Indicadores e afirmações da escala de percepção de caminhabilidade

Indicador	Afirmação
Segurança	Não é comum que os veículos precisem passar pelas calçadas para acessar estacionamentos e prédios no campus, o que evita conflito com pedestres nesses locais.
Construção e manutenção	As calçadas do campus estão malconservadas, apresentando rachaduras e outros defeitos. *
Seguridade	Os espaços para caminhadas no campus contam com a presença de outros pedestres, agentes de segurança e são bem iluminados à noite, o que faz com que eu me sinta mais seguro(a) ao caminhar.
Atratividade	É agradável caminhar no campus, já que os espaços são limpos e bem cuidados.
Arborização da calçada	Os caminhos para pedestres no campus são bem sombreados por árvores.
Largura efetiva	As calçadas apresentam largura adequada para passagem dos pedestres, não havendo obstáculos nesses locais.
Sinalização e rampas	Me sinto seguro(a) ao atravessar as ruas no campus, pois há faixas de pedestres e rampas nas travessias.
Inclinação longitudinal	Em muitos lugares há calçada muito inclinadas no sentido lateral, na direção dos prédios para as ruas, o que deixa a caminhada desconfortável. *
Inclinação transversal	Existem muitas subidas no campus, o que faz com que seja cansativo caminhar. *
Desníveis	Nas calçadas, há muitos desníveis e degraus. *

*Afirmações negativas.

Cada afirmação apresentada no questionário foi avaliada por meio de uma escala de 6 pontos, a partir de uma das seis possíveis respostas: Discordo totalmente; Discordo; Discordo parcialmente; Concordo parcialmente; Concordo; e Concordo totalmente. Para as afirmações positivas, foi atribuída uma pontuação de 0 a 5 pontos, seguindo uma progressão direta quanto maior o nível de concordância do respondente. No entanto, para as afirmações formuladas de maneira negativa, incluídas intencionalmente para evitar viés de resposta, foi necessário aplicar um processo de inversão das pontuações. Assim, no caso de um item negativo, uma resposta “Concordo totalmente” equivale a 0 pontos, enquanto “Discordo totalmente” corresponde a 5 pontos, por exemplo. Esse ajuste visa garantir que todas as respostas reflitam corretamente a percepção positiva dos pedestres em relação à qualidade dos espaços avaliados.

O total de pontos possíveis na escala é de 50, considerando as dez afirmações propostas. Com base nesse somatório, a percepção de caminhabilidade dos pedestres é classificada em cinco categorias distintas, sendo elas: Péssima (0 a 9 pontos); Ruim (10 a 19 pontos); Regular (20 a 30 pontos); Boa (31 a 40 pontos); e Ótima (41 a 50 pontos). Essa classificação permite interpretar de forma mais objetiva a percepção de qualidade dos espaços de caminhada avaliados.

2.3. Coleta e Análise de Dados

Para diagnosticar a percepção dos pedestres em relação à qualidade dos espaços destinados à caminhada, foi aplicado um questionário por meio de uma plataforma digital. A primeira etapa do instrumento consistiu no preenchimento da escala de percepção do usuário. Em seguida, foi solicitada uma avaliação do nível de satisfação geral em relação aos espaços para caminhada, utilizando uma escala do tipo Diferencial Semântico

de 11 pontos, variável de 0 (Nada satisfeito) a 10 (Muito satisfeito). Essa pergunta teve como objetivo captar uma visão mais ampla dos usuários, complementando os dados da escala de percepção. Por fim, o questionário incluiu um conjunto de perguntas voltadas à caracterização do perfil dos participantes. Foram coletadas informações como gênero, faixa etária e o principal modo de transporte utilizado para se locomover até o Campus Darcy Ribeiro. Também foi investigado se a pessoa possuía alguma limitação de mobilidade.

Após a coleta dos dados, foi verificado, por meio do escore z e do método dos quartis, a existência de *outliers*, com o objetivo de verificar a existência de opiniões muito divergentes, que devem ser excluídas da pesquisa. Com os dados tratados, foi aferida a consistência interna da escala de percepção a partir do coeficiente α de Cronbach. Segundo o teste, um valor baixo para o coeficiente indica ausência de correlação entre os itens da escala, e um valor alto revela uma redundância entre os itens. Dessa forma, o valor do coeficiente deve estar entre 0,70 e 0,95 para a escala ser entendida como adequada (Terwee *et al*., 2007).

Então, foram conduzidas análises estatísticas a partir dos dados coletados. Primeiro, a partir do teste Qui-Quadrado de independência, adotando um nível de significância de 5%, foi possível analisar se gênero e modo de transporte utilizado para acessar o campus (considerando os dois modos mais utilizados pelos usuários locais: carro e transporte público) apresentam associação com os indicadores de qualidade componentes da escala. Depois, considerando que a amostra apresenta distribuição normal (n>30), verificou-se se há diferenças nas opiniões entre os grupos de usuários mencionados, em relação à percepção da caminhabilidade como um todo. Para isso, considerando um nível de confiança de 95%, foi utilizado o Teste t de Student para amostras independentes, assumindo variâncias equivalentes. Finalmente, foi investigado se existia correlação entre a percepção da qualidade dos espaços caminháveis (escala de 0 a 50 pontos) e a satisfação geral do usuário (escala de 0 a 10 pontos), através do cálculo do Coeficiente de Correlação de *Pearson* (R).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O formulário foi aplicado no período de 02 junho a 01 de julho de 2025, totalizando 51 respostas. Todos os participantes declararam frequentar o Campus Darcy Ribeiro e utilizar a infraestrutura destinada à caminhada. Dessa forma, foi possível considerar integralmente todos os participantes na pesquisa.

3.1. Caracterização da amostra de respondentes

Com base nos dados coletados, observou-se que 51,0% dos respondentes se identificam com o gênero masculino, 43,1% com o gênero feminino e 5,9% com outro gênero ou preferiram não informar. Quanto à faixa etária, verificou-se que a maioria dos participantes (84,3%) possui entre 18 e 25 anos, o que era esperado, considerando-se o contexto universitário da pesquisa. Além dessa faixa, 7,8% dos respondentes possuem entre 26 e 35 anos, 5,9% entre 36 e 45 anos e 2,0% mais de 60 anos. No que se refere ao principal modo de transporte utilizado para acessar o campus, 56,9% indicaram o ônibus ou ônibus e metrô (transporte público) como principal modo de acesso ao campus, seguidos por 39,2% que utilizam o carro e 3,9% que se deslocam a pé. Não foram registradas respostas indicando o uso de motocicletas ou bicicletas. Adicionalmente, 3 participantes (5,9%) declararam possuir alguma limitação de mobilidade.

3.2. Análises estatísticas dos dados obtidos

A análise estatística foi iniciada com a verificação do escore z e dos quartis em relação aos valores do somatório da escala de percepção. Não foram identificados *outliers*, o que permitiu a inclusão de todas as respostas nas análises subsequentes. Em seguida, foi calculado o coeficiente α de Cronbach, que resultou em um valor de 0,723, indicando consistência interna adequada para a escala proposta.

Ao analisar a frequência das respostas na escala de percepção, observou-se que os indicadores Construção e manutenção e Seguridade foram os mais mal avaliados, apresentando frequências de 88% e 75%, respectivamente, nas três respostas mais desfavoráveis da escala. Esses resultados indicam uma percepção negativa por parte dos pedestres quanto às condições construtivas e à segurança pessoal dos espaços destinados à caminhada no campus, apontando aspectos que necessitam de maior atenção na gestão local, atualmente. A avaliação negativa do indicador Construção e manutenção pode estar relacionada às dificuldades de manutenção contínua da infraestrutura do campus, que em alguns pontos foi construída há mais de seis décadas. Essa situação é ainda mais desafiadora devido à grande extensão territorial do campus e à limitação de recursos disponíveis para a manutenção. Quanto à Seguridade, acredita-se que os respondentes não se

sintam seguros ao caminhar pelo campus, especialmente à noite, devido à presença de áreas mal iluminadas.

Os indicadores Desníveis e Inclinação transversal apresentaram uma percepção um pouco abaixo da média, com frequências de 51% e 49%, nessa ordem, nas três opções mais negativas da escala. Já os indicadores Atratividade e Largura efetiva registraram frequência de 63% nas três opções mais positivas, enquanto o Inclinação longitudinal obteve 65% e a Arborização das Calçadas alcançou 73%, refletindo uma percepção moderadamente positiva dos usuários em relação a esses elementos. As melhores percepções foram observadas para os indicadores Sinalização e rampas e Segurança, com frequências de 80% e 82%, respectivamente, nas três opções mais positivas. Esses resultados sugerem que, apesar da infraestrutura geral do campus apresentar algumas deficiências de conservação, os dispositivos de sinalização atendem razoavelmente às necessidades dos pedestres. Além disso, a percepção dos usuários indicou que as calçadas do Campus Darcy Ribeiro proporcionam um bom grau de separação entre o fluxo de pedestres e o tráfego de veículos motorizados.

Com relação à percepção sobre a qualidade dos espaços para caminhada, medida pelo escore final da escala, 17,6% dos participantes (n=9) apresentaram percepção classificada como Ruim, 45,1% (n=23) como Regular e 37,3% (n=19) como Boa. Para nenhum participante foi atribuída a percepção Péssima ou Ótima.

Então, aplicou-se o teste qui-quadrado de independência, que indicou que o gênero está associado (p<0,05) apenas ao indicador Seguridade. Como esse indicador foi, em geral, pior avaliado pelo público feminino, entende-se que esse segmento é mais exigente em relação à segurança pessoal do que os respondentes do grupo masculino. No caso do modo de transporte, o qui-quadrado não indicou relação de dependência entre essa variável e os indicadores de qualidade. Já o teste t de Student não encontrou diferença estatisticamente significativa entre as percepções de caminhabilidade femininas e masculinas (p=0,66), públicos que apresentaram escore total médio de 27,0 e 27,9 pontos, respectivamente. Porém, o teste t indicou diferença significativa nas percepções de caminhabilidade ao comparar os usuários que utilizam carro e aqueles que utilizam transporte público (p=0,03), grupos com pontuações médias na escala iguais a 30,0 e a 25,5, nessa ordem. Esse resultado corrobora o entendimento de que os usuários do transporte público, mais dependentes da infraestrutura de caminhada, tendem a ser mais críticos com sua qualidade.

Finalmente, foi determinado o nível de satisfação dos usuários em relação à qualidade dos espaços para caminhada no campus. Foi encontrado um valor médio de 6,3 pontos, indicando uma satisfação moderada. A frequência de respostas obtidas pela escala de satisfação é mostrada na Figura 1. Ao associar os valores de percepção de caminhabilidade e satisfação, ambos considerados paramétricos, obteve-se um coeficiente de Pearson de 0,66. Esse valor indica uma associação moderada e positiva entre as duas variáveis. Portanto, o resultado sugere que a escala proposta para medir a percepção da qualidade dos espaços caminháveis é capaz de representar, de maneira razoável, a satisfação dos usuários com o ambiente de caminhada no campus.

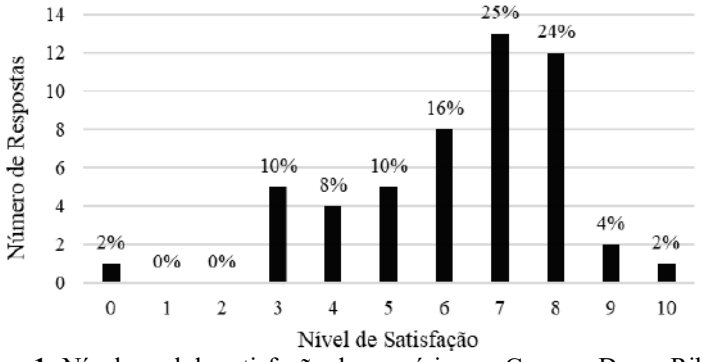


Figura 1: Nível geral de satisfação dos usuários no Campus Darcy Ribeiro

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi desenvolvida uma escala para medir a percepção dos pedestres em relação à qualidade dos espaços caminháveis de campi universitários. O instrumento foi aplicado junto a 51 usuários do Campus Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília, e apresentou consistência interna considerada adequada (α de Cronbach = 0,723). Analisando os dados coletados, observou-se uma maior exigência dos respondentes quanto aos indicadores Construção e manutenção e Seguridade, sugerindo que esses aspectos são percebidos de forma

mais crítica na experiência de caminhar pelo campus. No que diz respeito à percepção de caminhabilidade, a maioria dos usuários apresentou percepção Regular (39,2%) ou Boa (43,1%). O Teste t revelou que não houve diferença significativa entre as percepções feminina e masculina (p>0,05). No entanto, foi encontrada diferença significativa na percepção da qualidade dos espaços entre usuários de carro e de transporte público (p<0,05). O estudo também investigou a relação entre a percepção de caminhabilidade e a satisfação dos pedestres, encontrando uma correlação moderada entre as duas variáveis (R = 0,66).

Os resultados obtidos a partir das análises realizadas sugerem que a escala desenvolvida é um instrumento que pode ser utilizado para avaliar espaços para pedestres em campi universitários, especialmente por incorporar diretamente a percepção dos usuários. Essa abordagem torna-se particularmente valiosa para gestores e planejadores, pois possibilita diagnósticos mais sensíveis às necessidades reais da comunidade acadêmica, contribuindo para intervenções mais direcionadas e eficazes.

Entre as limitações do presente estudo, destaca-se a reduzida taxa de adesão ao questionário, a qual impossibilitou a realização de análises estatísticas mais aprofundadas, como comparações entre as diferentes faixas etárias e os distintos perfis de participantes, que incluem discentes de graduação e pós-graduação, docentes e técnico-administrativos. Além disso, observa-se que a seleção dos indicadores utilizados na escala, embora baseada em uma metodologia consolidada, poderia ser aprimorada com a inclusão de variáveis mais específicas ao contexto de um campus. Diante disso, recomenda-se que pesquisas futuras se dediquem à investigação mais aprofundada dos indicadores de caminhabilidade e à ampliação da aplicação do instrumento em outros campi universitários com maior número de respondentes, o que permitirá uma melhor compreensão da qualidade dos espaços voltados ao pedestre e subsidiará o planejamento e a gestão da caminhabilidade em contextos universitários.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ferreira, M. A. G. e S. da P. Sanches (2001). Índice de Qualidade das Calçadas – IQC. *Revista dos Transportes Públicos*, v. 1, n. 91, p. 47-60. Disponível em: https://files.antp.org.br/2016/4/5/revista-completa-91.pdf (acesso em 02/07/2025)

Santos, T.; F. Ramalhete; R. P. Julião e N. P. Soares (2022). Sustainable living neighbourhoods: Measuring public space quality and walking environment in Lisbon. *Geography and Sustainability*, v. 3, n. 4, p. 289-298. DOI: 10.1016/j.geosus.2022.09.002

Silva, O. H. da; C. A. R. Gobbo; L. P. V. de Araújo Jr. e S. da P. Sanches (2020). Proposta de Instrumento Para Avaliação da Caminhabilidade em Campi Universitários. *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, n. 54, p. 93-103. DOI: 10.59072/rper.vi54.177

Silva, O. H. da e G. De Angelis Neto (2019). Índice de Serviço das Calçadas (ISC). *Ambiente Construído*, v. 19, n. 1, p. 221-236. DOI: 10.1590/s1678-86212019000100303

Singh, R (2016). Factors affecting walkability of neighborhood. *Procedia - Social and Behavioral Science*, v. 216, n. 2016, p. 643-654. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.12.048

Stefánsdóttir, H.; Mouratidis, K.; Rynning, M. K. e S. F. Meyer (2024). Perceived walkability and daily walking behaviour in a "small city context" – The case of Norway. *Journal of Transport Geography*, v. 121. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2024.104014

Terwee, C. B.; S. D. M. Bot; M. R. de Boer; D. A. W. M. van der Windt; D. L. Knol; J. Dekker; L. M. Bouter e H. C. W. Vet (2007). Quality criteria were proposed for measurement properties of health status questionnaires, *Journal of Clinical Epidemiology*, v. 60, p. 34-42. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2006.03.012

UnB, Decanato de Planejamento, Orçamento e Avaliação Institucional (2024). Anuário Estatístico. Disponível em: https://anuario2024.netlify.app/ (acesso em 02/07/2025)

UnB, UnB Notícias (2022). UnB instala postes com botões para comunicação direta com Central de Segurança. Disponível em: https://noticias.unb.br/76-institucional/5861-unb-instala-postes-com-botoes-para-comunicacao-direta-com-central-de-seguranca (acesso em 06/07/2025)

Felipe Pereira da Silva (pereiradasilva.felipe33@gmail.com)
Otavio Henrique da Silva (otavio.silva@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes
Anexo SG-12, 1º andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CAMINHABILIDADE EM PORTO ALEGRE/RS SEGUNDO A PERCEPÇÃO DE SEUS CIDADÃOS E OS MODOS COMO SE DESLOCAM

Matheus Lemos Nogueira[1, 2], **Mônica Regina Garcez**[1]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Universidade Federal do Paraná

RESUMO
Este artigo apresenta um estudo de caso realizado em Porto Alegre/RS. O objetivo foi investigar possíveis diferenças nas percepções de cidadãos do município sobre as condições de caminhabilidade nas vias públicas próximas de onde residem, conforme o principal modo de transporte utilizado nos seus deslocamentos rotineiros. Para isso, foi aplicado um questionário em plataforma *online* e coletadas 480 respostas válidas. Primeiro foram analisadas 21 questões e, após, identificados 6 fatores característicos a partir de Análise Fatorial Exploratória. Diferenças nos níveis de satisfação dos grupos analisados foram encontradas. Dentre elas, as pessoas que mais caminham atribuíram as maiores notas para diversos aspectos da caminhabilidade, enquanto os passageiros de ônibus/lotação as menores. Quanto aos fatores característicos, os usuários da mobilidade ativa demonstraram nível de satisfação elevado com relação às interações sociais, enquanto os passageiros de ônibus/lotação apresentaram insatisfação quanto à interferência dos veículos (nos deslocamentos que realizam caminhando). O estudo ajuda a reforçar a importância de entender diferentes perspectivas das pessoas a respeito das condições de caminhabilidade e pode contribuir no embasamento de políticas públicas que incentivem o uso da caminhada.

1. INTRODUÇÃO

Caminhar é uma forma básica de deslocamento e incentivar a caminhabilidade é uma maneira importante de promover a sustentabilidade no ambiente urbano. A escala humana das cidades e como o seu espaço é preparado para os cidadãos é assunto discutido por diversos autores. Speck (2012) menciona que vias robustas, calçadas precárias, corte de árvores e estacionamentos enormes tornaram a vida dos pedestres nos Estados Unidos da América uma possibilidade teórica. Litman (2014) reforça que caminhar e andar de bicicleta por lá é difícil e perigoso, além de acrescentar os agravantes do transporte público ser inconveniente, os modos não motorizados são mal integrados e informações sobre demais alternativas são difíceis de encontrar. Gehl (2015) ainda enfatiza que, independentemente da localização, economia e grau de desenvolvimento, em quase todas as cidades as pessoas que ainda utilizam os espaços públicos são cada vez mais maltratadas.

No Brasil, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística revelam que: as calçadas existentes nas proximidades das residências de mais de 80% dos brasileiros são obstruídas, apenas 15,2% desta população vive em áreas que possuem rampas de acesso para cadeirantes, além de reclamações quanto à falta de pavimentação e de arborização (IBGE, 2025). Essa realidade contrasta com o instituído na Política Nacional de Mobilidade Urbana (Brasil, 2012). A Lei é orientada pela prioridade dos modos não motorizados sobre os motorizados e, dentre outros objetivos, possui o de proporcionar melhoria nas condições urbanas da população no que se refere à acessibilidade e à mobilidade. Ainda segundo ela, dentre os direitos dos usuários estão o de receber o serviço adequado e o de ter ambiente seguro e acessível para a utilização do Sistema Nacional de Mobilidade Urbana.

Ainda, incluir pedestres no projeto urbano é vital para que as pessoas prefiram caminhar ao invés de escolher o transporte motorizado (Ros-McDonnell *et al*., 2024). Por ser a forma mais básica de deslocamento e por ser usada como conexão a outros modos de transporte, a caminhada desempenha papel importante no sistema de mobilidade urbana (Valenzuela-Montes e Talavera-García, 2015) e as percepções daqueles que a adotam como forma de deslocamento devem consideradas pelas autoridades competentes, responsáveis pelo projeto e pela reconstrução de infraestruturas para este público (Campisi *et al*., 2022). A partir deste panorama, foi realizado um estudo de caso em Porto Alegre/RS com o objetivo de investigar possíveis diferenças nas percepções de cidadãos do município, de acordo com o principal modo de transporte utilizado nos seus deslocamentos rotineiros, sobre as condições de caminhabilidade nas vias públicas nas proximidades de onde residem.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A investigação sobre as percepções dos cidadãos foi realizada a partir da aplicação do questionário desenvolvido e validado por Nogueira (2023), que tem o objetivo de avaliar a percepção da população de uma cidade com relação ao nível de acessibilidade ao transporte urbano. As suas questões são frases afirmativas e enfatizam de maneira positiva aspectos diversos sobre o ambiente construído e as alternativas de transporte do

município. As respostas foram dadas por meio de uma escala Likert, com variação entre 1 (discordo totalmente) e 5 (concordo totalmente). Primeiramente, o respondente era encaminhado a um bloco contendo 21 questões sobre as condições de caminhabilidade nas vias do entorno de onde mora. Após, conforme o principal modo utilizado em seus deslocamentos, era encaminhado a outro bloco. Neste artigo, é analisado somente a caminhada, bloco respondido por todos. Sendo assim, os grupos de análise são: POA (composta pela amostra completa); CAM (caminhada); VEI (veículo próprio); ONI (ônibus/lotação); APL (aplicativo de viagem); e BIC (bicicleta).

Após aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CEP/UFRGS), o questionário teve seu acesso disponibilizado entre os meses de outubro e novembro de 2023, na plataforma *online* Google Forms. A divulgação ocorreu, principalmente, via redes sociais e por envio de e-mails a diversas instituições, órgãos e representantes da sociedade. Foram obtidas 480 respostas válidas, sendo o tamanho da amostra maior que o mínimo calculado para um nível de confiança igual a 95% e erro amostral de 5% (Hair *et al.*, 2010). A amostra é composta por: a) modo de transporte: 94 caminhada (20%); 161 veículo próprio (34%); 121 ônibus/lotação (25%); 67 aplicativo de viagem (14%); 31 bicicleta (6%); e 6 outros (1%); b) gênero: 286 feminino (60%) e 193 masculino (40%); c) faixa etária: 1 menor que 18 anos; 100 de 18 até 29 anos (21%); 324 de 30 até 59 anos (68%); e 54 com 60 anos ou mais (11%); d) renda familiar: 15 até R$1320 (3%); 99 de R$1320,01 até R$3960 (21%); 112 de R$3960,01 até R$6600 (23%); 147 de R$6600,01 até R$13200 (31%); 64 de R$ 13200,01 até R$19800 (13%); e 43 a partir de R$19800,01 (9%). Por meio de Análise Fatorial Exploratória (AFE) (Hair *et al*., 2010; Malhotra, 2001) e com auxílio do *software* SPSS Statistics, Nogueira (2023) identificou as variáveis latentes do estudo. Neste artigo, elas passam a ser chamadas de fatores característicos e são apresentados na sequência:

F1 - Equipamentos para fluxo de pedestres
F1.1 As vias públicas próximas da minha casa são equipadas com faixas de pedestres e semáforos que permitem que eu a atravesse com mais facilidade.
F1.2 A sinalização das vias públicas próximas da minha casa é adequada.
F1.3 As calçadas das vias públicas próximas da minha casa possuem dispositivos de acessibilidade adequados para pessoas com mobilidade reduzida (rampas de acesso, piso tátil etc).
F2 - Qualidade das calçadas
F2.1 Em geral, estou satisfeito(a) com as calçadas das vias públicas próximas da minha casa.
F2.2 A superfície das calçadas das vias públicas próximas da minha casa está em bom estado de conservação/manutenção.
F2.3 As calçadas das vias públicas próximas da minha casa normalmente estão limpas.
F3 - Interações sociais
F3.1 Nas vias públicas próximas da minha casa costuma haver outras pessoas transitando.
F3.2 O comércio e serviços em geral existentes perto da minha casa são suficientes para atender às minhas necessidades cotidianas.
F3.3 As vias públicas próximas da minha casa possuem árvores e áreas verdes.
F3.4 Os espaços públicos próximos da minha casa são agradáveis de se estar.
F4 - Interferência do fluxo de veículos
F4.1 Eu caminho pelas vias públicas próximas da minha casa sem muita interferência da poluição atmosférica e do barulho gerados pela presença de veículos.
F4.2 Motoristas dos veículos costumam respeitar a presença de pedestres nas vias públicas próximas da minha casa.
F4.3 Eu caminho pelas vias públicas próximas da minha casa sem muita interferência da velocidade do tráfego.
F5 - Segurança contra criminalidade
F5.1 Com relação à criminalidade, sinto-me seguro(a) enquanto caminho pelas vias públicas próximas da minha casa durante o dia.
F5.2 Com relação à criminalidade, sinto-me seguro(a) enquanto caminho pelas vias públicas próximas da minha casa durante a noite.
F6 - Inclinação das vias
F6.1 As vias públicas próximas da minha casa são pouco inclinadas (subidas e descidas).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios das notas atribuídas para as questões são apresentados na Tabela 1. Considerando a amostra completa, o aspecto melhor avaliado está associado à existência de árvores e áreas verdes no entorno das residências (4,11), seguido da presença de outras pessoas transitando nas vias públicas (4,08). Resultado importante, visto que há evidências de que as pessoas tendem a caminhar mais quando moram em regiões arborizadas e que as árvores ajudam a identificar a calçada como um espaço próprio para os pedestres (Goulart

et al., 2023). Por outro lado, a menor nota está relacionada à sensação de segurança quanto à criminalidade enquanto o cidadão caminha à noite (1,90). Esse resultado é destacado visto que diversos estudos apontam para a grande influência da segurança pública na caminhabilidade (Arellana *et al*., 2020; Samios *et al*., 2019; Larrañaga *et al*., 2019; Ruiz-Padillo *et al*., 2018; Larrañaga *et al*., 2016). Além disso, Samios *et al*. (2019) apontam que tal influência independe do principal modo de transporte usado, o que pode ajudar a explicar a avaliação negativa ter sido mantida entre todos os grupos, variando de 1,77 (ONI) até 2,39 (BIC). Outro achado de Samios *et al*. (2019) é que a percepção de segurança pública é a principal característica do ambiente urbano com potencial de impactar a sensação de bem-estar urbano, podendo ter ajudado a questão sobre o quão agradável é estar nos ambientes públicos próximos de casa ter sido avaliada em 3,40, próximo a um posicionamento neutro (igual a 3,00). Ressalta-se também que, apesar de ter sido bem avaliada a existência de calçadas (4,02), o nível de satisfação com elas é baixo (2,28), alinhado com as notas de elementos mais específicos como a limpeza (2,78), conservação/manutenção da superfície (2,51) e dispositivos de acessibilidade (2,06). Destaca-se que, apesar de ser considerado de maneiras distintas, a qualidade das calçadas é outro fator com grande influência na caminhabilidade (Arellana *et al*., 2020; 2019; Ruiz-Padillo *et al*., 2018).

Tabela 1: Avaliação de cada questão conforme a principal forma de realizar os deslocamentos

Questões	POA	CAM	VEI	ONI	APL	BIC
1. Em geral, estou satisfeito(a) com as calçadas das vias públicas próximas da minha casa.	2,28	2,45	2,37	2,09	2,30	2,26
2. A maior parte das vias públicas próximas da minha casa possui calçadas.	4,02	4,49	3,98	3,71	4,06	3,81
3. A superfície das calçadas das vias públicas próximas da minha casa está em bom estado de conservação/manutenção.	2,51	2,57	2,66	2,22	2,70	2,35
4. As calçadas das vias públicas próximas da minha casa normalmente estão limpas.	2,78	2,66	2,90	2,69	2,82	2,84
5. As vias públicas próximas da minha casa são pouco inclinadas (subidas e descidas).	3,08	3,49	2,89	3,06	3,06	3,35
6. A largura das calçadas das vias públicas próximas da minha casa é adequada para o fluxo de pessoas. *	3,53	3,39	3,71	3,40	3,73	3,23
7. Os comprimentos das quadras próximas da minha casa são curtos (menores que 100 metros). *	2,88	3,09	2,87	2,69	2,81	3,16
8. As vias públicas próximas da minha casa são equipadas com faixas de pedestres e semáforos que permitem que eu a atravesse com mais facilidade. *	3,44	3,95	3,21	3,21	3,72	3,52
9. A sinalização das vias públicas próximas da minha casa é adequada.	3,36	3,71	3,24	3,07	3,72	3,42
10. As calçadas das vias públicas próximas da minha casa possuem dispositivos de acessibilidade adequados para pessoas com mobilidade reduzida (rampas de acesso, piso tátil etc).	2,06	2,34	1,96	1,88	2,19	2,06
11. Eu caminho pelas vias públicas próximas da minha casa sem muita interferência da poluição atmosférica e do barulho gerados pela presença de veículos.	2,02	1,78	2,14	1,93	2,10	2,19
12. Motoristas dos veículos costumam respeitar a presença de pedestres nas vias públicas próximas da minha casa.	2,33	2,46	2,27	2,26	2,24	2,55
13. Eu caminho pelas vias públicas próximas da minha casa sem muita interferência da velocidade do tráfego.	2,48	2,64	2,55	2,27	2,48	2,45
14. Com relação à criminalidade, sinto-me seguro(a) enquanto caminho pelas vias públicas próximas da minha casa durante o dia.	2,80	2,87	2,72	2,81	2,84	3,10
15. Com relação à criminalidade, sinto-me seguro(a) enquanto caminho pelas vias públicas próximas da minha casa durante a noite.	1,90	1,91	1,91	1,77	1,91	2,39
16. As vias públicas próximas da minha casa são bem iluminadas. *	2,92	3,12	2,84	2,83	2,99	3,10
17. Nas vias públicas próximas da minha casa costuma haver outras pessoas transitando.	4,08	4,48	3,89	3,97	4,06	4,32
18. O comércio e serviços em geral existentes perto da minha casa são suficientes para atender às minhas necessidades cotidianas.	3,85	4,30	3,67	3,78	3,70	4,10
19. As vias públicas próximas da minha casa possuem árvores e áreas verdes.	4,11	4,09	4,22	3,84	4,27	4,42
20. As vias públicas próximas da minha casa possuem abrigos ao longo do caminho. *	2,25	2,65	2,11	2,12	2,27	2,35
21. Os espaços públicos próximos da minha casa são agradáveis de se estar.	3,40	3,65	3,47	2,89	3,72	3,68
Escala de cores		[1; 2)	[2; 3)	3	(3; 4]	(4; 5]

(*) questões que apresentaram carga cruzada com mais de um fator e que não fazem parte da composição dos fatores característicos.

As pessoas que adotam a caminhada nos seus deslocamentos rotineiros atribuíram as maiores notas em 10 questões, sendo o grupo com maior nível de satisfação. Ainda assim, apenas 4 valores são superiores a 4,00: existência de calçadas (4,49) <o nível de satisfação com elas é 2,45>; presença de outras pessoas (4,48); comércio e prestação de serviços (4,30); arborização e áreas verdes (4,09). Os mesmos respondentes são os menos satisfeitos com relação à limpeza das calçadas (2,66) e à interferência dos veículos quanto à poluição atmosférica e ruídos (1,78). Em contrapartida, os passageiros de ônibus/lotação apresentam o menor nível de satisfação, sendo o único grupo a não atribuir a maior nota a nenhuma das questões. Além disso, atribuíram a pior avaliação para 12 delas, 13 das suas notas são inferiores a 3,00 e nenhuma é superior a 4,00. As 3 mais baixas são: existência de dispositivos de acessibilidade para pessoas com mobilidade reduzida (1,88); interferência dos veículos (1,93); criminalidade à noite (1,77). Esses resultados ressaltam a importância da adequada integração entre características do ambiente construído e do sistema de transportes urbano e o papel de conexão da caminhada com outras formas de deslocamento (Valenzuela-Montes e Talavera-García, 2015).

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios das notas dos fatores característicos identificados pela AFE. Como esperado, valores extremos são suprimidos, o que é facilmente percebido pela redução de valores grifados em vermelho ou verde escuro na Tabela. A maior parte dos fatores é avaliada com notas entre 2,00 e 3,00 e nenhuma é menor que 2,00. Somente duas notas acima de 4,00: trata-se da avaliação feita pelos usuários dos modos ativos: caminhada e bicicleta. Ambos avaliaram em 4,13 o fator associado a interações sociais, que aborda a presença de outras pessoas, de comércio e prestação de serviços e de arborização e áreas verdes, além do quão agradável é estar nos espaços públicos no entorno de suas casas. Esse resultado está alinhado com um dos achados de Hillesheim *et al*. (2025): quanto melhor for a percepção sobre o ambiente, maior será o envolvimento com a mobilidade ativa. Por outro lado, a avaliação mais baixa correspondente ao fator associado à interferência do fluxo de veículos e foi atribuído pelos passageiros de ônibus/lotação (2,15). Ele é composto por questões que abordam a poluição atmosférica e o barulho provocados pelo tráfego, o comportamento dos motoristas dos veículos e interferência da velocidade do tráfego nas suas caminhadas.

Tabela 2: Avaliação dos fatores característicos conforme o principal modo de transporte

Fatores característicos	POA	CAM	VEI	ONI	APL	BIC
F1 - Equipamentos para fluxo de pedestres	2,95	3,33	2,80	2,72	3,21	3,00
F2 - Qualidade das calçadas	2,52	2,56	2,65	2,33	2,61	2,48
F3 - Interações sociais	3,86	4,13	3,81	3,62	3,94	4,13
F4 - Interferência do fluxo de veículos	2,28	2,29	2,32	2,15	2,27	2,40
F5 – Segurança contra criminalidade	2,35	2,39	2,31	2,29	2,37	2,74
F6 - Inclinação das vias	3,08	3,49	2,89	3,06	3,06	3,35
Escala de cores		[1; 2)	[2; 3)	3	(3; 4]	(4; 5]

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou uma investigação sobre as percepções de cidadãos do município de Porto Alegre a respeito das condições de caminhabilidade nas vias públicas nas proximidades de onde residem. O instrumento de pesquisa utilizado permitiu análises pontuais, quando consideradas as 21 questões separadamente. A análise global, feita por meio dos fatores característicos, permitiu investigar também como aspectos específicos do ambiente urbano se relacionam entre si, apesar do risco de mascarar informações importantes, como a baixa sensação de segurança ao caminhar à noite apresentada por todos os grupos.

A forma como uma pessoa se desloca tem influência na sua relação com o espaço público e fará com que ela valorize e priorize elementos distintos. Portanto, medidas que visam o incentivo à caminhada precisam atingir a diferentes grupos de pessoas. Neste contexto, este artigo apresenta uma ferramenta que permite a investigação dos anseios diversos dentro de uma mesma população e que pode vir a embasar medidas ou políticas públicas de acessibilidade. Outras diferenças importantes de serem investigadas referem-se a gênero, faixa etária, cor ou raça, renda, grau de instrução e bairro ou região da residência dos respondentes.

No estudo de caso apresentado, foram identificadas diferenças nos níveis de satisfação de acordo com o principal modo de transporte utilizado nos deslocamentos rotineiros, o que pode levar a algumas implicações: a) a importância da segurança pública para a caminhabilidade, visto que sua avaliação negativa foi mantida em todos os grupos; b) a importância da conexão entre o ambiente construído e o transporte público coletivo, evidenciada a partir dos resultados que revelam baixos níveis de satisfação dos passageiros de ônibus/lotação com relação ao trecho de caminhada dos seus deslocamentos entre casa e terminais; c) medidas para incentivar

a caminhabilidade precisam apontar para diversos aspectos do ambiente urbano, visto as variações das avaliações entre os grupos analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arellana, J.; Saltarín, M.; Larrañaga, A. M.; Alvarez, V. e Henao, C. A. (2020) Urban walkability considering pedestrians' perceptions of the built environment: a 10-year review and a case study in a medium-sized city in Latin America. *Transport Reviews*, vol. 40, n. 2. DOI: 10.1080/01441647.2019.1703842

Brasil (2012) Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana. Brasília, DF: Diário da União, 2012.

Campisia, T.; Tesorierea G.; Skoufasb A.; Zeglisc D.; Andronisc C. e Basbas S. (2022). Perceived Pedestrian Level of Service: The case of Thessaloniki, Greece. In XXV International Conference Living and Walking in Cities - New scenarios for safe mobility in urban areas. Brescia, Itália

Gehl, J. (2015). *Cidades para pessoas* (3ª ed.). São Paulo: Perspectiva.

Goulart, F. M.; Gunther, H.; Vargas, J. C. B. e D'Orsi, E. (2023). Antecedentes da arborização urbana à caminhabilidade: um estudo exploratório no Brasil. *Journal of Environmental Management & Sustainability*, vol. 12, n. 2. DOI: 10.5585/2023.23476

Hair, J.; Black, W.; Babin, B. e Anderson, R. (2010). *Multivariate Data Analysis* (7ª ed.). Hoboken: Pearson Prentice Hall.

Hillesheim, D.; Ceolin, G.; Neto, I. L.; Günther, H.; Vargas, J. C. B.; Jones, T. e D'Orsi, E. Active mobility can mediate the association between the perceived environment and quality of life: a cross-sectional study in Brazil. *Journal of Transport & Health*, vol. 43. DOI: 10.1016/j.jth.2025.102079

IBGE (2025) Censo 2022: dois em cada três brasileiros moram em vias sem rampa para cadeirantes. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/43166-censo-2022-dois-em-cada-tres-brasileiros-moram-em-vias-sem-rampa-para-cadeirantes>. Acesso em: 14/07/2025.

Larrañaga, A. M.; Arellana, J.; Rizzi, L.; Strambi, O. e Cybis, H. B. (2019). Using best-worst scaling to identify barriers to walkability: A study of Porto Alegre, Brazil. *Transportation*, vol. 46, n. 6. DOI: 10.1007/s11116-018-9944-x

Larrañaga, A. M.; Rizzi, L. I.; Arellana, J.; Strambi, O. e Cybis, H. B. (2016). The influence of built environ ment and travel attitudes on walking: A case study of Porto Alegre, Brazil. *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 10, n. 4. DOI: 10.1080/15568318.2014.933986

Litman, T. (2014). Economically Optimal Transport Prices and Markets: What Would Happen If Rational Policies Prevailed? In International Transportation Economic Development Conference. Disponível em: <https://www.vtpi.org/ITED_optimal.pdf >. Acesso em: 14/07/2025.

Malhotra, N. (2001). *Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada* (3ª ed.). Porto Alegre: Bookman.

Nogueira, M. L. (2023) *Acessibilidade ao transporte urbano a partir da perspectiva dos cidadãos: contribuições para a cidade de Porto Alegre*. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/277314/001208283.pdf;jsessionid=5BF439AF97910123F5685B5F72E420CB?sequence=1> Acesso em: 14/07/2025.

Ros-McDonnell, D.; de-la-Fuente-Aragón, M. V.; Ros-McDonnell, L. e Cardós, M. (2024) Toward Resilient Urban Design: Pedestrians as an Important Element of City Design. *Urban Sci*, vol. 8, n. 65. DOI: 10.3390/ urbansci8020065

Ruiz-Padillo, A.; Pasual, F. M.; Uriarte, A. M. L. e Cybis, H. B. B. (2018) Application of multi-criteria decision analysis methods for assessing walkability: A case study in Porto Alegre, Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. DOI: 10.1016/j.trd.2018.07.016

Samios, A. A. B.; Larrañaga, A. M. e Cybis, H. B. (2019) Ambiente construído e bem-estar subjetivo: análise das diferenças entre os usuários dos diferentes modos de transporte. *Transportes*, vol. 27, n. 3. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v27i3.2021

Speck, J. (2012). *Walkable city: how downtown can save America, one step at a time* (1ª ed.). Nova Iorque: Farrar, Straus and Giroux.

Valenzuela-Montes, L. M. e Talavera-García, R. (2015). Pedestrian mobility environments: A review of approaches, factors and conditions. *EURE (Santiago)*, vol. 41, n. 123. DOI: 10.4067/s0250-71612015000300001

Matheus Lemos Nogueira (matheuslemosnogueira@gmail.com)
Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Transportes, Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Campus III, Bloco V, Térreo, Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil

Mônica Regina Garcez (garcez.mr@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Avenida Osvaldo Aranha, 99, 7º andar, Porto Alegre, RS, Brasil

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INFRAESTRUTURAS CICLOVIÁRIAS EM MANAUS: ESTUDO DE CASO DE CICLOFAIXA E CICLORROTA

Kattylinne de Melo Barbosa[1], **Késsia Lira Matos da Silva**[1], **Maria do Alívio Silva Ribeiro**[2]
[1]Universidade do Estado do Amazonas – UEA, [2]Comissão Regional de Obras da 12ª Região Militar

RESUMO
Este estudo analisa as causas do subaproveitamento das infraestruturas cicloviárias de Manaus, focando na ciclofaixa da avenida Coronel Teixeira e na ciclorrota da avenida do Turismo. Adota-se um estudo de caso sustentado por pesquisa bibliográfica e documental, associado a inspeções *in loco* e entrevistas semiestruturadas com usuários potenciais. Os resultados revelam que falhas de conectividade, manutenção precária, sinalização insuficiente e conflitos com o tráfego motorizado desestimulam o uso cotidiano; 68 % dos entrevistados também apontam insegurança pública como fator limitante. A análise indica que intervenções de requalificação, integração à malha principal e reforço na segurança podem triplicar a demanda por deslocamentos em bicicleta, reduzindo emissões veiculares e ampliando a equidade na mobilidade urbana.

1. INTRODUÇÃO

O censo de 2022 estimou a população de Manaus em 2,06 milhões de habitantes e projeção de 2,28 milhões para 2024, reforçando a pressão sobre um sistema viário historicamente centrado no automóvel (IBGE, 2024). Tal crescimento, associado à expansão periférica, acentuou congestionamentos e inviabilizou o transporte coletivo nos eixos mais distantes (Pontes *et al*., 2022). Frente a esse cenário, a literatura pós-pandemia destaca a bicicleta como modal de baixo custo, baixa emissão e elevado retorno socioambiental (Steinacker *et al.,* 2025). Estudos recentes em capitais amazônicas mostram, contudo, que a implantação de vias cicláveis segrega-se em trechos desconexos, sem integração à rede estrutural de ônibus (Silva, 2023).

Com isso, a priorização de modos ativos tem sido apontada como estratégia-chave para reduzir emissões, ampliar a segurança viária e promover mobilidade inclusiva. Em Manaus, a malha dedicada soma cerca de 35 km, representando menos de 2 km/100 mil hab., índice inferior ao de capitais brasileiras de porte similar (Bezerra, 2023). Avaliações de campo revelam pavimentos deteriorados, sinalização deficiente e ausência de continuidade – fatores que desencorajam o deslocamento cotidiano de ciclistas (Bezerra, 2023). Paralelamente, pesquisas sobre percepção dos usuários indicam que insegurança viária e pública se somam às falhas de infraestrutura como principais barreiras ao uso da bicicleta (Pontes *et al*., 2022).

Nesse contexto, avaliações de "adequabilidade" da infraestrutura ciclável — integrando critérios de desenho viário, segurança e continuidade da rede — são necessárias para orientar requalificações de curto e médio prazos. Ao mesmo tempo, os compromissos de mobilidade sustentável previstos em instrumentos de planejamento municipal reforçam a urgência de intervenções que conectem ciclovias, ciclofaixas e ciclorrotas a polos geradores e à rede de transporte coletivo.

A revisão internacional aponta quatro premissas de Ruas Completas – continuidade, legibilidade, conforto microclimático e prioridade ao usuário vulnerável – como determinantes para a eficácia de redes cicloviárias (WRI Brasil, 2021). No Brasil, o Manual de Sinalização Urbana – Espaço Cicloviário estabelece largura útil mínima de 1,50 m para faixas unidirecionais protegidas, pavimento regular e sinalização vertical padronizada (CET, 2024).

Diante disso, o objetivo do trabalho é avaliar a adequabilidade de duas infraestruturas cicláveis em Manaus — a ciclofaixa da Av. Coronel Teixeira e a ciclorrota da Av. do Turismo — quanto a (1) dimensões e condições do traçado; (2) sinalização, manutenção e segurança (viária e pública); e (3) continuidade e inserção na rede, discutindo implicações para a mobilidade ativa e indicando prioridades de requalificação.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A área de estudo corresponde ao município de Manaus (AM), sétima cidade mais populosa do Brasil, com 2.063.689 habitantes recenseados em 2022 e área territorial de 11.401,002 km² (IBGE, 2024).
O relevo local combina planícies de várzea, terras firmes e baixos planaltos, com temperatura média de 27 °C e precipitação anual próxima de 2.300 mm (Souza e Silva, 2024).

Embora o Plano de Mobilidade Urbana de Manaus (PlanMob, 2015) tenha definido a implantação de 110 km de rede cicloviária alimentadora dos terminais de integração, acrescida de um circuito turístico de 10 km, a execução prática ficou muito aquém do previsto (PMM, 2015).

Entre as infraestruturas existentes, as escolhidas para aprofundamento de pesquisa foram a ciclorrota da Av. do Turismo e ciclofaixa da Av. Coronel Teixeira. Ambas são vias de principal acesso ao complexo turístico da Ponta Negra, de alto tráfego e com corriqueiras ocorrências de acidentes e inadequações.

2.2. Levantamento de inconformidades e questionário

Durante a visita in loco foram realizadas medidas de eixo a eixo da ciclofaixa, utilizando uma trena. Escolhendo 03 locais no sentido Centro-Bairro e 03 no sentido Bairro-Centro. Medindo faixas nos trechos retos e nos curvos. A Figura 1 mostra os locais onde essas medidas foram obtidas.

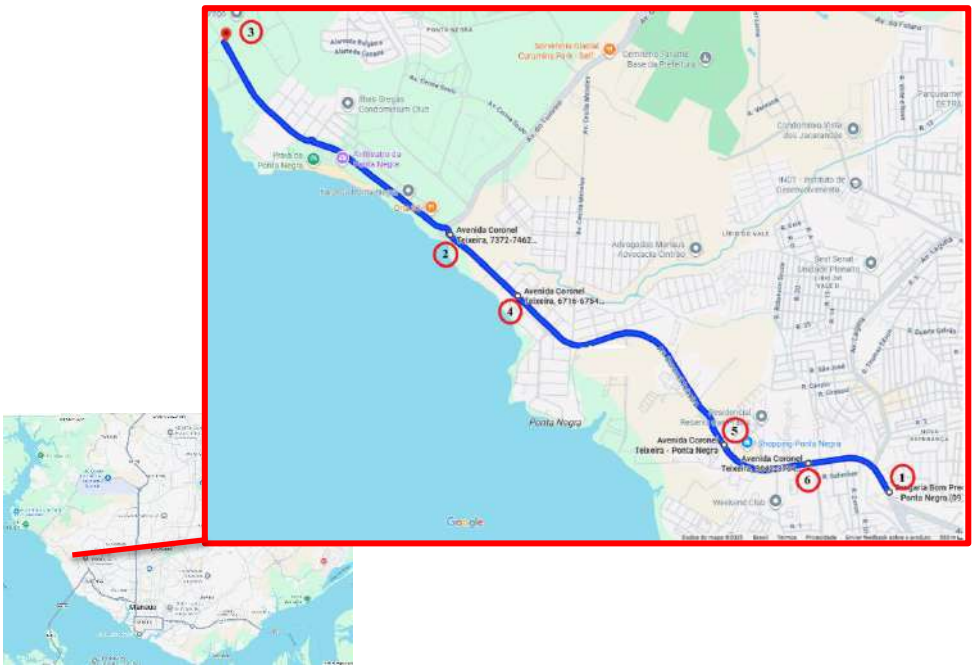


Figura 1: Locais de obtenção das medidas e caracterização das ciclofaixas

Para coletar os dados necessários das rotas cicláveis escolhidas realizou-se a caracterização da via (tipo de via, velocidade de tráfego, sinalização horizontal e vertical, condições da iluminação e pavimentação). Assim, permitindo a verificação das inconformidades existentes em comparação com o definido nas leis, normas e diretrizes técnicas de implantação de infraestrutura cicloviária.

Aplicou-se ainda, um questionário com o intuito de captar a percepção dos usuários e não usuários sobre o que desmotiva a utilização das infraestruturas cicloviárias.

3. RESULTADOS

3.1. Levantamento de inconformidades

3.1.1. Avenida Coronel Teixeira

Os dados procedentes dos locais escolhidos no percurso da ciclofaixa, localizada na Avenida Coronel Teixeira, resultaram nas medidas listadas na Tabela 1, juntamente com sua respectiva referência.

Tabela 1: Medidas da ciclofaixa da Av. Coronel Teixeira.

Ponto	Referência	Ida/Sentido Centro-Bairro (m)
1	Início da ciclofaixa (MIR)	1,40
2	1ª Rotatória (Av. Coronel Teixeira e Av. Turismo)	1,38

3	Fim da Ciclofaixa	1,38
Ponto	**Referência**	**Ida/Sentido Bairro-Centro (m)**
4	Igreja dos Mormos	1,38
5	12ª Região Militar	1,43
6	19º DIP / Reserva Inglesa	1,29

A ciclofaixa implantada nessa via arterial, cuja velocidade regulamentada é de 60 km/h, apresenta largura variável de 1,29 m a 1,43 m de eixo a eixo (Figura 2). No percurso observa-se pavimento irregular, com remendos, buracos, acúmulo de sujeira e pintura desgastada; além disso, veículos motorizados circulam e estacionam sobre a própria ciclofaixa, reduzindo o espaço de circulação e estreitando as faixas de rolamento adjacentes (Figuras 3 e 4). A iluminação pública é satisfatória na maior parte do trecho, porém, no ponto 3, a luminária dedicada é ineficiente (Figura 5).

Embora em quase toda a extensão tenha sinalização vertical e horizontal, há segmentos em que a marcação está ausente ou apagada (Figura 6). Os tachões instalados para separá-la das faixas de rolamento também não atendem às especificações do CONTRAN, comprometendo a segurança do traçado (Figura 7).



Figura 2: Medição da ciclofaixa



Figura 3: Carros trafegando sobre a ciclofaixa



Figura 4: Carros estacionados na ciclofaixa



Figura 5: Falta de iluminação e condições do pavimento



Figura 6: Sinalização vertical



Figura 7: Tachões no meio da ciclofaixa

3.1.2. Avenida do Turismo

A ciclorrota da Avenida do Turismo está inserida em via arterial cujo limite regulamentar é 60 km/h; contudo, a observação em campo evidenciou que a maioria dos motoristas excede essa velocidade e ignora a sinalização de advertência. Ao longo do percurso também se nota vegetação densa nas laterais, o que reduz a visibilidade em determinados trechos (Figura 8). O pavimento apresenta numerosos remendos e obstáculos que interferem na segurança e no conforto da pedalada (Figura 9). A iluminação pública é insuficiente em quase toda a extensão, resultando em setores muito escuros; somam-se a isso a sinalização horizontal bastante desgastada e a vertical limitada a poucos pontos de referência (Figura 10).



Figura 8: Vegetação lateral



Figura 9: Condições da ciclorrota



Figura 10: Falta de iluminação e sinalização horizontal apagada

3.2. Questionário

O questionário online foi disponibilizado nos grupos de ciclistas existentes nas redes sociais. Onde, um total de 94 pessoas responderam ao questionário, e os resultados obtidos podem ser analisados na Tabela 2 e Gráfico 1.

Tabela 2: Resultado do Questionário aplicado de forma online

Sexo	**Feminino** 47,80%		**Masculino** 52,20%		
Idade	**Até 18 anos** 3,80%	**Entre 18 e 30 anos** 46,20%	**Entre 31 e 40 anos** 21,20%	**Entre 41 e 50 anos** 13,50%	**Acima de 51 anos** 15,40%
Frequência de utilização	**1x por semana** 28,80%	**De 2 a 3x por semana** 34,60%	**Todos os dias** 15,40%	**Nunca** 21,20%	
Finalidade de uso	**Atividade física** 41,70%	**Lazer** 35,40%	**Meio de transporte** 18,80%	**Não utiliza** 4,10%	
Utiliza a ciclofaixa localizada na Av. Coronel Teixeira?	**Sempre** 25,00%		**Às vezes** 38,50%	**Nunca** 36,50%	
Utiliza a ciclorrota localizada na Av. Do turismo?	**Sempre** 19,20%		**Às vezes** 34,60%	**Nunca** 46,20%	

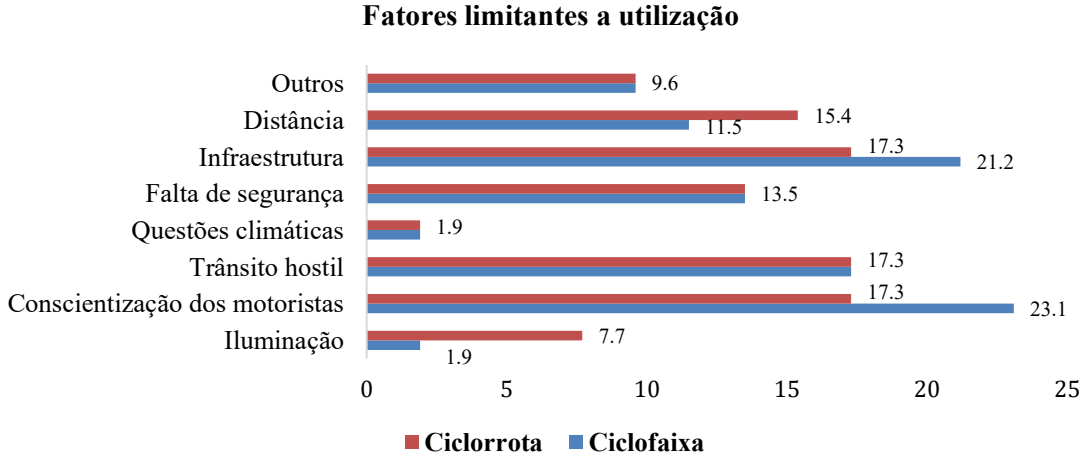


Gráfico 1: Fatores limitantes de utilização da ciclofaixa da Av. Coronel Teixeira e ciclorrota da Av. do Turismo

Os entrevistados apontaram que a adoção efetiva dessas rotas depende de um pacote de intervenções: criação de rotas alternativas que interliguem outros bairros, campanhas contínuas de conscientização para motoristas que desrespeitam ciclistas, implantação de faixas exclusivas mais largas, fiscalização rigorosa de velocidade

nas vias com ciclorrotas, qualificação da infraestrutura (iluminação, pavimentação e sinalização) e reforço das condições gerais de segurança.

4. CONCLUSÃO

A avaliação revelou que a ciclofaixa da Av. Coronel Teixeira, embora dimensionada acima do mínimo normativo, perde funcionalidade devido a tachões mal posicionados, pavimento degradado e sinalização deficiente nos cruzamentos, além de condutas hostis de motoristas que estacionam ou convergem sobre a faixa. Na Av. do Turismo, a ciclorrota opera fora dos parâmetros técnicos: o tráfego veicular excede 30 km/h, a sinalização é quase inexistente, a iluminação é insuficiente e o pavimento apresenta múltiplos obstáculos, agravados por vegetação lateral que reduz a visibilidade.

Entre os usuários consultados, 55% recorrem a essas rotas esporadicamente, mas apenas 18,8% utilizam a bicicleta como meio de transporte; os demais a empregam majoritariamente para lazer ou atividade física. Os principais limitadores apontados foram a falta de respeito dos motoristas, a fragmentação da rede e o ambiente viário inseguro. Conclui-se que as infraestruturas cicloviárias analisadas foram implantadas em desacordo com as diretrizes legais, resultando em conflitos entre modais e expondo o ciclista a condições de vulnerabilidade que desestimulam o uso cotidiano da bicicleta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aliança Bike. (2024). *Ranking de ciclovias e ciclofaixas nas capitais brasileiras 2024*. São Paulo: Associação Brasileira do Setor de Bicicletas. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/10/capitais-brasileiras-ganharam-280-km-de-ciclovias-e-ciclofaixas-em-2024-diz-levantamento.shtml (acesso em 15/06/2025).

Bazilio, J. A. L.; Gomes dos Santos, A. C. S.; Alvim, M. S. (2023). Análise da qualidade dos serviços prestados pelas oficinas de bicicletas no município de Niterói sob a perspectiva dos ciclistas: um estudo piloto. *South American Development Society Journal*, 9(27), 1-24. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v9i27p1-24

Bezerra, J. P. M. (2023). Infraestrutura cicloviária em Manaus (AM): análise da pavimentação da ciclofaixa na Avenida Nathan Xavier *de Albuquerque*. Monografia de Bacharelado, UFAM. Disponível em: https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/6976/7/TCC_JosePauloBezerra.pdf (acesso em 24/05/2025).

CET-SP. (2024). *Manual de Sinalização Urbana – Volume 13: Espaço Cicloviário* (Rev. 01). São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego. Disponível em: https://www.cetsp.com.br/media/1100702/MSU-Vol-13-Espaco-Cicloviario-Rev01.pdf (acesso em 14/04/2025).

IBGE (2024). *Cidades e* Estados – Manaus. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/manaus.html (acesso em 15/06/2025).

Pontes, B. S., et al. (2022). Análise da percepção da mobilidade urbana pelos usuários na cidade de Manaus. *Research, Society and Development*, 11(17), e215111739156. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366676955_Analise_da_percepcao_da_mobilidade_urbana_pelos_usuarios_na_cidade_de_Manaus (acesso em 05/05/2025).

PMM - Prefeitura Municipal de Manaus. (2015). *Plano de Mobilidade Urbana de Manaus (PlanMob)*. Manaus: Secretaria Municipal de Transportes Urbanos. Disponível em: https://www2.manaus.am.gov.br/docs/portal/secretarias/smtu/PlanMobManaus.pdf (acesso em: 28/02/2025).

Silva, M. O. M. (2023). *A bicicleta nos Planos de Mobilidade Urbana das capitais da Amazônia Legal*. Anais do ENANPEGE. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/enanpege/2023/65a6ad36509ef_16012024132214.pdf (acesso em 06/05/2025).

Souza, R. S., & Silva, L. P. (2024). *Climatologia da precipitação na região de Manaus (AM) através de dados do BDMEP processados em R*. Anais da VI Jornada de Climatologia Amazônica.

Steinacker, C., *et al*. (2025). Robust design of bicycle infrastructure networks. *Scientific Reports*, 15, 15471. DOI:10.1038/s41598-025-99976-9

WRI Brasil. (2021). *Ruas Completas no Brasil: promovendo uma mudança de paradigma*. São Paulo: World Resources Institute. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/wri-brasil-ruas-completas-no-brasil-2021.pdf?utm_source=chatgpt.com (acesso em 01/06/2025).

Kattylinne de Melo Barbosa (kdbarbosa@uea.edu.br), Késsia Lira Matos da Silva (klmds.eng@uea.edu.br)
Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Escola Superior de Tecnologia – EST, Av. Darcy Vargas, 1.200 - Parque Dez de Novembro, Manaus – AM, Brasil.
Maria do Alívio Silva Ribeiro (m.ribeiroec@gmail.com)
Exército Brasileiro, Comissão Regional de Obras da 12ª Região Militar, Av. Coronel Teixeira, 2061 - Compensa, Manaus – AM, Brasil.

AVANÇOS E TENDÊNCIAS NA APLICAÇÃO DE SIG A SISTEMAS DE BICICLETAS COMPARTILHADAS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E EXPLORATÓRIA (2014–2024)

Victor Sousa Sales
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

RESUMO
Este artigo apresenta uma revisão bibliométrica e qualitativa da literatura sobre a interface entre Sistemas de Bicicletas Compartilhadas e Sistemas de Informação Geográfica, com base em 112 artigos indexados na plataforma Scopus (2014–2024). Utilizou-se o pacote *Bibliometrix* (R) para análise estatística e a ferramenta *Claude Pro* para identificação automatizada de padrões técnicos e agrupamentos temáticos com base em resumos e palavras-chave. O campo apresenta crescimento médio anual de 31,1%, com forte colaboração internacional e concentração editorial. Observa-se predominância de métodos consolidados de análise espacial, acompanhados por avanços no uso de abordagens espaço-temporais e técnicas emergentes como *big data* e aprendizado de máquina. A maioria dos estudos adota múltiplas metodologias, refletindo um cenário técnico mais integrado. A análise identificou cinco grupos temáticos principais: (A) Análise Geoespacial Tradicional, (B) Análise Espaço-Temporal, (C) Redes e Acessibilidade, (D) Métodos Quantitativos Avançados e (E) Coleta e Integração de Dados.

1. INTRODUÇÃO

A expansão dos Sistemas de Bicicletas Compartilhadas (SBC) reflete a crescente adoção de soluções para promover a mobilidade ativa urbana. Estudos indicam que tanto bicicletas convencionais quanto elétricas podem mitigar emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao substituir deslocamentos motorizados. Em Lisboa, o sistema GIRA evitou cerca de 36 toneladas de emissões e economizou 451 GJ de energia anuais (Raposo e Silva, 2022). Na China, bicicletas elétricas compartilhadas (SEBs) reduzem entre 433 e 487 kg CO_2 equivalente por unidade ao longo da vida útil, se utilizadas adequadamente (Zhu e Lu, 2022). Em Washington, D.C., uma bicicleta precisa de pelo menos 591 dias de uso para gerar balanço positivo em emissões considerando todo seu ciclo de vida (Chen *et al.*, 2024). Simulações na Suíça indicam que a adoção massiva de e-bikes pode reduzir até 10% das emissões do transporte pendular, com ganhos maiores se combinada à eletrificação de outros modos (Bucher *et al.*, 2019). Esses resultados convergem com a meta 11.2 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que preconiza acesso universal a transportes seguros, acessíveis e sustentáveis (Assembly, 2015).

Segundo o relatório de 2022 da plataforma *Meddin Bike-sharing World Map*, até agosto de 2021 havia mais de 10 milhões de bicicletas compartilhadas globalmente, distribuídas em 2.040 sistemas ativos (2025). A adoção é concentrada na Ásia, América do Norte e Europa, com destaque para a China, que abriga sete dos dez maiores sistemas mundiais, como *YouBike* em Taipei com quase 40 mil bicicletas. A Europa concentra 42,8% dos sistemas, seguida da Ásia (33,4%) e América do Norte (23,7%), enquanto América Latina e África têm presença limitada (3,9% e 0,15%, respectivamente).

Apesar do impacto da pandemia de COVID-19, os SBC mostraram rápida recuperação, adaptando-se como alternativa segura e complementar ao transporte público, especialmente para viagens de primeira e última milha (Bi *et al*., 2022; Conrow *et al*., 2018). A integração com o transporte público é essencial para seu sucesso: em Washington, D.C., 65% dos usuários combinam bicicletas com outros modos (Martin e Shaheen, 2011), e estações próximas a Polos Geradores de Viagens apresentam maior demanda, influenciando positivamente o uso do metrô (Ma e Erdoğan, 2015). Os SBC ainda reforçam a resiliência dos sistemas urbanos diante de interrupções (Mattsson e Jenelius, 2015).

Dada sua relevância, ferramentas como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são cruciais para o planejamento e operação dos SBC. Aplicações incluem estimativas de demanda com base na morfologia urbana (Frade e Ribeiro, 2014), integração com transporte público (Conrow *et al*., 2018), análise de acessibilidade urbana (García-Palomares et al., 2012), alocação de estações via métodos multicritério (Rybarczyk e Wu, 2010) e modelagem espaço-temporal da distribuição das bicicletas (Wang *et al.*, 2016). Isso evidencia o potencial dos SIG para apoiar decisões territoriais dinâmicas e abre caminhos para novas abordagens metodológicas.

Com base nessas evidências, este estudo parte da hipótese de que os SIG têm sido progressivamente

incorporados às pesquisas sobre SBC, promovendo abordagens integradas para sua implementação, operação e expansão. O objetivo é mapear e analisar tendências, padrões e lacunas na produção científica que relaciona SBC e SIG entre 2014 e 2024, investigando correlações temáticas e metodológicas no contexto da mobilidade ativa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo configura-se como uma revisão bibliométrica quantitativa, complementada por uma análise qualitativa exploratória. A base de dados foi construída a partir de uma busca estruturada na plataforma Scopus, utilizando a expressão *("bike sharing" OR "bicycle sharing" OR "bike rental" OR "public bicycle" OR "bike-share") AND ("GIS" OR "geographic information system" OR "spatial analysis" OR "geospatial")*. Foram aplicados filtros para o período de 2014 a 2024, restringindo o tipo documental a artigos científicos e selecionando áreas temáticas de maior relevância (ciências sociais, engenharia, meio ambiente, ciência da computação e geociências). A busca inicial retornou 113 publicações, das quais 112 foram validadas e importadas para análise.

A análise quantitativa foi conduzida com o pacote *Bibliometrix* (R), que permite estatísticas descritivas, redes de coautoria, mapas de coocorrência e clusters temáticos, possibilitando avaliar padrões metodológicos, evolução temporal e distribuição geográfica das publicações. Em complemento, a plataforma *Claude Pro* foi utilizada para análise qualitativa de *abstracts* e *keywords*, identificando agrupamentos metodológicos e temáticos a partir de padrões recorrentes.

Os procedimentos adotados, incluindo a seleção criteriosa dos termos de busca, a delimitação temporal e documental, bem como a escolha das bases e ferramentas analíticas, foram definidos para assegurar a consistência e representatividade da amostra em relação aos principais eixos de pesquisa na interface entre os grupos temáticos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção organiza-se em duas frentes complementares: a revisão bibliométrica, que quantifica a evolução da produção científica e os padrões de colaboração internacional sobre a interface entre SBC e SIG; e a análise temática, que destaca métodos, ferramentas e tendências emergentes. Essa combinação permite compreender tanto a dimensão quantitativa da produção quanto as orientações metodológicas que vêm consolidando o campo.

3.1 Revisão bibliométrica

A partir da análise com o pacote *Bibliometrix*, foram examinados 112 documentos sobre a relação entre sistemas de bicicletas compartilhadas (SBC) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), publicados em 56 fontes, majoritariamente periódicos científicos. O campo apresenta uma taxa média de crescimento anual de 31,1%, evidenciando sua consolidação como tema emergente nas áreas de mobilidade urbana, análise espacial e planejamento sustentável. A idade média das publicações é de 4,15 anos, com uma média de 30,86 citações por artigo, indicando impacto bibliográfico relevante.

Foram identificadas 763 palavras-chave complementares e 399 originais, evidenciando diversidade terminológica. Os 112 artigos foram assinados por 354 autores, com média de 3,67 coautores, sendo 36,6% resultantes de colaborações internacionais.

A média de citações ao longo do tempo revela marcos de visibilidade, com destaque para o artigo de El-Assi, Mahmoud e Habib (2017), que acumula 433 citações e analisou a influência do ambiente construído, do uso do solo, da rede viária e das condições climáticas sobre a demanda por bicicletas compartilhadas em Toronto, Canadá. A produção científica cresceu de forma mais consistente a partir de 2018, com pico em 2021, possivelmente influenciada pela pandemia de COVID-19. Apesar disso, as médias de citação caem nos anos recentes, reflexo do tempo limitado para acúmulo de impacto. Publicações de maior relevância, como a citada, parecem ter funcionado como catalisadoras do interesse e do crescimento subsequente da produção.

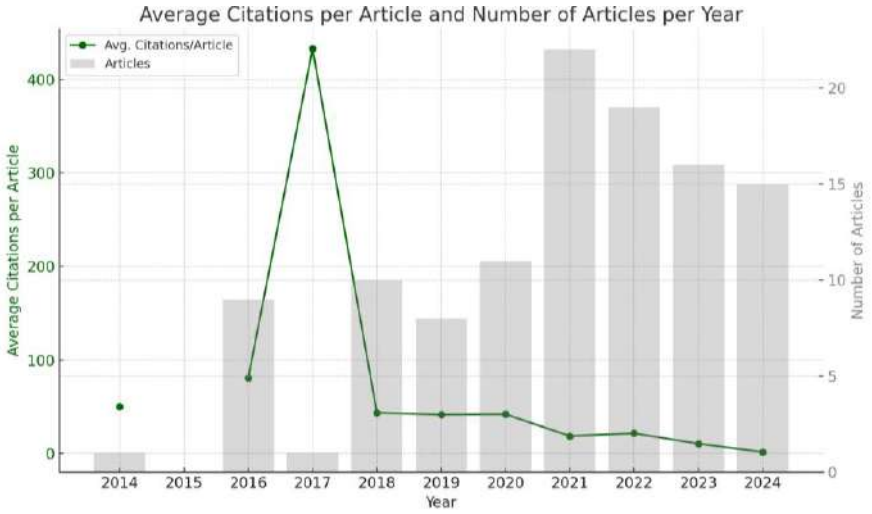


Figura 1 - Produção científica anual
Fonte: *Bibliometrix (R)* /Elaboração própria (2025).

A análise bibliométrica da produção científica desses temas revela uma concentração expressiva de publicações em um número restrito de periódicos de destaque, em conformidade com os padrões descritos pela Lei de Bradford (Brookes, 1969) e pelo Efeito Mateus (Merton, 2016). Quatro revistas concentram 37,5% dos artigos analisados, configurando-se como núcleos editoriais especializados que concentram grande parte da visibilidade e do impacto acadêmico sobre o tema.

O *Journal of Transport Geography* lidera com 19 artigos e mais de 790 citações, seguido por *Sustainability (Switzerland)* (10), *International Journal of Sustainable Transportation* (7) e *Transportation Research Part A* (6). Nota-se, porém, diversificação crescente, com revistas emergentes como *Sustainable Cities and Society* (5 artigos desde 2022) e periódicos de alto impacto relativo, como *Computers, Environment and Urban Systems* e *Journal of Cleaner Production*.

A evolução da produção mostra consolidação a partir de 2018, com estabilização entre 2021 e 2024. O *Journal of Transport Geography* apresenta crescimento contínuo desde 2016, dobrando sua produção entre 2020 e 2024. Já *Sustainability* passou a publicar sobre o tema em 2019 e ultrapassou dez trabalhos em 2024, indicando a força de periódicos de acesso aberto. *Transportation Research Part A* e *International Journal of Sustainable Transportation* mantêm crescimento estável, enquanto *Sustainable Cities and Society* quintuplicou sua contribuição entre 2022 e 2024, demonstrando rápido protagonismo editorial.

A análise de autoria revela dispersão significativa: 354 autores assinam os 112 artigos, com média de 3,67 coautores por trabalho. Apenas 3 publicações são de autor único, e 87,3% dos autores aparecem apenas uma vez, evidenciando um campo ainda difuso.

A produção científica concentra-se na China (78), Estados Unidos (57) e Reino Unido (17), seguidos por países europeus e asiáticos com participação expressiva. As colaborações internacionais destacam-se entre China e EUA, enquanto contribuições pontuais do Sul Global surgem em parceria com países desenvolvidos, sinalizando diversificação territorial.

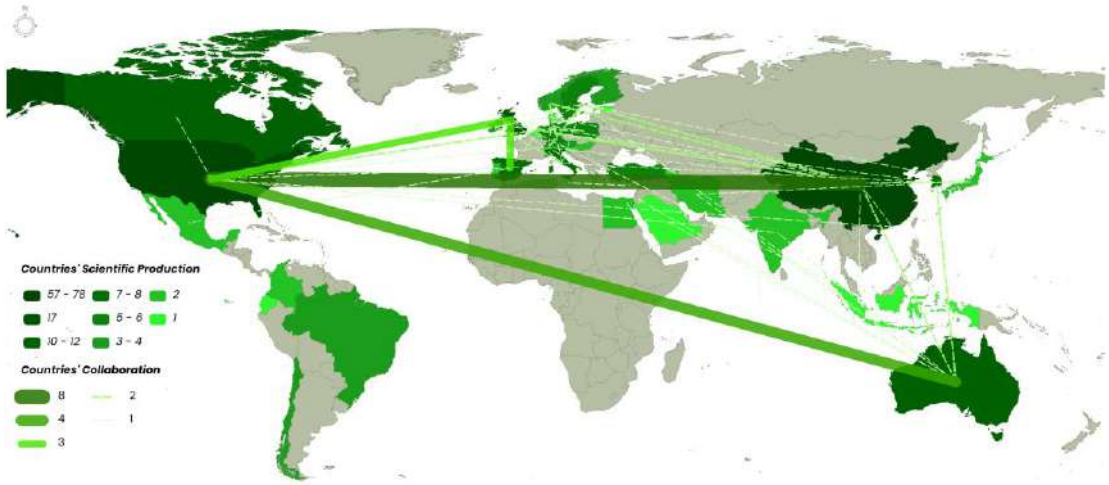


Figura 2 – Produção Científica e Colaboração Internacional entre Países.
Fonte*: Bibliometrix (R) /* Elaboração própria (2025).

A rede de colaboração científica é fragmentada, com núcleos coesos, mas conexões limitadas entre grupos, em que atores como Scott, Darren M. e países com alto volume de produção, como China e EUA, ocupam posições centrais. Universidades chinesas e estadunidenses destacam-se nas redes institucionais, enquanto a maioria das instituições permanece periférica. Apesar dessa fragmentação, o número de citações acumuladas pelos artigos (Figura 1) mostra-se um indicador mais relevante de visibilidade e impacto do que a densidade ou centralidade das conexões entre grupos, indicando que a influência no campo depende mais da relevância das publicações individuais do que da integração entre pesquisadores (Figura 2)

3.2 Análise temática de padrões de uso

A análise de 113 artigos com apoio da IA *Claude Pro* evidenciou que SIG e análise espacial permanecem como pilares metodológicos, frequentemente associados à modelagem estatística. Observa-se o avanço das análises espaço-temporais (23%) e o crescimento de técnicas emergentes como *machine learning* (9,7%) e *big data* (11,5%), enquanto sensoriamento remoto (3,5%) e simulação (2,7%) seguem marginais. Cerca de 80% dos estudos adotam combinações metodológicas, consolidando o SIG como infraestrutura central de integração.

Foram identificados cinco grupos temáticos: (A) Análise Geoespacial Tradicional, (B) Análise Espaço-Temporal, (C) Redes e Acessibilidade, (D) Métodos Quantitativos Avançados e (E) Coleta e Integração de Dados. Esses núcleos evidenciam a transição do campo, que combina métodos consolidados e inovações, com crescente integração de dados e técnicas.

4. CONCLUSÕES

A revisão evidencia que a pesquisa sobre sistemas de bicicletas compartilhadas (SBC) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem avançado significativamente. Observa-se que abordagens combinadas e a integração de múltiplas fontes de dados aumentam a robustez analítica, embora a colaboração entre pesquisadores ainda seja fragmentada. As lacunas metodológicas e temáticas identificadas apontam oportunidades para estudos que explorem novas técnicas preditivas, análise espaço-temporal detalhada e aplicações práticas em contextos urbanos diversos. Os achados sugerem implicações relevantes para gestores e planejadores urbanos, ao fornecer subsídios para a expansão eficiente e equitativa das redes de bicicletas compartilhadas. Pesquisas futuras podem priorizar a integração de dados socioeconômicos, ambientais e de mobilidade, ampliando o potencial de uso dos SIG na tomada de decisão e na avaliação de impacto da mobilidade ativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assembly, G. (2015) *Resolution adopted by the General Assembly on 11 September 2015*. New York: United Nations.

Bi, H.; X. Zhang; Y. Ma; C. Qin; X. Liu e Y. Wang (2022) A long-term perspective on the COVID-19: The bike sharing system resilience under the epidemic environment. *Journal of Transport & Health*, v. 26, p. 101460. DOI: 10.1016/j.jth.2022.101460.

Brookes, B. C. (1969) Bradford's law and the bibliography of science. *Nature*, v. 224, n. 5223, p. 953–954. DOI: 10.1038/224953a0.

Bucher, D.; M. Buffat; C. Muenchmeyer; J. Raubal e M. Stauffacher (2019) Energy and greenhouse gas emission reduction potentials resulting from different commuter electric bicycle adoption scenarios in Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 114, p. 109298. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109298.

Chen, Y.; Y. Zhou; H. Li; Z. Liang; S. Guo e Y. Li (2024) Life cycle analysis of bike sharing systems: A case study of Washington D.C. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 101, p. 107455. DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107455.

Conrow, L.; A. T. Murray e H. A. Fischer (2018) An optimization approach for equitable bicycle share station siting. *Journal of Transport Geography*, v. 69, p. 163–170. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2018.04.011.

El-Assi, W.; M. Salah Mahmoud e K. Nurul Habib (2017) Effects of built environment and weather on bike sharing demand: a station level analysis of commercial bike sharing in Toronto. *Transportation*, v. 44, n. 3, p. 589–613. DOI: 10.1007/s11116-016-9733-9.

Frade, I. e A. Ribeiro (2014) Bicycle sharing systems demand. Procedia – *Social and Behavioral Sciences*, v. 111, p. 518–527. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.085.

García-Palomares, J. C.; J. Gutiérrez e M. Latorre (2012) Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*, v. 35, n. 1–2, p. 235–246. DOI: 10.1016/j.apgeog.2012.07.002.

Ma, T.; C. Liu e S. Erdoğan (2015) Bicycle sharing and public transit: Does Capital Bikeshare affect Metrorail ridership in Washington, DC?. *Transportation Research Record*, v. 2534, n. 1, p. 1–9. DOI: 10.3141/2534-01.

Martin, E. W. e S. A. Shaheen (2011) Greenhouse gas emission impacts of carsharing in North America. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 4, p. 1074–1086. DOI: 10.1109/TITS.2011.2158539.

Mattsson, L.-G. e E. Jenelius (2015) Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 81, p. 16–34. DOI: 10.1016/j.tra.2015.06.002.

Merton, R. K. (2016) The Matthew effect in science. *Science*, v. 146, p. 56–63. DOI: 10.1126/science.146.3642.56.

Raposo, M. e C. Silva (2022) City-level E-bike sharing system impact on final energy consumption and GHG emissions. *Energies*, v. 15, n. 18, p. 6725. DOI: 10.3390/en15186725.

Rybarczyk, G. e C. Wu (2010) Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis. *Applied Geography*, v. 30, n. 2, p. 282–293. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.08.005.

The Meddin Bike-sharing World Map (2022) *The Meddin Bike-sharing World Map Report* – 2022 edition. Disponível em: https://bikesharingworldmap.com (acesso em 04/06/2025).

Wang, J.; C.-H. Tsai e P.-C. Lin (2016) Applying spatial-temporal analysis and retail location theory to public bikes site selection in Taipei. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 94, p. 45–61. DOI: 10.1016/j.tra.2016.08.015.

Zhu, Z. e C. Lu (2022) Life cycle assessment of shared electric bicycle on greenhouse gas emissions in China. *Science of the Total Environment*, v. 871, p. 160546. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.160546.

BENCHMARKING THE X-MINUTE CITY: A MULTI-CITY ASSESSMENT OF PRIMARY HEALTH CARE ACCESSIBILITY FROM A SOCIO-SPATIAL INEQUALITY PERSPECTIVE

Lucas Brandão Monteiro de Assis[1], Jorge Ubirajara Pedreira Junior[2], Thiago Vinicius Louro[1], Paulo Cesar Lima Segantine[1], Miguel José das Neves Pires Amado[3]
[1]Universidade de São Paulo, [2]Universidade Federal da Bahia, [3] Universidade de Lisboa

ABSTRACT
The concept of the 15-minute city advocates for equitable and walkable access to essential services such as healthcare. Despite its relevance, updated evidence is lacking on how Brazilian cities perform in providing access to primary healthcare, particularly when considering the latest population data from the 2022 Census and current health infrastructure. This study evaluates walking accessibility to primary healthcare in four major Brazilian cities: São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador, and Goiânia. Using 2022 census data, official health facility records, and terrain-adjusted travel times, we computed population coverage across 5-minute walking intervals. Salvador demonstrates the highest spatial equity, offering broad access to low-income populations, while Goiânia has the lowest overall coverage. São Paulo and Rio de Janeiro show pronounced intra-urban disparities, especially in peripheral low-income areas. The results reveal significant territorial and socioeconomic disparities that can inform decision-making processes aimed at promoting a fairer distribution of primary healthcare services.

1. INTRODUCTION

Access to healthcare services remains a significant barrier to the effectiveness of Brazil's public health system. Approximately 18.1% of users encounter access-related barriers (whether geographic, economic, or operational in nature, such as prolonged waiting times and elevated transportation costs) which may compromise continuity of care (Oliveira *et al.* 2019; Dantas *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2022). In this context, Primary Health Care (PHC), which includes services provided at health centers (*Postos de Saúde – PS*), basic health units (*Unidades Básicas de Saúde - UBS*), and family health units (*Unidades de Saúde da Família - USF*), emerges as a strategic and foundational component of the Brazilian Unified Health System (*Sistema Único de Saúde - SUS*), serving as the preferred point of entry and coordinator of care (Kroezen *et al.*, 2023; Mendes, 2015).

It is estimated that, during a year, between 75% and 85% of people's health demands can be addressed exclusively within PHC, making it the most widespread level of care, with the best cost-effectiveness ratio and the highest user acceptance (Dodd *et al.*, 2021; Kabir *et al.*, 2022; Starfield, 1994). PHC delivers longitudinal care, particularly crucial in the treatment and prevention of noncommunicable chronic diseases, for which close and continuous follow-up is essential to prevent complications and progression to acute stages. Without effective PHC, such cases tend to aggravate and overburden emergency units and hospitals, which provide secondary and tertiary care (Beaglehole *et al.*, 2008; Bell *et al.*, 2022).

However, the success of this strategy depends directly on overcoming territorial inequalities in the distribution of services, which calls for public policies aimed at the equitable expansion of PHC and strengthening its problem-solving capacity (Kabir *et al.*, 2022). Recently, the 15-minute city concept has gained prominence as an urban model that prioritizes proximity to essential activities within a 15-minute walking, cycling, or transit distance (Moreno *et al.*, 2021). This concept aligns with the longitudinal and continuous nature of PHC delivery, both in space and time.

This article aims to assess how far different Brazilian cities are from various X-minute thresholds to primary healthcare centers, with a primary focus on X = 15 minutes. In addition, we integrate this spatial analysis with a socioeconomic assessment of different urban regions and their respective income levels. Similar efforts were undertaken by Tomasiello *et al.* (2024) and Pereira *et al.* (2021), who analyzed access to the primary healthcare network. However, those studies relied on data available at the time, referring to population data from the 2010 Census and land use information from 2017, 2018, and 2019. In contrast, this article offers a more up-to-date and temporally aligned analysis, incorporating 2022 Census data and current datasets from the Ministry of Health to provide a more accurate and contemporary overview.

2. MATERIALS AND METHOD

This study adopted a spatial modeling approach to evaluate population-level accessibility to primary healthcare facilities (PHFs) in four Brazilian municipalities: Goiânia, Salvador, Rio de Janeiro, and São Paulo. The methodological workflow is structured into three main stages as illustrated in Figure 1.

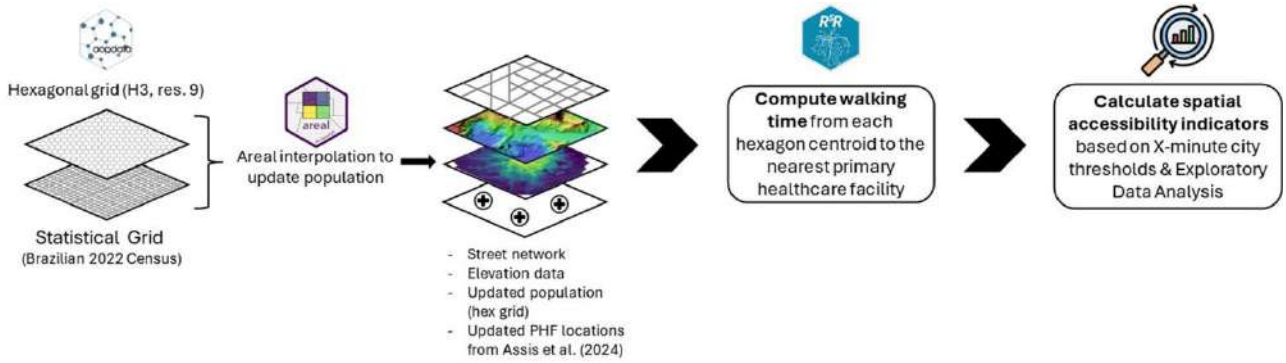


Figure 1: Methodological steps for X-minute accessibility to primary healthcare facilities

The first stage involved the integration of four core datasets. Population data were obtained from the 2022 Brazilian Demographic Census, disseminated by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2025), and originally provided in a regular 200 x 200 m statistical grid format. The statistical grid was overlaid with an H3 hexagonal grid (resolution 9), and population counts were redistributed to the hexagons using areal interpolation implemented via the "areal" package in R (Prener & Revord, 2019). Additionally, PHF locations were retrieved from the National Registry of Health Establishments (CNES) (Brasil, 2024) and geocoded using the GeoCNES algorithm developed by Assis *et al.* (2024). These facilities were then spatially assigned to their corresponding hexagons based on spatial containment, ensuring each facility was uniquely mapped to a hexagonal cell. Lastly, elevation data were obtained from the OpenTopography platform to account for terrain slope effects in the estimation of walking travel time.

The second stage involved estimating walking travel times from the centroid of each populated hexagon to the nearest PHF. This was done using the R5 routing engine via the "r5r" package in R (Pereira *et al.*, 2021b), which computed an origin-destination (OD) matrix of travel times between all hexagons with population and all hexagons containing at least one PHF. For each origin hexagon, the travel time to the nearest destination hexagon containing a PHF was identified and retained to represent the estimated accessibility level used in subsequent analyses.

In the final stage, we computed population coverage within 5-minute walking time intervals (from 5 to 60 minutes) to assess how effectively each city meets X-minute accessibility benchmarks. These metrics served to characterize spatial patterns of access to primary healthcare and informed exploratory analyses of intra-urban disparities. To analyze the results, travel-time data were overlaid with householder income information from the 2022 demographic census (IBGE, 2025) to qualitatively examine the relationship between accessibility and economic characteristics; no statistical tests were applied.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The spatial distribution of the main findings is illustrated in Figure 2, which highlights patterns of accessibility to PHF across the selected municipalities. In Goiânia, there is a high concentration of the population within the 1.5 to 3 minimum wage bracket, which corresponds to the predominant income range in the city. In these areas, the majority of residents experience travel times between 15 and 30 minutes to reach primary healthcare services. Neighborhoods such as Chácara São Joaquim, Santa Genoveva, and Jardim América had the highest average travel times, despite also being areas with lower income levels. Interestingly, wealthier neighborhoods such as Marista and Jardim Goiás also presented travel times in the 15–30 minute range. However, other areas, with high-income population, located in more distant and suburban regions, such as Aldeia do Vale and Parque Lozandes, registered longer travel times, often exceeding 30 minutes. Overall, travel times are shortest in central areas and longest in peripheral zones, with Goiânia's population largely concentrated in the intermediate income range and experiencing moderate accessibility. Based on the average travel time to

primary healthcare facilities, Goiânia can be classified as a 23.66 -minute city, in average (weighted by each hexagon population).

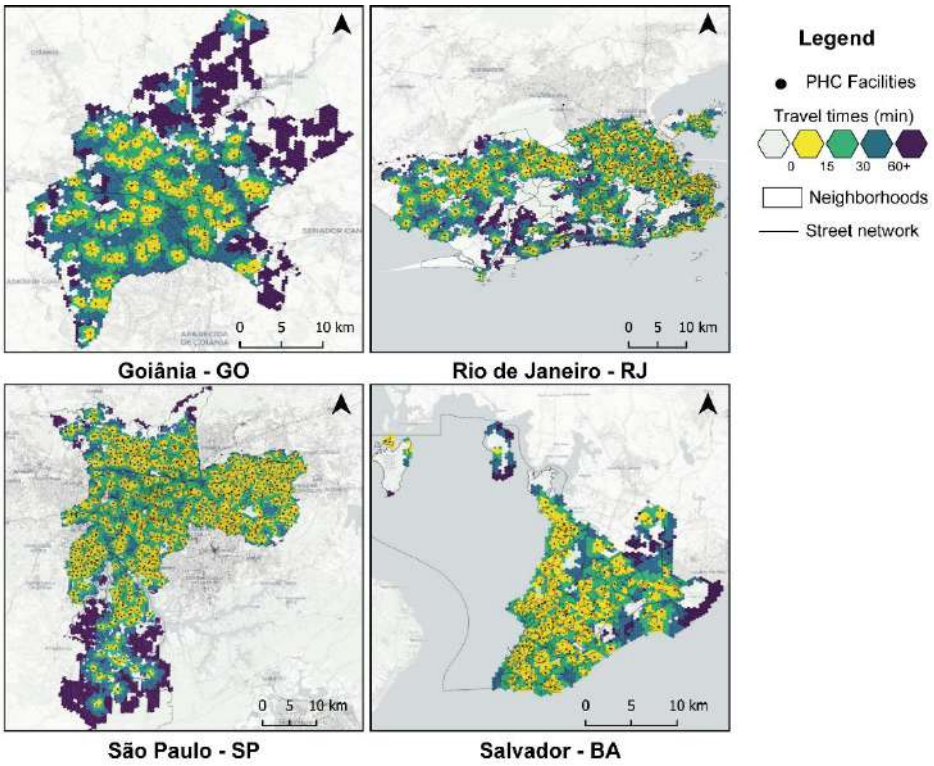


Figure 2: Spatial distribution of walking travel times to primary healthcare facilities across the four cities

In São Paulo, accessibility varies more markedly across neighborhoods and income levels. The low-income population are located in neighborhoods in the city's eastern zone, including Itaim Paulista, Guaianases, Lajeado, and Cidade Tiradentes, exhibited favorable accessibility, with average travel times below 15 minutes. However, other areas such as Jardim Helena, Brasilândia, and Jardim Ângela, with low-income residents, fell into the 15–30 minutes range. Within the dominant income bracket (1.5 to 3 minimum wages), neighborhoods like Capão Redondo, Vila Jacuí, São Miguel, and Cidade Ademar recorded short travel times, while others like Perus, Tremembé, and Anhanguera exceeded 30 minutes. Among middle- to upper-income groups, neighborhoods such as Mooca, Ipiranga, and Vila Sônia typically experiences travel times of 15 to 30 minutes, with exceptions like Jabaquara and Casa Verde presenting shorter access times. The wealthiest areas, including Vila Mariana, Pinheiros, and Moema, had travel times between 0 and 15 minutes, highlighting clear advantages in service access. São Paulo displayed significant variability within each income group and can be characterized as a 14.77-minute city, in weighted average.

In Rio de Janeiro, the relationship between income and travel time is more linear. Most low-income neighborhoods, such as Benfica, Jacaré, Maré, Vila Kennedy, Inhaúma, and Cosmos, presented short travel times (up to 15 minutes), while others like Sepetiba, Costa Barros, and Complexo do Alemão registering times between 15 and 30 minutes. Some peripheral areas, such as Santa Cruz and Guaratiba, showed average travel times above 30 minutes, with Grumari being the only neighborhood where travel times surpassed 60 minutes. Among neighborhoods in the 1.5 to 3 minimum wage range, central and highly urbanized areas such as Centro, Cidade Nova, and Santo Cristo had very short travel times, while areas like Madureira, Realengo, and Vila Militar fell into the 15–30 minute bracket. Middle- to high-income population, in neighborhoods such as Méier, Glória, and Pechincha, typically experienced travel times under 30 minutes. Meanwhile, affluent areas including Ipanema, Leblon, and Copacabana benefited from the shortest travel times, often under 15 minutes. On the other hand, wealthy neighborhoods located farther from the urban core, including Barra da Tijuca and Camorim, exhibited longer travel times, exceeding 30 or even 60 minutes. Overall, Rio can be classified as a 17.46 -minute city, in weighted average, with access improving as income increases, but with notable

exceptions due to urban sprawl and service concentration.

In Salvador, the pattern diverges from the other three municipalities. Most low-income population, particularly those earning between 0 and 3 minimum wages, exhibit travel times below 15 minutes. This includes the inhabitants of areas such as Cajazeiras V, Pau da Lima, São Marcos, Santa Luzia, and Periperi. Slightly longer travel times (15-30 minutes) are observed in areas undergoing urban consolidation or located at the urban fringe, such as Nova Brasília and Valéria. Only a few low-income population, from areas such as Itinga, Ilha de Maré, and Cassange, presented average travel times above 30 minutes. Among middle-income residents (1.5 to 5 minimum wages), located in areas like Costa Azul, Imbuí, and Pernambués, typically experience travel times between 15 and 30 minutes. Some neighborhoods with higher levels of high-income individuals, such as Patamares, Stella Maris, and Aeroporto, surprisingly registered longer travel times, often above 30 minutes. Salvador stands out for providing relatively good access to low-income citizens, with a more equitable distribution of healthcare facilities across income brackets. The city can be classified as a 14.97-minute city in a weighted average.

As illustrated in Figure 3, nearly two-thirds of the populations of São Paulo and Salvador are covered within a 15-minute travel time to primary healthcare facilities, characterizing them as closer to a "15-minute city" for basic health services. In contrast, only about half of Rio de Janeiro's population and less than 35% of Goiânia's population are covered within this threshold. When using a 90% population coverage threshold as a benchmark, São Paulo can be classified as a 25-minute city, Salvador as a 28-minute city, Rio de Janeiro as a 32-minute city, and Goiânia as a 43-minute city, highlighting substantial variation in service accessibility among these municipalities.

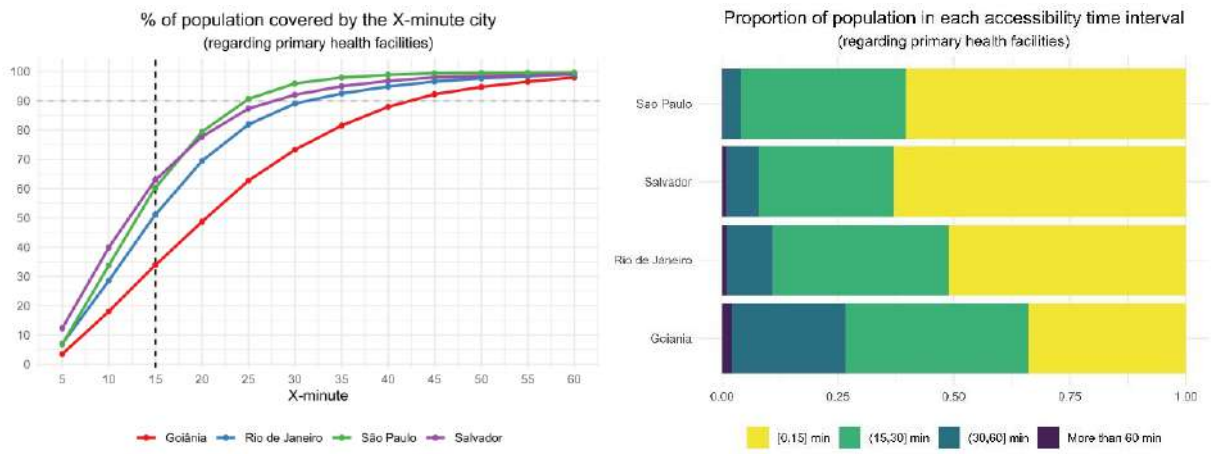


Figure 3: (a) % population covered by X-minute thresholds; (b) population by each categorical time interval threshold.

4. CONCLUSIONS

This study analyzed spatial accessibility to primary healthcare services in four Brazilian cities, considering variations in income levels and average travel times. The findings confirm a general trend: higher-income populations tend to have better access to healthcare services, with shorter travel times. However, the degree of spatial equity varies significantly across cities.

Salvador emerged as the city with the highest level of territorial inclusion, where low-income communities are more evenly distributed near basic healthcare units. In contrast, São Paulo and Rio de Janeiro demonstrate more pronounced social and spatial inequalities, with several peripheral and vulnerable neighborhoods experiencing limited access. Although Goiânia shows a relatively balanced income distribution, it is marked by higher average travel times across most income groups.

These results underscore the importance of considering spatial and socioeconomic dimensions in public health planning. Promoting equitable access to primary healthcare, particularly for vulnerable populations, requires targeted investments and urban policies aligned with principles of proximity and inclusivity, such as those

advocated by the 15-minute city framework.

Acknowledgements
The authors gratefully acknowledge the financial support of Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Process number: 88887.886769/2023-00, and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq-Brazil) – Process number: 163811/2021-0.

REFERENCES

Assis, Lucas Brandão Monteiro de, Francisco Roza de Moraes, Paulo Cesar Lima Segantine, Miguel José das Neves Pires Amado, and Irineu da Silva. 2024. "GeoCNES: Healthcare Mapping in Brazilian Cities - a Computational Tool for Improved Decision-Making." *Ciência & Saúde Coletiva* 29(11). DOI:10.1590/1413-812320242911.02672024.

Beaglehole, Robert, Jo Anne Epping-Jordan, Vikram Patel, Mickey Chopra, Shah Ebrahim, Michael Kidd, and Andy Haines. 2008. "Improving the Prevention and Management of Chronic Disease in Low-Income and Middle-Income Countries: A Priority for Primary Health Care." *The Lancet* 372(9642):Bell, Nathaniel, Ana Lòpez-De Fede, Bo Cai, and John Brooks. 2022. "Geographic Proximity to Primary Care Providers as a Risk-Assessment Criterion for Quality Performance Measures." *PLoS ONE* 17(9 September): 1–19. DOI:10.1371/journal.pone.0273805.

Brasil. (2024) Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde. Obtido 15 de abril de 2024, de https://cnes.datasus.gov.br/

Dantas, Marianny Nayara Paiva, Dyego Leandro Bezerra de Souza, Ana Mayara Gomes de Souza, Kezauyn Miranda Aiquoc, Talita Araujo de Souza, and Isabelle Ribeiro Barbosa. 2021. "Factors Associated with Poor Access to Health Services in Brazil." *Revista Brasileira de Epidemiologia* 24: 1–13. DOI:10.1590/1980-549720210004.

Dodd, Rebecca, Anna Palagyi, Stephen Jan, Marwa Abdel-All, Devaki Nambiar, Pavitra Madhira, Christine Balane, *et al.* 2021. "Organisation of Primary Health Care Systems in Low- and Middle-Income Countries: Review of Evidence on What Works and Why in the Asia-Pacific Region." *BMJ Global Health* 4(Suppl8): 1–15. DOI:10.1136/bmjgh-2019-001487.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025) Censo 2022. Obtido 10 de julho de 2025, de https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html

Kabir, Ashraful, Md Nazmul Karim, Rakibul M. Islam, Lorena Romero, and Baki Billah. 2022. "Health System Readiness for Non-Communicable Diseases at the Primary Care Level: A Systematic Review." *BMJ Open* 12(2). DOI:10.1136/bmjopen-2021-060387.

Kroezen, Marieke, Dheepa Rajan, and Erica Richardson. 2023. *Strengthening Primary Care in Europe: How to Increase the Attractiveness of Primary Care for Medical Students and Primary Care Physicians?*

Lima, Juliana Gagno, Ligia Giovanella, Aylene Bousquat, Márcia Fausto, and Maria Guadalupe Medina. 2022. "Barreiras de Acesso à Atenção Primária à Saúde Em Municípios Rurais Remotos Do Oeste Do Pará." *Trabalho, Educação e Saúde* 20. DOI:10.1590/1981-7746-ojs616.

Mendes, Eugênio Vilaça. 2015. *A Construção Social Da Atenção Primária à Saúde*. Brasília.

Moreno, Carlos, Zaheer Allam, Didier Chabaud, Catherine Gall, and Florent Pratlong. 2021. "Introducing the '15-Minute City': Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities." *Smart Cities* 4(1): 93–111. DOI:10.3390/smartcities4010006.

Oliveira, Ricardo Antunes Dantas de, Cristina Maria Rabelais Duarte, Ana Luiza Braz Pavão, and Francisco Viacava. 2019. "Barriers in Access to Services in Five Health Regions of Brazil: Perceptions of Policymakers and Professionals in the Brazilian Unifed National Health System." *Cadernos de Saude Publica* 35(11). DOI:10.1590/0102-311X00120718.

Pereira, Rafael H. M., Marcus Saraiva, Daniel Herszenhut, Carlos Kaue Vieira Braga, and Matthew Wigginton Conway. 2021. "R5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R 5 in R." *Findings*. DOI:10.32866/001c.21262.

Pereira, Rafael H.M., Carlos Kauê Vieira Braga, Luciana Mendes Servo, Bernardo Serra, Pedro Amaral, Nelson Gouveia, and Antonio Paez. 2021. "Geographic Access to COVID-19 Healthcare in Brazil Using a Balanced Float Catchment Area Approach." *Social Science and Medicine* 273(February). DOI:10.1016/j.socscimed.2021.113773.

Prener, Christopher, and Charles Revord. 2019. "Areal: An R Package for Areal Weighted Interpolation." *Journal of Open Source Software* 4(37): 1221. DOI:10.21105/joss.01221.

Starfield, Barbara. 1994. "Is Primary Care Essential?" *The Lancet* 344(8930): 1129–33. DOI:10.1016/S0140-6736(94)90634-3.

Tomasiello, Diego B., João Pedro B. Vieira, João Pedro F.A. Parga, Luciana M.S. Servo, and Rafael H.M. Pereira. 2024. "Racial and Income Inequalities in Access to Healthcare in Brazilian Cities." *Journal of Transport and Health* 34(September 2023). DOI:10.1016/j.jth.2023.101722.

Lucas Brandão Monteiro de Assis (lucasbrandao@usp.br)
Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Transportes - Av. Trabalhador Sãocarlense, 400 - São Carlos – SP, Brasil

BIKEABILITY INDEX IN CYCLING INFRASTRUCTURE PLANNING: MEASUREMENT IN DOWNTOWN PORTO ALEGRE, RS, BRAZIL.

Herberto Alancardeque Prado Xavier Neto[1, 2], **Diego Sampaio Tebaldi**[1], **Ana Margarita Larrañaga**[2]
[1]University of Brasília, [2]Federal University of Rio Grande do Sul

ABSTRACT
Bikeability serves as an indicator of how likely users are to choose each road segment when cycling. This work presents the formulation of a method for constructing a Bikeability Index based on user perception and its application for measurement on the streets of downtown Porto Alegre. The study addresses the gap in bikeability studies in the Global South, adapting the methodology previously proposed in a study conducted in Colombia. It involves a literature review on the topic, selection of factors and components for bikeability evaluation, estimation of weights for these factors and components based on declared preference survey data, field surveys, and application of the index equation. The results, georeferenced by cyclist type and trip purpose, adequately demonstrated the bikeability conditions of the neighborhood. Roads with exclusive infrastructure showed higher indices. A prevalence of medium bikeability was observed in the region.

1. INTRODUCTION

The prioritization of non-motorized transport modes in transport planning aligns with the growing perception of bicycle as a sustainable and beneficial mode (Buehler and Dill, 2016). The increase in its use post-COVID-19 (CAU/RJ, 2022) reinforces the need for cycling infrastructure, which is crucial for public health and urban resilience (Schwedhelm et al., 2020). However, users' perceptions regarding road infrastructure and built environment conditions can impact people's travel decisions for active transport modes – walking or cycling (Larrañaga, 2016).

Despite the existence of various metrics proposed in technical literature, these are rarely considered in cycling infrastructure planning processes. In some cities, the decision-making process tends to be formed by planners (technicians), elected politicians, and citizens. In cities of the Global South, especially medium and small towns, this is an established pattern in the (weak) planning process. In this context, a tool capable of predicting bicycle travel demand based on built environment attributes can help strengthen and inform decision-making.

Metrics such as the Bicycle Level of Service (BLOS) (Illie et al., 2016) and the Bikeability Index (BI) evaluate cycling quality (Saghapour et al., 2017; Molino, 2017), but their application is limited in the Global South, with few existing studies; for example: Bai et al. (2017) - in China, Beura and Bhuyan (2017), Beura and Bhuyan (2018) – in India, Okon and Moreno (2019) – in Colombia. The limited research in the region hinders proper consideration of local factors such as security and mixed traffic. Bikeability is influenced by factors such as comfort, linearity, coherence, attractiveness, and safety (Bach, 2006). Traffic safety and public security are essential aspects, with public safety being less addressed in overall studies, despite its importance in the Global South (Arellana et al., 2020). In this context, the methodology proposed by Arellana et al. (2020) for Barranquilla, Colombia, based on the perception of Latin American users, becomes particularly relevant. We adapted and applied this index to estimate Bikeability Indices in downtown Porto Alegre, RS, Brazil.

2. METHOD

The method consists in three stages: (i) Factor and component selection, (ii) Weight estimation, (iii) Data collection and Bikeability Index estimation. The first two stages were developed in the previously mentioned study conducted in Colombia. We briefly describe them below.

In the first stage, seven factors were used to measure bikeability, including some observable and some non-observable: (i) Directness and coherence (observable); (ii) Comfort and attractiveness (non-observable); (iii) Traffic safety (non-observable); (iv) Security (non-observable); (v) Climate (observable); (vi) Presence of cycling infrastructure (observable); and (vii) Cost of the trip (observable). Non-observable factors are assessed through sets of components. For example, "Comfort and Attractiveness" includes aspects such as physical infrastructure, pavement quality, obstacles, and aesthetics. Observable factors, on the other hand, are measured directly from the context being evaluated. Some factors, such as "Directness and coherence" and "Climate" required specific considerations in the Brazilian context. "Directness and coherence" was not explored in depth due to the unavailability of traffic assignment data, and "Climate" was considered constant given the relatively

stable weather conditions in the study area.

The second stage consists of determining the weights of the factors and components. These weights were originally estimated for Barranquilla through perception surveys and the estimation of a Multinomial Logit Model, accounting for preferences heterogeneity by cyclist type (frequent/non-frequent) and trip purpose (sport/work/shopping). We adopted the same weights due to socioeconomic similarities with Porto Alegre. The weights adopted for each factor can be checked at Arellana et al. (2020).

The third stage comprises data collection and the estimation of the Bikeability Index. This stage involves: constructing the street network for the city center using QGIS, defining the relevant attributes and their corresponding levels, collecting data for each observable factor and component at the segment level, calculating the Bikeability Index for each street segment, and generating spatial maps to represent the distribution of bikeability across the study area.

Streets segments were first evaluated based on their characteristics related to the predefined factors and components. This evaluation combined visual assessments, conducted via Google Street View and in loco inspection, with spatial measurements. All variables were standardized on a scale from 0 to 1 according to criteria presented in Table 1.

Table 1: Evaluation criteria of non-observable factors and their observable components

FACTOR	COMPONENTS	MEASUMENT VARIABLES (LEVELS)	METHOD/SOURCE
Comfort & Attractiveness	Presence of bicycle infrastructure	Bike path present (1); Bike path absent (0)	GSV
	Quality of bike path pavement	Good (1); At least one lane good (0.5); Bad (0)	GSV
	Obstacles on bike path	Low obstruction (1); Medium obstruction (0.5); High obstruction (0)	GSV
	Slope of bike path	< 8.33% (1); > 8.33% (0)	GIS
	Width of bike path	Width ≥ 1.5m (one way) or ≥ 2.5m (double way) (1); Width ≤ 1.5m (one way) or ≤ 2.5m (double way) (0)	GSV / CAD
	Presence of trees	Trees/m ≥ 0.02 (1); 0.01 ≤ Trees/m ≤ 0.02 (0.5); Trees/m < 0.01 (0)	GSV / CAD
	Aesthetics of buildings	Very good conditions (1); Good conditions (0.8); Medium conditions (0.6); Reasonable conditions (0.4); Bad conditions (0.2); Very bad conditions (0)	GSV
Traffic Safety	Presence of bicycle infrastructure	Bike path present (1); Bike path absent (0)	GSV
	Presence of traffic control devices	Present (1); Absent (0)	GSV
	Bus traffic flow	Segregated flow or # of bus lines < 10 (1); 10 ≤ # of bus lines ≤ 30 (0.5); # of bus lines > 30 (0)	Cittamobi
	Vehicle traffic flow	Very low (1); Low (0.75); Moderate (0.5); High (0.25); Very high (0)	Visual inspection
	Motorcycle traffic flow	Low (1); Moderate (0.5); High (0)	Visual inspection
	Pedestrian traffic flow	High (1); Adequate (0.8); Medium (0.6); Low (0.4); Inadequate (0.2); Desert (0)	Visual inspection
	Motorized traffic speed	Speed ≤ 8 km/h (1); 8 km/h < Speed ≤ 16 km/h (0.8); 16 km/h < Speed ≤ 24 km/h (0.6); 24 km/h < Speed ≤ 32 km/h (0.4); 32 km/h < Speed ≤ 48 km/h (0.2); Speed > 48 km/h (0)	Urban mobility plan compatibilized with Waze average speeds
Security	Presence of police officers	Present (1); Absent (0)	Visual inspection
	Presence of security cameras	Present (1); Absent (0)	Visual inspection
	Bike traffic flow	Present (1); Absent (0)	Visual inspection
	Lighting	Adequate (1); Medium (0.5) Low (0)	Visual inspection
	Criminality on roads	Present (1); Absent (0)	News on murders available on media

The Bikeability Index (BI_{lq}) is calculated as a weighted additive function, as Equation 1, following the methodology proposed by Arellana et al. (2020):

$$BI_{lq} = \sum_{n \in N} P^*_{nq} C_{nl} + \sum_{m \in M} P^*_{mq} \sum_{c \in C_m} P^*_{cmq} C_{cml} \quad (1)$$

Where N and M represent observable and non-observable factors, C_m are the components of factor *m*, P^* are the respective weights, and C are the variables measured for each factor/component in the segment *l*.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The calculated Bikeability Indices were georeferenced for spatial analysis, providing an overview of bikeability by type of cyclist and trip purpose. The analysis revealed that, for all types of cyclists and trip purposes, the segments of Siqueira Campos St. consistently presented the highest Bikeability Indices. Siqueira Campos St. stands out due to its adequate bike lane, low slope, absence of obstacles, presence of trees, traffic control devices, police officers, cameras, and good lighting. In contrast, the worst sections were on Mauá Av. Despite the intense vehicle flow, it lacks safe infrastructure in some sections. However, the introduction of a bike lane some blocks ahead leads to a marked improvement in the indices, due to protection from heavy traffic. Figure 1 shows a bikeability map taken for work trips made by frequent cyclists, for example. The position of Siqueira Campos St. is indicated through an arrow pointing "(1)". In order to compare such segments, Table 3 details the characteristics measured at these.



Figure 1: Bikeability map for work trips made by frequent cyclists

Figure 2 contextualizes – through street view pictures - about the characteristics of both the best segment evaluated and the worst one. The presence of bicycle infrastructure accounts for good results in all scenarios. Table 2 details the evaluation of two segments according to the criteria, as well as the Bikeability Index (BI) obtained by each segment for frequent and non-frequent cyclists taking trips for the different purposes.



Figure 2: Best segment on Siqueira Campos St. (on the left), and worst one on Mauá Av. (on the right)

Table 2: Evaluation of two segments according to each criteria. #34 was the best segment in all scenarios, #28 was among the worst in all scenarios.

Segment Evaluation	#34 (Siqueira Campos St.)	#28 (Mauá Av.)
1. Presence of bicycle infrastructure	1,0	0,0
2. Quality of bike path pavement	1,0	1,0
3. Obstacles on bike paths	1,0	0,0
4. Slope of bike paths	1,0	1,0
5. Width of bike paths	1,0	0,0
6. Presence of trees	0,5	0,0
7. Aesthetics of buildings	0,6	0,6
8. Presence of bicycle infrastructure	1,0	0,0
9. Presence of traffic control devices	1,0	0,0
10. Bus traffic flow	0,5	0,0
11. Vehicle traffic flow	0,3	0,0
12. Motorcycle traffic flow	0,0	0,0
13. Pedestrian volume	0,5	0,5
14. Motorised transport speed	0,2	0,0
15. Presence of police officers	1,0	0,0
16. Presence of security cameras	1,0	0,0
17. Bicycle flow	1,0	0,0
18. Lighting	1,0	1,0
19. Criminality on roads	1,0	1,0
20. Presence of bicycle infrastructure	1,0	0,0
21. Cost of the trip	0,0	0,0
22. Climate	1,0	1,0
23. Coherence and directness	-	-
BI - Frequent cyclist - Sport	**0,785**	**0,264**
BI – Frequent cyclist - Work	**0,683**	**0,285**
BI - Frequent cyclist - Shopping	**0,708**	**0,319**
BI - Non-frequent cyclist - Sport	**0,777**	**0,255**
BI - Non-frequent cyclist - Work	**0,710**	**0,292**
BI - Non-frequent cyclist - Shopping	**0,669**	**0,310**

The classification of the indices into High (0.6≤BI), Medium (0.4≤BI<0.6), and Low (BI<0.4) bikeability showed the prevalence of *medium bikeability* for most typologies. The measurement of the bikeability index offers significant policy implications for the planning and management of cycling infrastructure, especially in cities in the Global South. By identifying road segments with the lowest bikeability indices, authorities can investigate the reasons for these low scores, analyzing which factors and components (such as pavement quality, presence of obstacles, traffic safety, or public safety) had the most significant impact on the negative evaluation (Arellana et al., 2020; Ito and Biljecki, 2021; Queiroz et al., 2020). This analysis directs public efforts towards resolving objective problems that, from the users' perspective, will contribute most to promoting greater bicycle circulation (Biassoni et al., 2023). Furthermore, the ability to simulate travel demand behavior by altering road segment characteristics (such as the inclusion of a bike lane or cycle track) allows for prioritizing investments in cycling infrastructure that attract the greatest demand from cyclists, making decisions more informed and effective (Arellana et al., 2020).

4. CONCLUSION

This work contextualized active mobility and the relevance of bikeability, applying the methodology of Molino (2017) and Arellana et al. (2020) in downtown Porto Alegre. The results confirmed the prevalence of medium bikeability. Roads with cycling infrastructure, such as Siqueira Campos St., stood out with higher indices, driven by comfort, attractiveness, and safety. Mauá Av., in some sections, presented the worst indices.

To improve future evaluations, it is suggested to construct the Bikeability Index based on the perception of local users in Porto Alegre, through the application of a locally stated preference survey. The eventual

availability of data from the most recent Origin and Destination and Household Survey taken by the Municipal Government of Porto Alegre would allow for the complete development of a tool for prioritizing investments in cycling infrastructure, with more precise classifications.

REFERENCES

Arellana, J.; M. Saltarín,; A. M. Larrañaga; V. I. González and C. A. Henao (2020). Developing an urban bikeability index for different types of cyclists as a tool to prioritise bicycle infrastructure investments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 139, p. 310-334. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.07.010

Bach, H (2006). *Urban Design and Traffic: a Selection from Bach's Toolbox*. CROW, Ede.

Bai, L. P. Liu; C. Y. Chan and Z. Li (2017). Estimating level of service of mid-block bicycle lanes considering mixed traffic flow. *Transportation research part A: policy and practice* 101, p. 203-217. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.04.031

Beura, S. K. and P. K. Bhuyan (2017). Development of a bicycle level of service model for urban street segments in mid-sized cities carrying heterogeneous traffic: A functional networks approach. Journal of traffic and transportation engineering. V. 4, issue 6, p. 503-521. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.02.003

Beura, S. K. and P. K. Bhuyan (2018). Quality of bicycle traffic management at urban road links and signalized intersections operating under mixed traffic conditions. *Transportation research record* 2672 (36), p. 145-156. DOI: https://doi.org/10.1177/0361198118796350

Biassoni, F.; C. Lo Carmine; P. Perego and M. Gnerre (2023). Choosing the Bicycle as a Mode of Transportation, the Influence of Infrastructure Perception, Travel Satisfaction and Pro-Environmental Attitude, the Case of Milan. *Sustainability*, v. 15, n. 16, p. 1-14. DOI: https://doi.org/10.3390/su151612117

Buehler, R. and J. Dill (2016). Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling. *Transport Reviews*, v. 36, p. 9-27. DOI: https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069908

Conselho de Arquitetura e Urbanismo – RJ (CAU/RJ). Pandemia faz número de bicicletas nas ruas brasileiras aumentar. 2022. Available in: https://www.caurj.gov.br/pandemia-faz-numero-de-bicicletas-nas-ruas-brasileiras-aumentar/ (acessed 07/07/2025).

Illie, A.; C. Oprea; D. Costescu; E Roşca, O. Dinu and F. Ghionea (2016). The use of the bicycle compatibility index in identifying gaps and deficiencies in bicycle networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012097

Larrañaga, A. M.; H. B. B. Cybis and T. B. Torres (2016). Estimando a importância de características do ambiente construído para estimular bairros caminháveis usando o best-worst scaling. *Revista Transportes*, v. 24, n. 2, p. 13-20. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v24i2.1091

Molino, M. A. S (2017). *Diseño de una metodología para evaluación de accesibilidad de transporte no motorizado*. PhD thesis. Universidad del Norte. 115 pages. Available in: http://hdl.handle.net/10584/8960

Okon, I. E. and C. A. Moreno (2019). Bicycle level of service model for the Cycloruta, Bogota Colombia. *Romanian Journal of Transport Infrastructure* 8 (1), p. 1-33. DOI: https://doi.org/10.2478/rjti-2019-0001

Queiroz, A. R. N.; E. M. Rodrigues; A. M. Marins and S. R. I. Pires (2020). Geospatial indicators of bikeability index as cycle-friendly city design: a systematic review. *Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde*, v. 25, p. 1-13. DOI: https://doi.org/10.12820/rbafs.27e0255

Saghapour, T.; S. Moridpour and R. G. Thompson (2017). Measuring cycling accessibility in metropolitan areas. *International Journal of Sustainable Transportation* 11 (5), pg. 381-394. DOI: https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1262927

Schwedhelm, Alejandro; L. Harms and C. Adriazola-Steil. Bicicletas têm papel crucial na resiliência das cidades durante crise da Covid-19. WRI Brasil. Apr. 2020. Available in: https://www.wribrasil.org.br/noticias/bicicletas-tem-papel-crucial-na-resiliencia-das-cidades-durante-crise-da-covid-19?gclid=CjwKCAjw4ZWkBhA4EiwAVJXwqXUpSBPaNFuIK0HsQO1OgabiiFhG1txJSo1eRrlE8XtPZY9imGT1KhoCIWEQAvD_BwE (accessed 07/07/2025)

Herberto Alancardeque Prado Xavier Neto (241131731@aluno.unb.br / herberto.neto@dnit.gov.br)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Transportes, Anexo SG 12 – Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília – DF – Brasil
Diego Sampaio Tebaldi (241038610@aluno.unb.br / diego.tebaldi@dnit.gov.br)
Universidade de Brasília, Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia (FCTE), St. Leste Projeção A – Gama Leste, Brasília – DF – Brasil
Ana Margarita Larrañaga (analarra@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Sistemas de Transportes, Departamento de Engenharia de Produção e Transportes, Av. Osvaldo Aranha, 99 – 5º andar. Bairro Farroupilha. Porto Alegre – RS – Brasil.

BOAS PRÁTICAS DAS UNIVERSIDADES FEDERAIS DE MINAS GERAIS: CONSTRUÇÃO DE UM CAMPUS VIVO E PARTICIPATIVO

Mateus Gonçalves da Silva[1], **Daniela Antunes Lessa**[1,2], **Bárbara Abreu Matos**[1,2], **Júlia Evenny Silva Alves**[1], **Rayane Raíssa G. Virgílio das Dores**[1], **Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos**[2]
[1]Universidade Federal de Ouro Preto, [2]Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
Os espaços públicos, como expressões materiais e simbólicas da vida urbana, podem promover inclusão, pertencimento e bem-estar. As universidades, por sua função social, têm potencial para catalisar essa transformação. Com base no conceito de Campus Vivo e nos eixos de Jan Gehl (proteção, conforto e prazer), este artigo analisa iniciativas de universidades federais mineiras voltadas à valorização do pedestre e à qualificação dos espaços universitários. Os resultados indicam ações em sustentabilidade, segurança, cultura e bem-estar, que reforçam a função pública dos campi. No entanto, persistem lacunas na transparência das informações e na continuidade das iniciativas, além da ausência de estratégias que integrem plenamente os campi ao tecido urbano. Conclui-se que, apesar dos avanços, é necessário fortalecer políticas institucionais que promovam o campus como espaço público vivo, com gestão participativa e compromisso com a qualidade de vida universitária e urbana.

1. AS UNIVERSIDADES FEDERAIS DE MINAS GERAIS ENQUANTO ESPAÇO PÚBLICO

Os espaços públicos urbanos são construções coletivas, resultantes de práticas, temporalidades e usos sociais sobrepostos, que carregam experiências, memórias e significados simbólicos e afetivos, configurando verdadeiros "lugares" vividos pelos sujeitos (Ribeiro, 2008; Santos, 1978; Tuan, 1975). Quando mal planejados, esses espaços tendem a aprofundar desigualdades e fragmentações urbanas, reforçando processos de segregação (ONU-Habitat, 2017). A mobilidade urbana atua como elemento estruturante do direito à cidade, extrapolando o simples deslocamento físico para incluir o acesso equitativo a bens, serviços e oportunidades, valorizando a mobilidade ativa e a acessibilidade universal (Crea Paraná, 2016; Brasil, 2007; Bantel, 2005; Klein e Grigoletti, 2021). A requalificação dos espaços públicos, que priorize o pedestre, o conforto ambiental e a segurança, fortalece o pertencimento e a qualidade de vida urbana (Jacobs, 2000; Speck, 2017; Gehl, 2015).

As universidades federais brasileiras, além das funções acadêmicas, configuram-se como espaços públicos estratégicos para a vida urbana. Embora historicamente marcadas por uma diversidade de usos e atores, as instituições enfrentam desafios frente à lógica privatista urbana, que restringe o acesso e fragiliza a função social desses espaços (Bezerril e Silva, 2023; Arantes, 2021). Reconhecer os campi como territórios vivos implica em valorizar a permanência, o encontro e a vitalidade social, de acordo com os princípios propostos por Jan Gehl (2015). O conceito de Campus Vivo (Silva, 2025), propõe transformar os espaços universitários em territórios acolhedores, acessíveis e vibrantes, estimulando a presença e a experiência qualificada dos usuários. Tal perspectiva dialoga com a "caixa de ferramentas" de Gehl, que enfatiza espaços protetores, confortáveis e agradáveis, visando a promoção de ambientes urbanos centrados no pedestre (Gehl, 2015).

Este artigo tem como objetivo identificar ações e projetos nas universidades federais de Minas Gerais que contribuam para a construção do Campus Vivo, valorizando a qualificação dos espaços e a centralidade do pedestre. A escolha da região se justifica pela concentração de instituições da Rede Federal de Ensino Superior, que desempenham papel estratégico nos contextos urbano e regional. Foram analisadas as universidades Federal de Minas Gerais (UFMG), Federal de Ouro Preto (UFOP), Federal de Uberlândia (UFU), Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Federal de São João Del-Rei (UFSJ), Federal de Viçosa (UFV), Federal de Lavras (UFLA), Federal de Juiz de Fora (UFJF), Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) e Federal de Itajubá (UNIFEI), por meio de levantamento documental e análise crítica das ações que dialogam com os princípios do Campus Vivo.

2. ANÁLISE DAS INICIATIVAS GERAIS DAS UNIVERSIDADES FEDERAIS MINEIRAS

Este trabalho integra a dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental de Silva (2025) e tem como objetivo identificar e analisar iniciativas presentes em universidades públicas de Minas Gerais que contribuam para a consolidação de campi mais vivos, acessíveis e sustentáveis. Para isso, adotou-se uma abordagem qualitativa, baseada em levantamento documental exploratório nos portais institucionais das universidades federais mineiras. Foram observadas informações relativas a ações de extensão, projetos de infraestrutura, programas

de sustentabilidade, acessibilidade e mobilidade, com base em critérios alinhados aos eixos de Jan Gehl: proteção, conforto e prazer (Tabela 1), conforme proposição do Campus Vivo (Silva, 2025). O recorte espacial, centrado nas instituições públicas de ensino superior do estado de Minas Gerais, justifica-se tanto pela relevância regional quanto pela diversidade territorial, institucional e social presente nessas universidades. A análise buscou identificar boas práticas, lacunas e potencialidades, contribuindo para o debate sobre o papel das universidades na promoção de ambientes urbanos mais integradores e humanizados.

Tabela 1 - Os critérios de qualidade com respeito à paisagem do pedestre

PROTEÇÃO		
Proteção contra o tráfego e sinistros – sensação de segurança.	Proteção contra o crime e a violência – sensação de segurança.	Proteção contra experiências sensoriais desconfortáveis.
CONFORTO		
Oportunidades para caminhar.	Oportunidades para permanecer em pé.	Oportunidades para sentar-se.
Oportunidades para ver.	Oportunidades para ouvir e conversar.	Oportunidades para brincar e praticar atividade física.
PRAZER		
Escala.	Oportunidades de aproveitar os aspectos positivos do clima.	Experiências sensoriais positivas.

Fonte: Adaptado de Gehl (2015).

3. RESULTADOS

As universidades federais mineiras têm desenvolvido diversas iniciativas que reforçam seu compromisso com a sustentabilidade, inclusão e qualificação dos espaços universitários. A Universidade Federal de Uberlândia (UFU) destaca-se pelo reconhecimento do Selo ODS Educação e pela atuação da Diretoria de Sustentabilidade, com projetos de eficiência energética e o Selo A3P do Ministério do Meio Ambiente (Comunica UFU, 2025). Na UNIFAL-MG, há projetos de economia circular, como o reaproveitamento de resíduos vinícolas, e iniciativas interdisciplinares que fortalecem práticas sustentáveis e justiça socioambiental (Jornal UNIFAL-MG, 2025). A UFMG propõe no Plano de Desenvolvimento Institucional (2024–2029) um "campus do centenário" focado em planejamento sustentável e integração social (UFMG, 2024). A UFV (2025) avalia infraestrutura, conforto, segurança e acessibilidade no VII Ciclo de Autoavaliação (2022–2024), enquanto a UFVJM estrutura metas para desenvolvimento regional e sustentabilidade, embora com pouca informação atualizada sobre a execução (UFVJM, 2021). A UFJF investe em espaços de convivência, como ciclovias e áreas verdes, reforçando sua função social (UFJF, 2025). A UFLA (2025) promove conforto integral com ações em saúde mental, nutrição, sustentabilidade e segurança, ampliando o bem-estar da comunidade.

Com base nos critérios de Jan Gehl (2015), o eixo da proteção refere-se à criação de ambientes seguros, previsíveis e acolhedores, que resguardem os usuários do tráfego, da violência e das intempéries. Diversas universidades mineiras têm adotado ações nesse sentido, evidenciando o papel da gestão institucional na promoção da segurança física, emocional e social no ambiente universitário. Na UFU, destacam-se iniciativas como a cartilha educativa sobre mudanças climáticas, elaborada por projeto da Faculdade de Direito, e a campanha "UFU Segura", que amplia os canais de denúncia via WhatsApp por meio da Divisão de Vigilância (Divig). A substituição da iluminação no Campus Santa Mônica, através do Programa de Eficiência Energética da Cemig, e a sinalização viária realizada em parceria com a Settran reforçam a segurança no trânsito e promovem a proteção de pedestres e ciclistas (Comunica UFU, 2025).

A UNIFAL-MG associa proteção à cultura e ao pertencimento, com ações como a Feira Literária, projetos de xadrez e eventos educativos, promovendo um ambiente mais acolhedor e ativo (Jornal UNIFAL MG, 2025). Na UFMG, o plano de segurança no Campus Pampulha conta com câmeras nas entradas, rondas constantes e canais emergenciais. Já no Campus Saúde, foram realizadas campanhas voltadas à segurança viária e ao uso compartilhado dos modos de transporte (UFMG, 2019). A UFV desenvolveu o programa "SOS Campus", que permite denúncias em tempo real enviadas à unidade de segurança, além da melhoria da iluminação noturna e da oferta de espaços para lazer e atividade física, alinhados à proteção e ao conforto urbano (NTI e DTI UFV (2019); Guimarães, 2023).

Na UFVJM, a proteção aparece como diretriz estratégica no Plano Estratégico Institucional (PEI), especialmente voltada à promoção da saúde e do bem-estar, buscando um ambiente mais seguro e acolhedor (UFVJM, 2021). Já a UFJF reforçou recentemente seu efetivo de vigilância armada, ampliando a sensação de segurança no campus (UFJF, 2023). Por fim, a UFLA desenvolve o projeto "Segurança no Campus", com ações educativas sobre trânsito, circulação de animais e prevenção de incêndios, aliadas a sistemas de vigilância 24h, iluminação reforçada, transporte interno noturno e cartilhas informativas que fomentam a cultura preventiva (UFLA, 2025). A UFTM demonstra preocupação com a proteção da comunidade acadêmica ao discutir, junto à Polícia Militar, estratégias para melhorar a segurança no entorno da Unidade Abadia, como reforço no policiamento, instalação de câmeras e intensificação de rondas. Essas ações visam garantir maior tranquilidade e bem-estar a estudantes e servidores (UFTM, 2025).

Quanto ao critério Conforto, segundo Gehl (2015), refere-se à criação de ambientes que favorecem a permanência, o bem-estar físico e emocional e a qualidade da experiência urbana cotidiana. As universidades analisadas demonstram iniciativas diversas voltadas à qualificação do espaço e à promoção de ambientes acolhedores, seguros e funcionais. Na UFU, destacam-se ações culturais e de saúde mental, como oficinas de teatro, sessões do Cine UFU e o grupo psicoeducativo "Tô de boas! #SQN", que contribuem para um ambiente mais humano e propício ao convívio. A construção de praças e melhorias paisagísticas nos campi complementam esse cenário, reforçando a qualidade espacial e emocional do campus (Comunica UFU, 2025).

A UNIFAL-MG desenvolve o projeto "Via do Conhecimento", que propõe a implantação de uma Zona 30 no entorno do campus, articulando mobilidade segura com qualificação do espaço público (Jornal UNIFAL MG, 2025). A UFV, por sua vez, investiu na implantação de ciclofaixas, promovendo a mobilidade ativa e o conforto nos deslocamentos diários (DTI, UFV). A UFVJM contempla diretrizes voltadas à ampliação da infraestrutura e assistência estudantil, favorecendo a permanência e o convívio no ambiente universitário (UFVJM, 2021). A UFJF promove conforto através de investimentos em infraestrutura cicloviária, ações educativas e abertura do campus a eventos culturais e esportivos, alinhando-se à criação de espaços mais convidativos e acessíveis (UFJF, 2016; 2023; 2024b). Na UFOP, o projeto Campus Aberto ofereceu atividades educativas e culturais abertas à comunidade, com valorização do espaço público. Apesar de seu impacto positivo, a iniciativa foi descontinuada, revelando desafios de continuidade institucional (UFOP, 2019).

Na UNIFEI, a Diretoria de Cultura e Extensão Social e o CEFE promovem ações que integram arte, cultura, esporte e bem-estar, fortalecendo vínculos com o espaço universitário e promovendo permanência qualificada (UNIFEI, 2025). De forma similar, a UFLA amplia o conceito de conforto ao incorporar ações de cuidado integral, como yoga, meditação, nutrição e atividades físicas, promovendo saúde e equilíbrio na vida acadêmica (UFLA, 2025). A UFSJ, com a ampliação do projeto Pedal Livre, disponibilizará 400 bicicletas nos campi de Divinópolis e Sete Lagoas, incentivando a mobilidade sustentável (UFSJ, 2025). A UFTM conta com espaços voltados para a cultura e o lazer, como o Show de Talentos e as oficinas de teatro gratuitas abertas à comunidade. Essas ações incentivam a convivência, a criatividade e o bem-estar (UFTM, 2025).

O critério Prazer, conforme os critérios de Gehl (2015), diz respeito à criação de espaços públicos que promovam experiências sensoriais positivas, envolvimento afetivo e bem-estar social. As universidades mineiras têm adotado diferentes estratégias para tornar seus campi mais atrativos e acolhedores, reforçando sua dimensão simbólica e cultural. Na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a suspensão temporária do uso de espaços abertos durante ondas de calor extremo reflete sensibilidade institucional ao conforto térmico dos usuários, embora evidencie também limitações na resiliência desses ambientes frente a eventos climáticos adversos (Comunica UFU, 2025). Já a Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) integra lazer, cultura e território em ações como o 1º Encontro Regional de Cozinha Mineira e Turismo Rural, promovendo vínculos identitários e experiências sensoriais compartilhadas (Jornal UNIFAL MG, 2025).

A Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) destaca-se pelo Jardim Mandala, que reúne mais de 130 espécies de plantas medicinais e aromáticas, estimulando sentidos como olfato e visão e despertando memórias afetivas (UFMG, 2021). De modo semelhante, o Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), oferece um espaço de alta diversidade ecológica e valor cultural, favorecendo o contato com a natureza e o bem-estar ambiental (UFJF, 2024). Na Universidade Federal de Viçosa (UFV), a arborização extensa do

campus contribui para uma ambiência agradável e sombreamento natural, além de favorecer a permanência e o lazer ao ar livre. A UFLA investe em soluções arquitetônicas que priorizam o conforto ambiental, como construções que aproveitam iluminação e ventilação natural, jardins que mantêm o conforto térmico, uso de bicicletários com energia solar e sistemas de reuso da água (UFLA, 2024). A UFTM promove a integração entre a comunidade acadêmica e local por meio do Centro Cultural, que desenvolve ações de aproveitamento e formação cultural, contribuindo para o bem-estar e a transformação social dos indivíduos (UFTM, 2025).

A Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ) promove o retorno do Inverno Cultural em 2025 com o tema "REGENERA", ocupando os campi e espaços urbanos com atividades artísticas gratuitas, fortalecendo o uso simbólico da cidade por meio da arte (UFSJ, 2025). Já a UFVJM valoriza, em seu Plano Estratégico Institucional, o fortalecimento da cultura e da extensão como dimensões fundamentais para a vivência universitária e a valorização do espaço como lugar de pertencimento (UFVJM, 2021). Além disso, a UFOP contribui com ações educativas e ambientais por meio do Grupo de Gestão de Resíduos (GRUFOP), que associa práticas sustentáveis à vivência comunitária, reforçando a dimensão afetiva do espaço universitário através de extensões universitárias (UFOP, 2024).

4. CONCLUSÕES

A análise das iniciativas em universidades federais de Minas Gerais evidencia um movimento relevante de qualificação dos espaços universitários, que ultrapassa a função acadêmica e assume um papel ativo na construção de territórios mais humanos, inclusivos e sustentáveis. As ações mapeadas demonstram esforços em articular sustentabilidade, segurança, bem-estar e cultura, promovendo vivências que dialoguem com os eixos de Jan Gehl e com o conceito de Campus Vivo. No entanto, persistem desafios importantes, como a descontinuidade de projetos, a fragilidade da gestão integrada dos campi e a escassez de informações sistematizadas e acessíveis à comunidade. Assim, é fundamental que as universidades consolidem políticas institucionais duradouras que compreendam o campus como espaço urbano pleno, aberto à sociedade, gerido de forma participativa e capaz de promover experiências sensoriais, afetivas e coletivas. Somente com esse compromisso será possível fortalecer os vínculos entre universidade, território e comunidade, ampliando o potencial transformador do espaço universitário.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo fomento à pesquisa, aos programas de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes da UFMG e em Engenharia Ambiental da UFOP. Além das contribuições dos Departamentos de Engenharia Urbana (DEURB) e Engenharia Civil (DECIV) da Escola de Minas da UFOP e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arantes, R. A. (2021) O(s) espaço(s) público(s) numa cidade desigual e segregada. *Caderno CRH,* 34. DOI: https://doi.org/10.9771/ccrh.v34i0.27018.

Bantel, G. (2005) Bicicletas, veículos não motorizados (VNM). *Revista dos Transportes Públicos – ANTP* – Ano 27. Disponível em: http://files.antp.org.br/2016/4/6/revista-completa-106.pdf (acesso em 15/07/2025).

Bezerril, A. e M. J. V. Silva. (2023) Muros invisíveis?: Processos de integração/segregação entre sujeitos no entorno da escadaria de Mãe Luiza, e as praias de Areia Preta e Miami em Natal/RN. *Turismo e Sociedade*, v. 15, n. 2, p. 282-301.

Brasil. (2007) Ministério das Cidades. Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta – Bicicleta Brasil. Caderno de Referência para elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades. Brasília: Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana.

Comunica UFU. (2025) Portal de Notícias UFU. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: https://comunica.ufu.br/ (acesso em 15/07/2025).

CREA PARANÁ. (2016) Mobilidade Urbana. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar. Disponível em: https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/mobilidade-urbana.pdf. Acesso em 05 maio 2025.

DTI UFV. (2019) Diretoria de tecnologia da informação da UFV. Disponível em: https://www1.dti.ufv.br/ (acesso em 15/07/25).

Gehl, J. (2015) *Cidades para pessoas*. São Paulo: Perspectiva. 280 p.

Guimarães, V. M. L. Viver a praça, imaginar a cidade: uma análise dos usos das praças públicas de Viçosa – MG. 2023. Monografia (Bacharelado em Ciências Sociais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2023.

Jacobs, J. (2000) *Morte e vida de grandes cidades*. São Paulo: Martins Fontes.

Jornal UNIFAL MG. (2025) Jornal UNIFAL MG. Universidade Federal de Alfenas. Disponível em:https://jornal.unifal-mg.edu.br/ (acesso em 15/07/2025).

Klein, P. e G. C. Grigoletti. (2021) Acessibilidade espacial de deficientes físicos, visuais e idosos em parque público. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, v. 12, p. e021016-e021016.
NIT UFV. (2025) Núcleo de Inovação Tecnológica da UFV. Disponível em: https://nit.ufv.br/. (acesso em 15/07/2025).
ONU-Habitat. (2017) Nova Agenda Urbana. Conferência das Nações Unidas sobre Habitação e Desenvolvimento Urbano Sustentável (Habitat III), Quito. Disponível em: https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Portuguese-Brazil.pdf (acesso em 15/07/2025).
Ribeiro, W. C. (2008) ESPAÇO PÚBLICO E QUALIDADE DE VIDA. Diálogos - Revista do Departamento de História e do Programa de Pós-Graduação em História, vol. 12, núm. 1, 2008, pp. 89-101. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, Brasil.
Santos, M. (1978) *Por uma geografia nova*. São Paulo: Hucitec.
Silva, M. G. (2025) *Campus vivo: o espaço universitário Morro do Cruzeiro (UFOP) como centro de integração urbana e qualidade de vida*. 351 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.
Speck, J. (2017) *Cidade caminhável.* Tradução Anita Dimarco, Anita Natividade. 1ª ed. São Paulo: Perspectiva. 272p.
Tuan, Y. (1975) Place: An Experiential Perspective. *Geographical Review,* 65, pág. 151-165.
UFJF. (2016) Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: https://www2.ufjf.br/noticias/ (acesso em 15/07/2025),
UFJF. (2025) Áreas de lazer. Disponível em: https://www2.ufjf.br/ufjf/culturaelazer/areasdelazer/ (acesso em 26/08/2025).
UFJF. (2023) UFJF reforça segurança com 16 novos vigilantes armados. Disponível em: https://www2.ufjf.br/noticias/2023/08/02/ufjf-reforca-seguranca-com-16-novos-vigilantes-armados/ (acesso em 26/08/2025).
UFLA. (2025) Segurança no Campus. Disponível em: https://mundomelhor.ufla.br/campanhas/8-seguranca-no-campus (acesso em 15/07/2025).
UFLA. (2025) Qualidade de vida na UFLA. Disponível em: https://prape.ufla.br/coordenadoria-saude/qualidade-de-vida-na-ufla (acesso em 26/08/2025).
UFMG. (2025) Plano de Desenvolvimento Institucional 2024–2029. Belo Horizonte: UFMG, 2024. Disponível em: https://www.ufmg.br/pdi/2024-2029/wp-content/uploads/2024/07/PDI-2024-2029_V7.pdf. (acesso em 15/07/2025).
UFMG. (2019). Campus Saúde. Disponível em: https://ufmg.br/busca/?q=Campus%20Saúde&tag=true. (acesso 26/08/2025).
UFMG. (2021) Disponível em: https://ufmg.br/comunicacao/noticias/arte-saberes-tradicionais-e-educacao-jardim-mandala-da-origem-a-projeto-em-escolas-de-bh (acesso 26/08/2025).
UFOP. (2019) Campus Aberto é Voltado ao Outubro Rosa. Disponível em: https://ufop.br/noticias/extensao-e-cultura/campus-aberto-e-voltado-para-outubro-rosa (acesso em 15/07/25).
UFOP. (2024) GRUFOP - Quem somos. Disponível em: https://grufop.ufop.br/o-grufop (acesso em 15/07/2025).
UFSJ. (2025) Universidade Federal de São João Del Rei. Disponível em: https://ufsj.edu.br/dplag/a_ufsj.php. (acesso em 15/07/25).
UFTM. (2025) Centro Cultural. Disponível em: https://uftm.edu.br/proext/centro-cultural (acesso em 15/07/2025).
UFTM. (2025) UFTM apresente reinvindicações sobre segurança. Disponível em: https://www.uftm.edu.br/ultimas-noticias/757-uftm-apresenta-reivindicacoes-sobre-seguranca-publica (acesso em 27/08/2025).
UFV. (2025) Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: https://www.ufv.br/. (acesso em 15/07/2025).
UFVJM. (2021) Plano Estratégico Institucional. Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri. Disponível em: https://portal.ufvjm.edu.br/page/acesso-a-informacao/institucional/bases-juridicas/bases-juridicas-1/plano-estrategico-institucional-2021-2025 (acesso em 15/07/2025).
UNIFEI. (2025) PROEX - Pró-Reitoria de Extensão. Disponível em: https://proex.unifei.edu.br/ (acesso em 15/07/2025).

Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos (ana.santos5@aluno.ufop.edu.br), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes (Geotrans), Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Bárbara Abreu Matos (barbara.matos@ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Urbana (DEURB), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil.
Daniela Antunes Lessa (daniela.lessa@ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Civil (DECIV), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil.
Mateus Gonçalves da Silva (mateus.goncalves@aluno.ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil.
Júlia Evenny Silva Alves (julia.evenny@aluno.ufop.edu.br) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Civil (DECIV), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil.
Rayane Raíssa Geralda Virgílio das Dores (rayane.dores@aluno.ufop.edu.br) Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Urbana (DEURB), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil.

CAMINHABILIDADE E DESAFIOS URBANOS NO BAIRRO LAGOINHA - BELO HORIZONTE

Kamilla Oliveira Silva, Flaviane Beltrão Silva, Daniel Costa Fernandes, Felipe Carneiro Fonseca, Eloisa Lima Borges
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
Este artigo analisa as condições de caminhabilidade em eixos pedonais estratégicos do bairro Lagoinha, em Belo Horizonte (MG), com foco nas conexões entre o tecido urbano local e a rede estruturante do transporte coletivo. Utilizando-se o Índice de Caminhabilidade (IC) adaptado ao contexto local, identificaram-se barreiras físicas e socioespaciais que comprometem a mobilidade ativa, a acessibilidade e a integração modal. O estudo fundamenta-se nos referenciais teóricos contemporâneos sobre espaço urbano, mobilidade sustentável e Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável (DOTS). Os resultados evidenciam condições precárias nas rotas analisadas, marcadas pela falta de infraestrutura, conectividade limitada e baixa atratividade do espaço urbano. Com base nas evidências identificadas, propõe-se diretrizes para orientar políticas públicas voltadas à qualificação da mobilidade ativa e à revalorização de áreas degradadas. O estudo contribui para o debate sobre cidades mais acessíveis, inclusivas e com foco na escala humana.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras enfrenta desafios complexos, especialmente no que diz respeito à integração entre os modos ativos e o transporte coletivo. A priorização histórica do transporte motorizado resultou em ambientes hostis ao caminhar, impactando negativamente a coesão social, a segurança pública e o acesso à cidade (Vasconcelos, 2017, Urbano, 2024). Em áreas urbanas centrais com relevante papel histórico e territorial, como o bairro Lagoinha em Belo Horizonte, esses desafios se intensificam diante de processos de degradação urbana, fragmentação espacial e falta de infraestrutura adequada para pedestres (Bernardes e Gonçalves, 2020).

Nesse cenário, a caminhabilidade, entendida como a qualidade do ambiente urbano em permitir e incentivar os deslocamentos a pé, tornou-se um conceito-chave no planejamento urbano sustentável, integrando mobilidade ativa e qualidade do espaço urbano (Gehl, 2010; Pitilin *et al.*, 2018; ITDP, 2019; Venerandi *et al.*, 2024). A presença de ruas ativas e bem conectadas, com usos mistos do solo e infraestrutura de qualidade, é considerada essencial para fomentar uma cidade centrada nas pessoas (Jacobs, 2007). Estudos mais recentes têm incorporado preocupações relacionadas às desigualdades sociais e à necessidade de desenhar espaços urbanos mais inclusivos, especialmente para grupos vulneráveis como idosos e pessoas com mobilidade reduzida (ITDP, 2019; Santos, 2025).

Além disso, o entorno de estações de transporte público apresenta alto potencial para projetos orientados pelos princípios do DOTS, conforme discutido pelo ITDP (2021) e por autores como Silva e Galves (2021). Esses princípios defendem a integração entre uso do solo e mobilidade, a diversidade funcional e o fortalecimento da escala humana, sendo cruciais para a construção de cidades mais inclusivas e resilientes. No entanto, a baixa conectividade, a carência de infraestrutura para pedestres e a ausência de planejamento integrado continuam a limitar a implementação efetiva desses conceitos em cidades brasileiras.

Apesar da crescente produção científica sobre a caminhabilidade, ainda há carência de estudos que relacionem diretamente a qualidade da infraestrutura pedonal com a efetividade do acesso ao transporte coletivo e com o potencial de requalificação de territórios centrais através de princípios DOTS. Além disso, a maioria dos índices aplicados ignora barreiras simbólicas e contextos sociais específicos, o que limita a eficácia das análises tradicionais (Urbano, 2024; Veloso *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo geral analisar as condições de caminhabilidade no bairro Lagoinha, com ênfase nas rotas que conectam o território à rede estruturante de transporte público, a fim de subsidiar intervenções urbanas orientadas ao fortalecimento da mobilidade ativa e da integração modal. Especificamente, busca-se aplicar o IC nos principais eixos pedonais, diagnosticar deficiências da infraestrutura urbana e discutir os resultados à luz dos princípios do urbanismo tático, da mobilidade inclusiva e do DOTS.

2. METODOLOGIA

O bairro Lagoinha foi selecionado para a avaliação da caminhabilidade com foco na conexão com a rede do transporte coletivo dada a sua localização central e importância histórica na configuração urbana de Belo Horizonte. No entanto, ao longo das últimas décadas, o bairro tem sido impactado por processos de degradação urbana e segregação socioespacial, acentuados por grandes intervenções viárias como a construção do Complexo da Lagoinha, com uma série de viadutos, túneis e passarelas e a implantação do sistema BRT-MOVE no corredor da Avenida Antônio Carlos. Esta via, por sua vez, atua como uma barreira física significativa, fragmentando o território e comprometendo a integração do bairro com seu entorno imediato (Figura 1). Para este estudo, delimitou-se a área à porção oeste do bairro, localizada entre a Avenida Antônio Carlos e o hipercentro da cidade, pela sua maior densidade de circulação de pedestres, proximidade com o sistema de transporte público estruturante e existência de rotas pedonais relevantes que dão acesso às estações Lagoinha (metrô) e SENAI (BRT-MOVE).

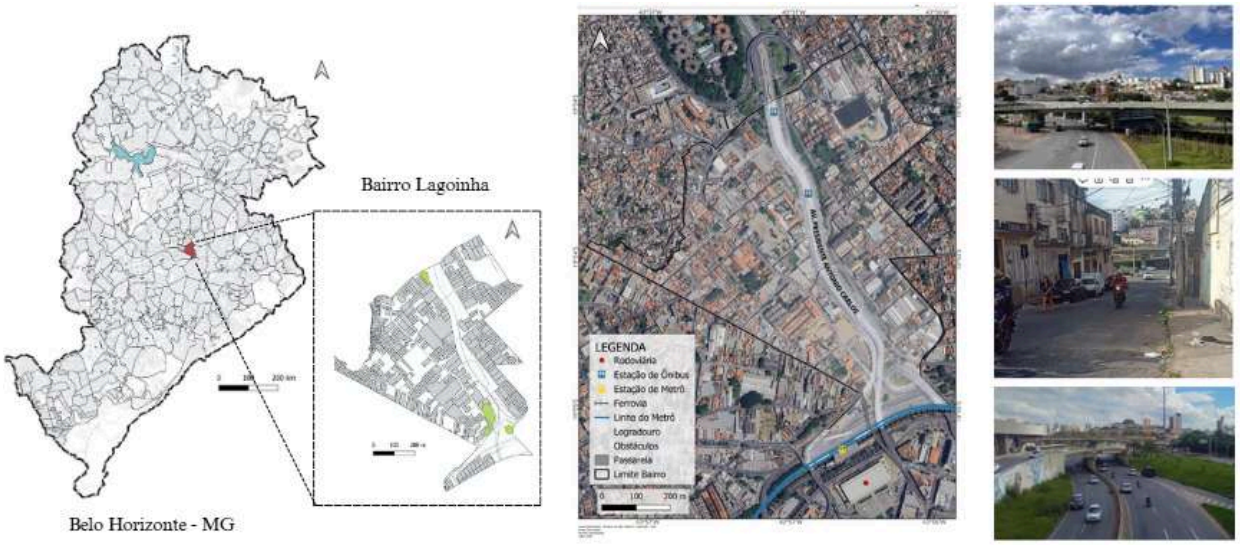


Figura 1: Área de estudo - Bairro Lagoinha

Para avaliar a qualidade do ambiente urbano sob a ótica dos deslocamentos a pé, optou-se pela aplicação do IC, desenvolvido por Carvalho (2018), adaptado por Barros (2021) e detalhado por Freitas (2023). A escolha dessa metodologia se justifica por sua adequação ao contexto urbano de Belo Horizonte, ao incorporar aspectos sociais e da estrutura urbana da cidade. O IC é uma ferramenta multicritério composta por 27 indicadores, distribuídos em oito categorias analíticas:

- Interseções: número de vias, acessibilidade das travessias e presença de sinalização;
- Segurança pública: qualidade da iluminação e vitalidade urbana (presença de pedestres);
- Estética: arborização, limpeza, poluição sonora e qualidade visual do entorno;
- Acessibilidade: largura, nivelamento, conservação dos passeios e presença de sinalização tátil;
- Conforto: existência de mobiliário urbano, proteção contra intempéries e risco de alagamentos;
- Uso do solo: diversidade de usos e existência de equipamentos públicos e áreas verdes;
- Segurança viária: largura da via, velocidade praticada, presença de dispositivos de proteção e conflitos com veículos motorizados;
- Conectividade: tamanho das quadras, número de interligações e integração ao transporte público e à infraestrutura cicloviária.

A coleta de dados foi realizada em maio de 2025, por meio de observação sistemática, medições diretas com trena e registros fotográficos no local, complementada com informações da plataforma oficial BHMap (PBH, 2025). Foram mapeadas e analisadas as rotas pedonais mais utilizadas pelos moradores do bairro para acessar o transporte coletivo, com base em observações preliminares. No total, 27 segmentos viários foram avaliados, distribuídos nas seguintes ruas: Rua Além Paraíba (segmentos 1 a 15); Rua do Serro (16 e 17); Rua Itapecerica (18); Rua Comendador Nohme Salomão (19 a 21); Rua Rio Novo (22 e 23); Rua Adalberto Ferraz (24 a 27).

Para obter a nota do índice, foi necessário normalizar as avaliações de cada indicador, ajustando-as a um mesmo padrão de variação (conforme Equação 1). Após o cálculo da nota normalizada para cada indicador, realizou-se a ponderação por categorias de avaliação, utilizando uma escala de 0 a 100 pontos conforme previsto em Freitas (2023). Os valores correspondem às seguintes classificações: Péssimo (0 a 20,99), Ruim: (21 a 40,99), Regular 41 a 60,99, Bom (61 a 80,99) e Ótimo (81 a 100)

$$X_i = \frac{(R_i - R_{min})}{(R_{máx} - R_{min})} \quad (1)$$

Onde: X_i: valor normalizado; R_i: valor da variável a ser normalizada; R_{min}: valor mínimo da variável; $R_{máx}$: valor máximo da variável e IN: intervalo normalizado.

3. RESULTADOS

A aplicação do IC aos principais eixos pedonais do bairro Lagoinha permitiu identificar padrões e deficiências na infraestrutura urbana que afetam diretamente a mobilidade a pé. Os resultados obtidos revelam um cenário de baixa qualidade espacial, onde predomina a inadequação dos elementos urbanos que deveriam garantir conforto, segurança e acessibilidade aos pedestres. A nota média geral foi de 36 pontos, o que corresponde à classificação "ruim" segundo a escala proposta por Freitas (2023). Dos 27 segmentos avaliados, 24 (88,9%) foram classificados como "ruins" e 3 (11,1%) como "regulares". Não houve trechos avaliados como "bom" ou "ótimo", o que reforça a precariedade generalizada da infraestrutura pedonal na área de estudo (Figura 2).

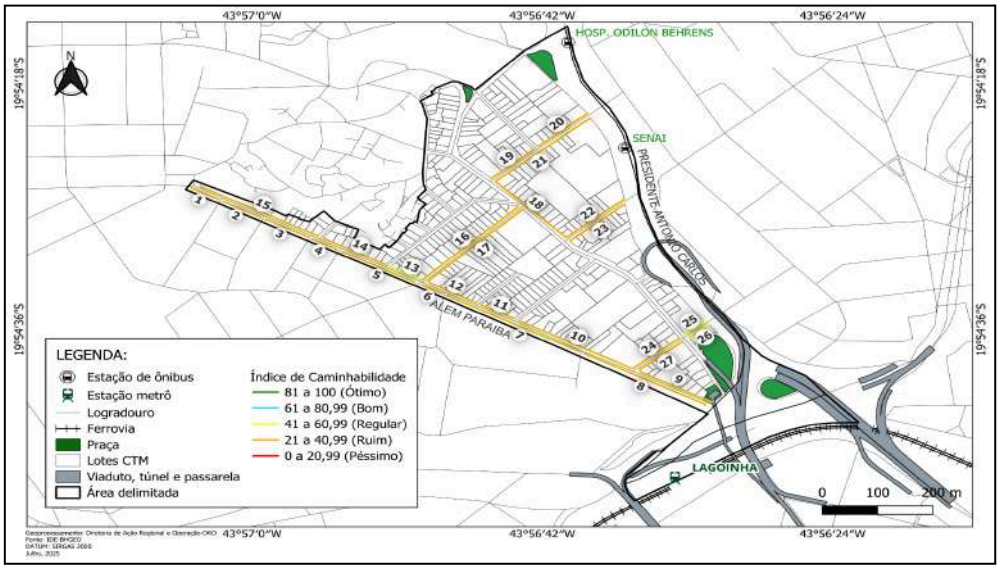


Figura 2: Resultados do IC por segmentos

A tabela 1 apresenta o índice de caminhabilidade por categoria de indicadores, mostrando predominância de avaliações negativas, com destaque para o uso do solo classificado como "péssimo", enquanto apenas a segurança pública obteve desempenho positivo.

Tabela 1: Índice de caminhabilidade por categoria de indicadores

Categoria	Índice de caminhabilidade (IC)
Interseções	Ruim
Segurança pública	Bom
Estética	Ruim
Acessibilidade	Ruim
Conforto	Ruim
Uso do Solo	**Péssimo**
Segurança viária	Ruim
Conectividade	Regular

Os resultados evidenciam que a categoria com pior desempenho foi aquela associada ao uso do solo, classificado como "péssimo". Esse resultado decorre da baixa diversidade funcional e da escassez de

equipamentos públicos e áreas verdes, fatores que reduzem significativamente a atratividade das rotas e comprometem a vitalidade urbana. De forma semelhante, as dimensões de acessibilidade, estética, conforto, segurança viária e interseções, avaliadas como "ruins", revelam deficiências estruturais expressivas, manifestadas em calçadas estreitas, mal conservadas e desprovidas de piso tátil, bem como na ausência de arborização, mobiliário urbano e dispositivos de segurança em travessias.

A categoria "Conectividade", com média "regular", também merece atenção. O traçado das vias e a escala das quadras dificultam a formação de rotas diretas e seguras entre as áreas residenciais e os polos de transporte público. Essa configuração compromete a lógica de integração entre modos de transporte e desestimula o uso do transporte coletivo, em contrariedade às diretrizes do Estatuto da Cidade e do próprio conceito de cidade compacta e caminhável (Venerandi *et al.*, 2024).

Em contrapartida, a única categoria com desempenho favorável foi a de segurança pública, cujo resultado se atribui à presença de iluminação pública e à circulação de pedestres em determinados trechos. Entretanto, tal avaliação apresenta limitações importantes, na medida em que não contempla a percepção subjetiva de insegurança nem as dinâmicas sociais que permeiam o espaço urbano.

A análise revela que o ambiente urbano atual dificulta a mobilidade a pé, contrariando a Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012). A baixa qualidade e conectividade das rotas comprometem a mobilidade ativa e a integração ao transporte público, evidenciando a falta de uma política urbana territorializada, em desacordo com os princípios do DOTS (ITDP, 2021; Silva e Galves, 2021).

Do ponto de vista teórico, os achados corroboram as críticas de Jacobs (2007) e Gehl (2010), que associam a baixa qualidade dos espaços públicos à redução da vida urbana e ao aumento da percepção de insegurança. A falta de diversidade de usos e de vitalidade urbana torna as ruas pouco atrativas para pedestres, o que pode retroalimentar processos de degradação, abandono e exclusão. Além disso, a análise por categorias revelou que a infraestrutura existente não atende aos padrões mínimos de acessibilidade universal, comprometendo especialmente grupos vulneráveis, como idosos e pessoas com deficiência. A ausência de piso tátil, desníveis excessivos e a má conservação dos passeios evidenciam as lacunas apontadas por Santos *et al.* (2024) na produção científica sobre caminhabilidade e inclusão, corroborando também as análises de Urbano (2024), que destaca a recorrente carência adequada para os deslocamentos de pedestres.

Embora o IC tenha se mostrado eficaz para identificar deficiências objetivas da infraestrutura urbana, observou-se uma limitação relevante na categoria "Segurança pública". A avaliação positiva obtida em alguns segmentos decorre da presença de iluminação e de pedestres, mas não capta aspectos subjetivos como a sensação de medo ou insegurança vivida por moradores e usuários. Durante as visitas de campo, foram identificadas situações de uso de substâncias psicoativas, abandono de imóveis e baixa vigilância informal, o que compromete a apropriação dos espaços por parte da comunidade. Nesse sentido, sugere-se a integração do IC com dados secundários sobre criminalidade, disponíveis nos sistemas da Secretaria de Estado de Justiça e Segurança Pública de Minas Gerais (SEJUSP-MG), bem como a aplicação de instrumentos qualitativos como entrevistas com moradores e mapeamentos participativos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do IC no bairro Lagoinha revelou que a maioria dos trechos avaliados apresenta condições insatisfatórias para a mobilidade a pé, especialmente em termos de acessibilidade, conforto e diversidade de usos. Calçadas precárias e ausência de mobiliário urbano contribuem para um ambiente hostil aos pedestres. A análise do entorno das estações de transporte público mostrou ainda um descompasso com os princípios do DOTS, dificultando a promoção de uma mobilidade sustentável e socialmente inclusiva.

Este estudo contribui para o planejamento urbano ao apresentar uma metodologia replicável para avaliar a caminhabilidade em territórios vulneráveis, fornecendo subsídios para intervenções estratégicas. Reforça também a importância de investigar a relação entre mobilidade ativa, segurança pública e planejamento urbano em contextos de exclusão, defendendo abordagens interdisciplinares com participação comunitária. Por fim, evidencia-se a urgência de políticas públicas voltadas à requalificação urbana, ao fortalecimento da mobilidade ativa e à construção de cidades mais justas, saudáveis e resilientes.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da UFMG e à disciplina ETG845 – Geografia dos Transportes, ministrada pela Profª Daniela Lessa, pelo apoio à realização desta publicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barros, R. M. (2021) *A infância e o pedestrianismo: um estudo exploratório da percepção de crianças sobre indicadores de cami*nhabilidade. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (GEOTRANS), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/79236 (acesso em 10/06/2025).

Bernardes, B. M. e R. G. Gonçalves (2020) Reflexões sobre o bairro Lagoinha em Belo Horizonte/MG: os interesses mercadológicos que incidem sobre a região e a sua importância enquanto lugar de memória. In Anais do Encontro Nacional da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo - ENANPARQ, 2020. Anais… Brasília: ANPARQ, 2020. Disponível em: http://enanparq2020.s3.amazonaws.com/MT/21934.pdf (acesso em 10/06/2025).

Carvalho, I. R. V. (2018) *Caminhabilidade como instrumento de mobilidade urbana: um estudo de caso em Belo Horizonte.* Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (GEOTRANS), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/RAOA-BAPPDF (acesso em 10/06/2025).

Freitas, A. P. de O. (2023) *Ciência cidadã e requalificação do espaço urbano: redescobrindo a caminhabilidade sob a ótica infanto-juvenil.* Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (GEOTRANS), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/72183 (acesso em 15/06/2025).

Gehl, J. (2010) *Cidades para pessoas*. São Paulo: Perspectiva.

ITDP (2019) Índice de Caminhabilidade: ferramenta. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP Brasil).

ITDP (2021) Padrão de Qualidade DOTS. Rio de Janeiro: ITDP. Disponível em: https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2017/12/DU-Padr%C3%A3o-de-Qualidade-DOTS-2017-v1.pdf (acesso em 04/05/2025).

Jacobs, J. (2007) *Morte e Vida de Grandes Cidades*. São Paulo: Martins Fontes.

PBH (2025) BHMap: visualizador cartográfico oficial do município de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal De Belo Horizonte (PBH). Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br (acesso em 26/04/2025).

Pitilin, T. R.; Carvalho, C. U.; Sanches, P. de S. (2018) A caminhabilidade: uma análise bibliométrica. *In Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (ANPET), Gramado (RS), p. 2677-2688.

Santos, A. L. R. S. *et al.* (2024) Pessoas idosas e a caminhabilidade: uma análise bibliométrica da produção científica. Anais Guimarães: 10º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2024).

Santos, A. L. R. S. (2025) Geodesign para o planejamento da caminhabilidade de pessoas idosas em Ouro Preto (Minas Gerais). Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (GEOTRANS), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Silva, B. V. F.; M. L. Galves (2021) DOTS como instrumento orientador na construção do Plano de Mobilidade Urbana brasileiro. In Anais do 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2021 digital). ID. 740. p. 609-621. DOI: https://doi.org/10.21814/pluris21

Urbano, M. C. A. (2024) Índice de caminhabilidade na adaptação do espaço: uma análise dos conceitos de Mobilidade Ativa e Urbanismo Tático. Mobilidade, migração e espaço urbano. In Anais do XVIII Simpósio Nacional de Geografia Urbana (SIMPURB). Niterói (RJ) Online, 2024. Vol. 18, (2024). DOI: 10.46848/simpurb2024

Veloso, A. L. C. P.; I. S. de. França; N. F. dos. Santos Neto (2023) Índice de caminhabilidade: uma proposta metodológica. *Transporte y Territorio*, n. 28, p. 214–236, ene./jun. 2023. Disponível em: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9507570 (acesso em 20/06/2025).

Venerandi, I. A. *et al*. (2024) Walkability Indices—The State of the Art and Future Directions: A Systematic Review. *Sustainability*, v. 16, n. 16, p. 6730, 2024

Vasconcelos, E. A. (2017) Andar nas cidades do Brasil. In: Andrade, V.; Linke, C. C. (orgs.). *Cidade de pedestres: a caminhabilidade no Brasil e no mundo*. Rio de Janeiro: Babilônia Cultura Editorial, 2017. p. 43–54.

Kamilla Oliveira Silva (millak2ls@gmail.com); *Flaviane Beltrão Silva* (flavianebeltrao@hotmail.com.br); *Daniel Costa Fernandes* (daniel_c_f@live.com); *Felipe Carneiro Fonseca* (felipecarneiroo@gmail.com); *Eloisa Lima Borges* (eloisalibor@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

CAMINHABILIDADE EM ITABUNA/BA: LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES DO ICAM 2.0 A PARTIR DE APLICAÇÃO NO BAIRRO JARDIM VITÓRIA

Monique Ferreira Gomes[1], Lucio Wilian Nascimento Sousa[1], Peolla Paula Stein[1]
[1]Centro de Formação em Tecnociências e Inovação
Universidade Federal do Sul da Bahia

RESUMO
Este artigo tem por objetivo aplicar o Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0), desenvolvido pelo ITDP Brasil, para diagnosticar as condições de caminhabilidade no bairro Jardim Vitória, em Itabuna/BA, e discutir criticamente sua aplicabilidade em contextos de cidades médias. A pesquisa foi realizada em junho de 2025, com levantamento de dados em campo utilizando os formulários e planilhas da ferramenta. A análise revelou limitações operacionais do método, como inconsistências entre formulários e planilhas, dificuldades na aferição de iluminação e coleta de lixo, e lacunas na definição de parâmetros para medição de distância ao transporte público. Os resultados indicam que, embora o iCam 2.0 seja uma ferramenta útil para avaliação da infraestrutura urbana sob a ótica do pedestre, ajustes são necessários para sua aplicação em realidades urbanas com baixa padronização viária e ausência de dados consolidados. O estudo contribui para o aprimoramento metodológico da ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o modelo de planejamento urbano centrado na supremacia do automóvel tem sido crescentemente contestado, especialmente diante dos desafios de sustentabilidade, justiça socioespacial e saúde pública. Em contraposição, a promoção da mobilidade ativa, notadamente a caminhada, vem ganhando destaque como estratégia fundamental para tornar as cidades mais inclusivas, seguras e sustentáveis (Gehl, 2010; Jacobs, 1961).

Dados da Pesquisa Origem e Destino Domiciliar de Itabuna e Ilhéus (Comap, 2019) evidenciam que 23,2% das viagens realizadas em Itabuna são feitas a pé, enquanto apenas 8,7% utilizam o transporte coletivo. Os modos não motorizados totalizam 26,3% das viagens, o que indica forte dependência da mobilidade ativa — especialmente entre as classes sociais C, D e E, nas quais 69% dos deslocamentos são realizados sem uso de veículos motorizados. A mesma pesquisa destaca que o tempo médio das viagens a pé é de 17 minutos, sinalizando um padrão de deslocamentos de curta distância, compatível com a escala urbana da cidade. No entanto, o número elevado de atropelamentos e a baixa avaliação do sistema viário evidenciam a necessidade urgente de qualificação da infraestrutura urbana destinada aos pedestres.

Nesse contexto, o Índice de Caminhabilidade (iCam), desenvolvido pelo Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP), representa um avanço metodológico na avaliação do espaço urbano sob a ótica do pedestre. A versão 2.0 da ferramenta estrutura-se em seis categorias e quinze indicadores que abrangem aspectos de infraestrutura, acessibilidade, segurança, conforto e atratividade (Itdp Brasil, 2018). A metodologia já foi aplicada em estudos com diferentes escalas e contextos urbanos como Curitiba/PR (Santos; Pereira, 2023), Fortaleza/CE (Fernandes; Gomes, 2022), Joinville/SC (Voss, 2024), Ribeirão das Neves/MG (Martins *et al.*, 2024) e Bangu/RJ (Sousa *et al.*, 2023).

Itabuna, com população estimada em mais de 210 mil habitantes, é uma cidade média do sul da Bahia cuja configuração urbana foi profundamente impactada pela crise da lavoura cacaueira e pela ausência de planejamento urbano estratégico (Rodrigues, 2012; Trindade, 2008). Estudos recentes também apontam fragilidades no Plano Diretor municipal, tanto no que se refere ao ordenamento territorial quanto à atenção às aglomerações subnormais (Luna, 2021). A escolha do bairro Jardim Vitória justifica-se por sua diversidade de uso do solo e pela conectividade com áreas centrais e equipamentos de comércio e serviços, como o shopping, o que o torna um espaço estratégico para avaliar a infraestrutura destinada ao pedestre em uma área consolidada da cidade. Embora se trate de um bairro de classe média alta, a análise permite identificar que, mesmo em territórios com melhores condições socioeconômicas, persistem deficiências relevantes de caminhabilidade.

DIANTE desse contexto, este artigo tem por objetivo aplicar o instrumento iCam 2.0 para diagnosticar a caminhabilidade no bairro Jardim Vitória, em Itabuna/BA, e discutir criticamente os limites e potencialidades

do método a partir da experiência de campo. A pesquisa buscou, além de levantar indicadores sobre as condições da mobilidade ativa local, refletir sobre as interpretações e ajustes necessários à ferramenta frente às especificidades urbanas de cidades médias brasileiras.

Este artigo está estruturado em três seções, além desta introdução: a próxima apresenta a metodologia adotada; em seguida, discutem-se os resultados obtidos a partir da aplicação do iCam 2.0 no bairro Jardim Vitória; por fim, são apresentadas as considerações finais, com recomendações para o aprimoramento da mobilidade ativa em Itabuna e sugestões de adequação metodológica ao instrumento utilizado.

2. METODOLOGIA

Este estudo baseou-se na aplicação do iCam versão 2.0, desenvolvido ITDP Brasil, com o intuito de diagnosticar as condições de caminhabilidade no bairro Jardim Vitória, localizado no município de Itabuna, Bahia. A ferramenta organiza-se em seis categorias analíticas (calçada, mobilidade, atração, segurança viária, segurança pública e ambiente), distribuídas em um total de quinze indicadores (ITDP Brasil, 2018). O levantamento de campo ocorreu durante o mês de junho de 2025, aos sábados, em período diurno, por equipe que percorreu os segmentos definidos do bairro Jardim Vitória e preencheu os formulários in loco. A delimitação dos segmentos observou a morfologia do bairro e buscou contemplar diferentes tipologias viárias e usos do solo.

A unidade básica de análise adotada foi o segmento de calçada. Posteriormente à escolha dos segmentos, realizou-se levantamento em campo e no programa *Google Earth*. O levantamento foi realizado com o formulário-padrão do ITDP, que orienta a observação direta e a avaliação qualitativa de cada indicador em escala local. As planilhas de cálculo associadas à metodologia foram utilizadas para sistematização dos dados e atribuição das pontuações por segmento. Para cada indicador foi atribuída uma pontuação variável de 0 (insuficiente) a 3 (ótimo), conforme as condições observadas de caminhabilidade, sendo o índice final obtido por média ponderada, considerando a extensão de cada segmento. Os indicadores não avaliados foram sinalizados como não executados, por decisão metodológica, considerando limitações operacionais da pesquisa de campo.

Cabe destacar que, embora o iCam 2.0 recomende a realização de contagens de pedestres em diferentes horários (incluindo noturno) para os indicadores Fluxo de Pedestres Diurno e Noturno e medições de iluminância com luxímetro ou por avaliação qualitativa no período noturno, estas etapas não foram executadas nesta aplicação, por limitações de tempo, segurança e recursos. Isso constitui uma restrição metodológica relevante e afetou diretamente a avaliação dos indicadores da categoria “Segurança Pública”, especialmente o de iluminação, cuja aferição foi parcial. Tais limitações e observações serão discutidas na seção seguinte, com o intuito de contribuir para o aprimoramento da ferramenta e sua adaptação às realidades urbanas de cidades médias como Itabuna.

3. RESULTADOS

Foram analisados 97 segmentos de calçadas no bairro Jardim Vitória, totalizando aproximadamente 8,8 km. O índice final de caminhabilidade foi 1,11 (Tabela 1), classificado como suficiente pela metodologia do iCam 2.0. No entanto, a análise desagregada dos nove indicadores aplicados revela deficiências significativas que comprometem a mobilidade ativa local.

Infraestrutura de calçadas e acessibilidade apresentaram os resultados mais críticos. A largura foi classificada como insuficiente, o que impacta diretamente a circulação segura, especialmente para pessoas com mobilidade reduzida, como apontado por Cerin *et al.* (2017). A tipologia das ruas, voltada ao tráfego motorizado, revelou calçadas estreitas, despadronizadas e frequentemente obstruídas (Figura 1) — condição também identificada em Fortaleza por Fernandes e Gomes (2022), ainda que em bairros mais populares. Em Curitiba, o estudo de Santos e Pereira (2023) encontrou desempenho superior nesse quesito, evidenciando disparidades regionais e estruturais.

A iluminação pública, avaliada como insuficiente, apresentou um caso emblemático: o critério penaliza trechos onde os postes estão posicionados apenas de um lado da via, prática recorrente em cidades do interior baiano. Essa observação revela a necessidade de calibragem metodológica da ferramenta, pois o critério

técnico atual não contempla realidades onde há iluminação adequada, mas não simétrica.

Tabela 1: Avaliação dos Indicadores de Caminhabilidade

Categorias	Indicadores	Avaliação	Categorias	Indicadores	Avaliação
Calçada	Pavimentação	Suficiente	**Segurança Viária**	Tipologia da rua	Insuficiente
	Largura	Insuficiente		Travessias	Não executado
Mobilidade	Dimensão das quadras	Bom	**Segurança pública**	Iluminação	Insuficiente
	Distância a pé ao transporte	Não executado		Fluxo de pedestres diurno e noturno	Insuficiente
Atração	Fachadas fisicamente permeáveis	Bom	**Ambiente**	Sombra e Abrigo	Não executado
	Fachadas visualmente permeáveis	Não executado		Poluição Sonora	Não executado
	Uso público diurno e noturno	Insuficiente		Coleta de lixo e limpeza	Bom
	Usos Mistos	Não executado			
iCam Resultado Final		1,11 Suficiente			

As fotografias registradas em campo (Figura 1) ilustram de forma concreta os problemas captados pelos indicadores: passeios estreitos e descontinuados, obstáculos físicos e falta de rampas de acessibilidade, além da predominância de muros contínuos que reduzem a vitalidade do espaço público. Esses registros reforçam as baixas pontuações obtidas em largura e tipologia das calçadas, uso público diurno e noturno e iluminação, evidenciando a correspondência entre observação visual e avaliação quantitativa.



Figura 1: Registros das problemáticas observadas nas calçadas avaliadas no bairro Jardim Vitória (Itabuna/BA)

O indicador uso público diurno e noturno também obteve pontuação baixa, refletindo a escassez de atividades urbanas que estimulem a ocupação contínua do espaço, conforme já discutido por Gehl (2013) em relação à vitalidade urbana. Esse dado, associado à baixa permeabilidade visual (não avaliada na totalidade), aponta para uma rua predominantemente residencial, com baixa vitalidade urbana, o que compromete a

percepção de segurança e o conforto na caminhada.

Entre os aspectos positivos, destacam-se a pavimentação das calçadas e a dimensão das quadras, ambas classificadas como “bom”. Esses itens indicam um certo padrão construtivo favorável à circulação, embora não sejam suficientes para compensar as demais deficiências observadas. A coleta de lixo e limpeza urbana, por sua vez, teve avaliação positiva, refletindo manutenção adequada da via, elemento fundamental para conforto e continuidade do fluxo.

Durante a aplicação do iCam 2.0 no bairro Jardim Vitória, observou-se a necessidade de interpretação adaptada de alguns critérios metodológicos, resultado tanto da ambiguidade de certas instruções quanto das características urbanas específicas do território baiano. Um exemplo expressivo foi o indicador “distância a pé ao transporte público”. Embora o roteiro técnico recomende a medição a partir do “ponto médio do segmento de calçada”, essa orientação não está claramente explicitada nos formulários de campo, o que gerou dúvidas na prática. Em trechos com poucos pontos de referência e ausência de padronização viária como é comum em cidades médias brasileiras, essa medição se torna subjetiva, podendo comprometer a consistência dos dados.

Tais dificuldades não são exclusivas deste estudo. Em Ribeirão das Neves/MG, por exemplo, Silva e Souza (2021) relataram desafios semelhantes na aplicação do iCam em bairros com calçadas fragmentadas e topografia acidentada, onde a localização dos pontos de ônibus era incerta e a malha viária pouco conectada. Segundo os autores, a medição da distância até o transporte público teve que ser ajustada de forma interpretativa, considerando a percepção dos avaliadores sobre a “caminhabilidade real” entre o ponto e o trecho avaliado.

Em Fortaleza, Fernandes e Gomes (2022) observaram variações na interpretação de critérios como iluminação, rampas e pavimentação em ruas onde os limites dos segmentos eram ambíguos — um problema semelhante ao encontrado em bairros planejados de Itabuna. Os autores ressaltam que, embora o iCam 2.0 seja uma ferramenta útil, sua aplicação em campo requer capacitação prévia, padronização rigorosa das equipes e, em alguns casos, ajustes metodológicos à realidade local.

Outro exemplo relevante é o estudo de Oliveira *et al.* (2020), em Bangu/RJ. Os autores destacam que a aplicação em bairros suburbanos revelou inconsistências entre a lógica dos indicadores e o uso real das calçadas, além de divergências na forma como as equipes interpretavam elementos como mobiliário urbano ou acessibilidade. O formulário padrão do iCam, segundo os autores, não apresenta instruções detalhadas para diversos itens, o que exige maior autonomia (e risco de subjetividade) por parte dos avaliadores.

Esses relatos, somados à experiência de campo em Itabuna, sugerem que o uso do iCam 2.0 em contextos urbanos diversos demanda maior flexibilidade e adaptação metodológica, sobretudo em cidades fora dos grandes centros. A lógica de avaliação padronizada, embora útil para comparações intermunicipais, pode deixar de captar as condições urbanas específicas de bairros com estruturas híbridas ou planejamento fragmentado. Assim, para garantir diagnósticos mais precisos e úteis para o planejamento local, recomenda-se que os formulários de campo sejam reformulados, com instruções mais explícitas, exemplos visuais e possibilidade de registrar anotações contextuais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar as potencialidades e limitações da ferramenta iCam 2.0 a partir de sua aplicação no bairro Jardim Vitória, em Itabuna/BA. Os resultados evidenciaram deficiências estruturais relevantes para a mobilidade ativa como calçadas estreitas e descontínuas, ausência de rampas e baixa integração com o transporte coletivo. A análise das imagens de campo reforçou essas constatações, ao revelar obstáculos físicos, iluminação restrita a um lado da via e muros extensos que reduzem a vitalidade urbana, confirmando a correspondência entre os registros visuais e as pontuações atribuídas pelos indicadores.

Para além da infraestrutura observada, a aplicação revelou limitações metodológicas do iCam 2.0 em contextos urbanos de cidades médias brasileiras, em especial quanto à aferição de iluminação e distância ao

transporte público. Esses aspectos sugerem a necessidade de calibragem dos critérios técnicos para contemplar realidades onde a padronização viária é reduzida e a infraestrutura apresenta soluções locais distintas.

Reconhece-se, ainda, que a escolha de um bairro de classe média alta limita a representatividade do estudo em relação ao perfil social mais dependente da caminhada, identificado nas classes C, D e E. Essa limitação, contudo, permitiu evidenciar que mesmo em territórios de maior renda persistem barreiras significativas ao pedestre. Recomenda-se, portanto, que aplicações futuras da ferramenta incluam bairros de diferentes perfis socioeconômicos, de modo a ampliar a coerência entre os objetivos da pesquisa e o recorte empírico e subsidiar políticas públicas de mobilidade ativa com maior abrangência.

Agradecimentos
A realização deste estudo contou com o apoio institucional da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), por meio do Centro de Formação em Tecnociências e Inovação, da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e do Observatório da Mobilidade Urbana, além da FAPESB, aos quais agradecemos pelo suporte financeiros às atividades de pesquisa e extensão vinculadas a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cerin, E.; Leslie, E.; du Toit, L. et al. (2017) Destinations that matter: associations with walking for transport. *Health & Place*, v. 13, p. 713–724. DOI: https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2006.11.002

COMAP – CONSÓRCIO MOBILIDADE INTELIGENTE. Pesquisa Domiciliar de Origem e Destino em Ilhéus e Itabuna – Síntese dos Resultados. Salvador: Governo do Estado da Bahia, SEINFRA, 2019.

Fernandes, G. M.; Gomes, P. V. S. Avaliação do Índice de Caminhabilidade em área de trânsito calmo no entorno de região hospitalar – Caso de Fortaleza/CE. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 36., 2022. Anais [...]. Disponível em: https://proceedings.science/p/153073. Acesso em: 31 maio 2025.

Gehl, J. Cidades para pessoas. São Paulo: Perspectiva, 2010.

ITDP BRASIL. Índice de Caminhabilidade 2.0: Ferramenta. Rio de Janeiro: ITDP Brasil, 2018. Disponível em: https://itdpbrasil.org/icam2/. Acesso em: 31 maio 2025.

Jacobs, J. Morte e vida de grandes cidades. São Paulo: Martins Fontes, 1961.

Luna, F. Planejamento urbano: o plano diretor e aglomerações subnormais na cidade de Itabuna. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/98923. Acesso em: 31 maio 2025.

Martins, C. M. et al. Proposta de adaptação do Índice de Caminhabilidade (iCam-ITDP) para aplicação remota. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 38., 2024. Anais [...]. Disponível em: https://proceedings.science/p/190924. Acesso em: 31 maio 2025.

Oliveira, R. J. et al. (2020) Caminhabilidade em bairros suburbanos do Rio de Janeiro: aplicação do método iCam. *Revista Caminhos da Geografia*, v. 21, n. 75, p. 282–301.

Rodrigues, K. G. Dinâmica urbana no município de Itabuna (BA): o mercado imobiliário e as políticas urbanas (1990–2010). 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) – UNICAMP. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/850372. Acesso em: 31 maio 2025.

Santos, V. A.; Pereira, L. R. Índice de Caminhabilidade: estudo de caso no entorno imediato do Complexo Hospital de Clínicas de Curitiba. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 37., 2023. Anais [...]. Disponível em: https://proceedings.science/p/174635. Acesso em: 31 maio 2025.

Silva, T. A.; Souza, M. F. (2021) Avaliação de caminhabilidade com o iCam 2.0 em município da Região Metropolitana de BH. *Cadernos Metrópole*, v. 23, n. 52, p. 313–333. DOI: https://doi.org/10.1590/2236-9996.2021-5207

Sousa, P. B. *et al.* Bangu Caminhável: o Índice de Caminhabilidade como metodologia de projeto. In: EUROELECS – ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 12., 2023. Anais [...].

Trindade, G. A. Práticas recentes na gestão do espaço urbano em Itabuna/BA. GeoTextos, Salvador, v. 1, 2008. Disponível em: https://periodicos.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/3032. Acesso em: 31 maio 2025.

Voss, L. Aplicação do índice de caminhabilidade em trecho da rua Tuiuti no bairro Aventureiro em Joinville. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262132. Acesso em: 31 maio 2025.

Monique Ferreira Gomes (monique.fegomes98@gmail.com)
Universidade Federal do Sul da Bahia, Centro de Formação em Tecnociências e Inovação, Colegiado da Engenharia de Transportes e Logística, Rod. Ilhéus/Itabuna, BR415, Km 22, Ilhéus, BA, Brasil.

CAMINHABILIDADE NO CENTRO DE CURITIBA: APLICAÇÃO DO ICAM 2.0 COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA MOBILIDADE ATIVA URBANA

Sucupira, G. T.[1] , Gonçalves, J. C. K. D.[1] , de Almeida, R. A. [2], Kcheve, C. B.[1], Jacovacs, M. E. [1] , Timos, M. E. [1] , Gardemann, M. B. [1]

[1]Univeridade Federal do Paraná - UFPR, [2]Centro Universitário Internacional - UNINTER

RESUMO

A caminhabilidade, enquanto componente da mobilidade ativa, tem sido amplamente promovida como estratégia para a redução das emissões de poluentes gerados por veículos motorizados e para o incentivo a práticas saudáveis, com foco na melhoria da qualidade de vida urbana. Este estudo teve como objetivo aplicar o Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0) para classificar e analisar indicadores relacionados à circulação de pedestres no percurso entre a Praça Osório e o Passeio Público, na cidade de Curitiba (PR) — dois importantes marcos turísticos e de mobilidade da capital paranaense. O resultado global obtido pelo iCam 2.0 classificou o trajeto como suficiente, apontando oportunidades de aprimoramento, especialmente nos indicadores associados às categorias Atração e Ambiente.

1. INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada, associada a padrões de mobilidade centrados no transporte motorizado individual, tem gerado consequências significativas para a qualidade de vida nas cidades (Gehl, 2014). Esses padrões de mobilidade contribuem de forma expressiva para as emissões de gases de efeito estufa, sendo que, em 2023, as emissões decorrentes do consumo de energia no Brasil representaram 18% do total, das quais 53,3% foram associadas ao consumo de combustíveis em atividades de transporte (SEEG, 2023). Nesse contexto, a caminhabilidade vem se destacando tanto no planejamento urbano quanto no transporte, por contribuir com a mitigação de emissões e a promoção de ambientes urbanos mais saudáveis (Liao et al., 2020). Reconhece-se que a caminhabilidade não se relaciona apenas à atividade física, mas também pode reduzir a taxa per capita de uso de recursos e de emissões de gases de efeito estufa, além de favorecer a interação social e, portanto, contribuir para a redução de exclusões sociais (WHO, 2018).

Os benefícios da caminhabilidade podem ser observados em diferentes frentes do espaço urbano: no transporte, pela redução das emissões de poluentes e do congestionamento de veículos e pela ausência de demanda por espaços de estacionamento; na saúde, pela diminuição de doenças cardiovasculares, mentais e relacionadas à obesidade; e na dimensão social, pela redução de formas de exclusão (Gaglione et al., 2022). Estudos sobre caminhabilidade empregando a metologia utilizada nesta pesquisa já vem sendo desenvolvidos em diversas capitais brasileiras como Manaus, João Pessoa e Belo Horizonte (de Toledo & de Lima, 2024; Silva, 2021; Borges et al., 2023).

Diante das considerações apresentadas, este artigo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados da aplicação dos indicadores que compõem o Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0), desenvolvido pelo Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP), visando classificar e avaliar as condições dos elementos relacionados à circulação de pedestres em um trajeto localizado no bairro Centro, na cidade de Curitiba – PR. Cabe destacar que os resultados apresentados compõem um contexto mais amplo de projeto de pesquisa e extensão desenvolvido desde 2024 no qual foram avaliados outros trechos da cidade. A divulgação das etapas e dos resultados para o público em geral é feita, dentre outros meios, pela rede social do projeto no Instagram (@caminhoscwb).

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta está estruturada em três etapas principais: (1) planejamento e delimitação da área de avaliação, (2) coleta empírica de dados e (3) análise dos dados a partir da metodologia iCam 2.0. O iCam 2.0 é composto por 15 indicadores distribuídos em seis categorias principais, as quais avaliam diferentes dimensões da experiência do pedestre no espaço urbano, incluindo aspectos relacionados à qualidade das calçadas, mobilidade, atração urbana, segurança viária, segurança pública e ambiente. O sistema de pontuação utilizado pelo índice classifica os resultados em: insuficiente (pontuação inferior a 1), suficiente (entre 1 e 2), bom (entre 2 e 3) e ótimo (igual a 3). Para o iCam 2.0, a pontuação de cada segmento de calçada é resultado da média aritmética entre as categorias que o compõem (ITDP, 2019).

2.1. Delimitação da área de avaliação

A avaliação do Índice de Caminhabilidade, objetivo deste trabalho, foi realizada em um percurso localizado no bairro Centro de Curitiba, conectando a Praça Osório, reconhecida como espaço de lazer, convívio e sede

de feiras e eventos, ao Passeio Público, o parque mais antigo e central da cidade. O trajeto inclui a Rua Cândido Lopes, Praça Tiradentes, Travessa Tobias de Macedo, Rua Riachuelo e Rua Presidente Carlos Cavalcanti, conforme representado na Figura 1.

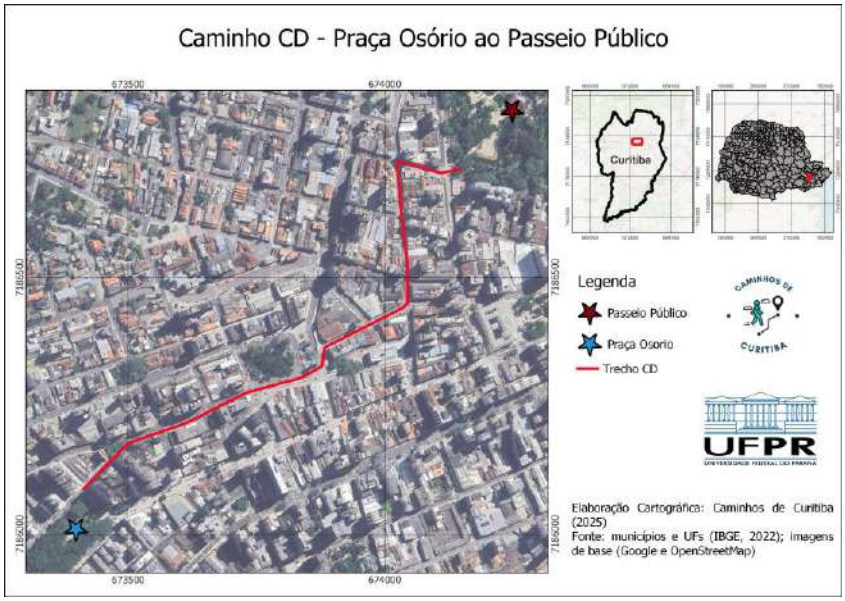


Figura 1: Representação georreferencial do percurso avaliado

A definição do percurso considerou seu potencial de visitação e uso tanto pela população local quanto por turistas, além da curta distância entre os pontos, inferior a 2 km (distâncias obtidas pelo Google Maps), o que favorece o deslocamento a pé. Destaca-se que o bairro Centro, além de concentrar importantes atrativos turísticos e históricos, apresenta elevada densidade demográfica, de 117,79 habitantes por hectare, com aproximadamente 39 mil moradores (IPPUC, 2025), fator que reforça a relevância da análise da caminhabilidade nessa área, dada a sua intensa utilização.

2.2. Coleta de dados

As coletas de campo ocorreram entre os meses de fevereiro e abril de 2025, sendo os registros realizados predominantemente em período diurno para a maioria das variáveis analisadas, com exceção das observações relativas à iluminação pública, que foram efetuadas no período noturno. Foram realizados registros fotográficos e observações relevantes para cada um dos indicadores presentes na metodologia do iCam 2.0, como a contagem de pedestres em dois horários de grande fluxo e a observação de buracos e desníveis nas calçadas. A coleta de campo foi realizada após um treinamento da equipe para a aplicação da metodologia. Os dados de caminhabilidade do percurso analisado foram sistematizados em planilhas eletrônicas e processados conforme as diretrizes do ITDP.

3. RESULTADOS

Para o mapeamento dos resultados utilizou-se o software QGIS, por meio do qual a rota foi georreferenciada e, utilizando-se dos pontos de coleta e níveis de desempenho por indicador e por trecho, foi criada uma categorização dos resultados do índice de caminhabilidade para cada segmento de rua, a fim de demonstrar melhores e piores segmentos de um mesmo trecho, sinalizando os pontos mais problemáticos do trajeto. O resultado global do iCam 2.0 para o trajeto foi 1,57, classificado como suficiente pela metodologia do ITDP. O resultado do índice também pode ser avaliado para cada segmento (quadra), conforme apresentado na Figura 2. Destaca-se que as linhas em laranja indicam pontuação suficiente, enquanto as linhas em vermelho correspondem a pontuação insuficiente. É importante observar que nenhum segmento obteve pontuação para ser classificado como bom ou ótimo no índice de caminhabilidade, apenas em algumas categorias, conforme apresentado na figura 3.

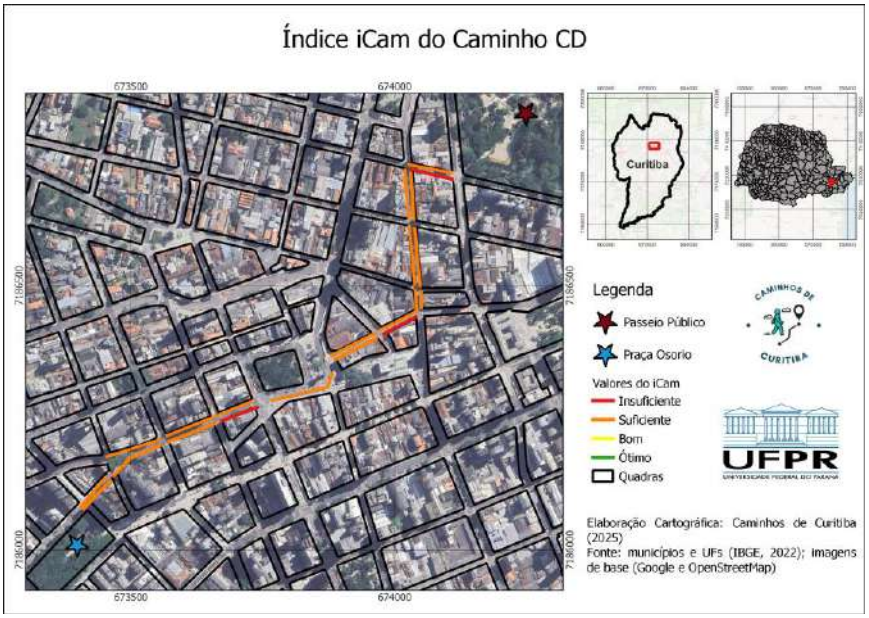


Figura 2: Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0) para cada quadra do trajeto entre a Praça Osório e o Passeio Público

Dentre as seis categorias avaliadas o melhor resultado foi obtido para a Mobilidade, composta dos indicadores Dimensão das quadras e Distância ao transporte, classificado como BOM. Esse resultado deve-se a grande presença de pontos de transporte coletivo, por se tratar de um trajeto localizado na área central da cidade, logo, bem servido deste modal de transporte. As demais categorias apresentaram índice Suficiente no percurso avaliado (Figura 3).

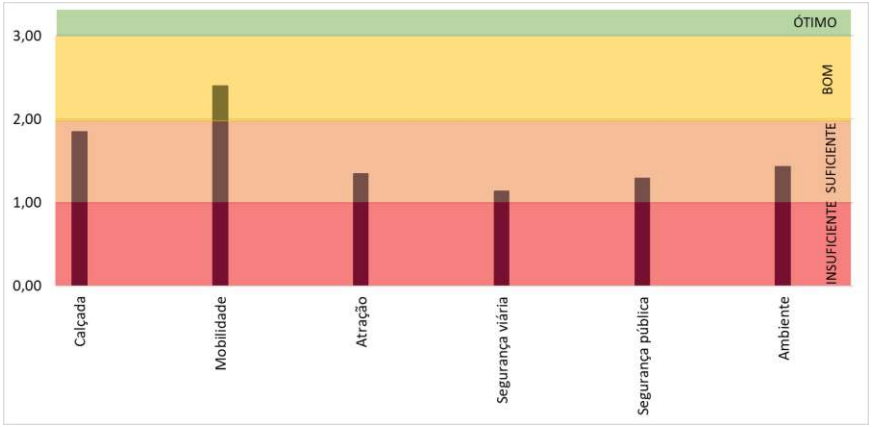


Figura 3: Apresentação dos resultados por categoria - percurso Praça Osório ao Passeio Público

No que tange à avaliação dos indicadores (Figura 4), destacam-se como os três piores resultados: Poluição Sonora (categoria Ambiente), Uso público diurno e noturno e Usos mistos (ambos da categoria Atração). Ressalta-se que as categorias Atração e Ambiente estão relacionadas ao potencial de atração de pedestres e aos aspectos ambientais que podem afetar as condições de caminhabilidade de um espaço urbano, impactando de forma decisiva a intensidade de uso de determinada rota pelos pedestres (ITDP, 2019).

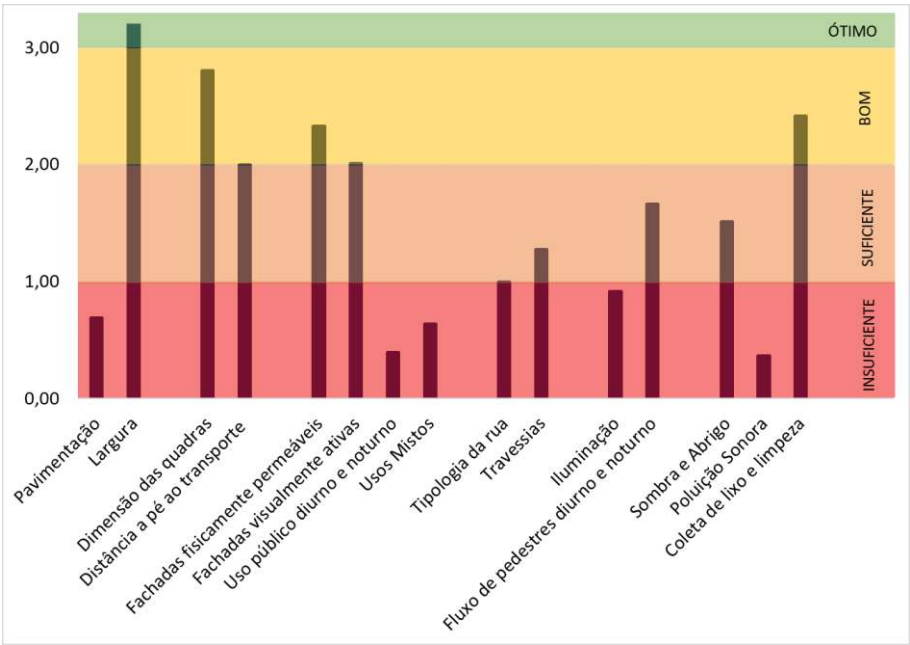


Figura 4: Apresentação dos resultados por indicadores - percurso Praça Osório ao Passeio Público

A poluição sonora em áreas urbanas centrais, causada principalmente pelo transporte, é reconhecida como um problema de saúde pública que pode levar doenças cardiovasculares, perda auditiva, distúrbios do sono e prejuízos cognitivos (Montes-González et. al. 2018). Diversos autores têm investigado o efeito da poluição sonora na caminhabilidade, por exemplo o estudo de Song et al. (2022) que apresenta o ruído ambiental como um mediador na relação entre a vegetação urbana e a satisfação do pedestre. Os autores investigaram e comprovaram a hipótese de que a presença de árvores e plantas pode diminuir a percepção subjetiva de ruído e, por conseguinte, aumentar a satisfação do pedestre. Isso posiciona a criação de parques e praças como uma diretriz de política pública essencial, com implicações práticas diretas para um planejamento urbano que promova o conforto acústico e a mobilidade ativa.

Já os resultados obtidos para os indicadores de Uso público diurno e noturno e os Usos mistos corroboram o observado por Vasconcelos e Costa (2023) que discutiram sobre o esvaziamento das áreas centrais de diversas cidades brasileiras. O fenômeno de esvaziamento das áreas centrais também foi estudado por Carty e Costa (2017). Os autores afirmam que para evitar ou reverter esse fenômeno é necessário que o planejamento urbano integre preservação, regulação do uso do solo, incentivos para uso misto, requalificação de edifícios antigos, políticas públicas que considerem tanto o centro quanto sua conexão com o entorno metropolitano. De acordo com o ITDP (2019), a presença integrada e equilibrada de diferentes usos e funções urbanas favorece a criação de ambientes mais acessíveis aos pedestres, reduzindo tanto a necessidade quanto a extensão dos deslocamentos. Além disso, a diversidade de usos contribui para a vitalidade dos espaços públicos, estimulando sua ocupação ao longo de diferentes horários, durante o dia e a noite.

4. CONCLUSÃO

As descobertas deste estudo podem ser utilizadas para definir as áreas críticas onde ações para melhorar os critérios relacionados à caminhabilidade devem ser priorizados. A análise evidencia a importância de ações integradas no planejamento urbano, com foco na requalificação dos espaços públicos centrais e na mitigação dos fatores ambientais adversos, como o ruído urbano, de modo a promover maior atratividade, segurança e acessibilidade aos pedestres. Nesse sentido, o estudo contribui como instrumento técnico para subsidiar políticas públicas e projetos de intervenção urbana orientados à mobilidade ativa.

Recomenda-se a replicação da metodologia em outros trechos da cidade, com vistas à construção de um diagnóstico mais abrangente da caminhabilidade em Curitiba, além da integração de dados sobre fluxos de

pedestres e percepções dos usuários, ampliando a compreensão sobre os fatores que influenciam a escolha pelo deslocamento a pé.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borges, M., Karantino, L., & Gorges, D. (2023). Walkability: Digital parametric process for analyzing and evaluating walkability criteria in peripheral central regions of Belo Horizonte. SIGraDi 2023, Accelerated Landscapes, Centro Universitario Regional Este (CURE), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República.

CARTY, Fabiana de Oliveira; MAIA COSTA, Fernando Luiz Lara. Vacância como materialização do processo de dispersão urbana: o centro histórico de Campinas, 2005-2014: um estudo de caso. *Arquitextos (Vitruvius)*, v. 17, n. 204, ano 17, São Paulo, 2017. Disponível em: https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/17.204/6561. Acesso em: 11 set. 2025.

de Toledo, U. G., & de Lima, A. A. (2024). Caracterização da sustentabilidade urbana na cidade de Manaus sob a ótica da caminhabilidade: um estudo de caso aplicando a ferramenta iCam 2.0. Revista de Gestão e Secretariado, 15(8), e4044-e4044.

Gaglione, F.; C. Gargiulo, F. Zucaro e C. Cottrilla (2022). Urban accessibility in a 15-minute city: a measure in the city of Naples, Italy. *Transportation Research Procedia* v. 60, p. 378–385. DOI /10.1016/j.trpro.2021.12.049

Gehl, J. (2014) *Cidades para pessoas*. 2.ed. São Paulo, SP: Perspectiva.

IPPUC (2025). Nosso bairro: conheça o Centro. Disponível em: https://indd.adobe.com/view/2ee05c82-778c-42ad-8688-7bf51052756a. Acesso em: 03 jul. 2025.

ITDP BRASIL (2019). *Manual de aplicação do iCam 2.0*. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento.

Liao, B.; P. E. W.Van Den Berg, P. J. V.Van Wesemael e T. A. Arentze (2020). Empirical analysis of walkability using data from the Netherlands. *Transportation Research Part D*: Transport and Environment. v. 85. DOI 10.1016/j.trd.2020.102390.

Montes-González, D.; R. Vilchez´Gómez; J. M. Barrigón-Morillas; P.Atanasio-Moraga; G. Rey-gozalo e J. Trujillo-Carmona. (2018). Noise and air pollution related to health in urban environments. *Proceedings*, [S. l.], v. 2, n. 1311, p. 1-5, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/proceedings2201311. Acesso em: 5 jul. 2025.

SEEG (2023) *Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa*. Observatório do Clima. Infográficos 2023. Acesso em: 03 jul. 2025. Disponível em: https://seeg.eco.br/infograficos/

Silva, A. N. A. (2021). Avaliação da caminhabilidade: um estudo comparativo entre dois bairros de João Pessoa –PB.

Song, J.; S. Zhou; M. R. Kwan; S. Liang; J. Lu; F. Jing e L. Wang (2022). The effect of eye-level street greenness exposure on walking satisfaction: The mediating role of noise and PM2. 5. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 77, p. 127752, 2022.

Vasconcellos, M. C. de J., e Y. N. P. da Costa. (2023) Reabilitação de edificações em áreas centrais: contribuições do research by design para o edifício Sulamérica (Recife). In: *XV Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo*, Lisboa-Recife, Junio-Septiembre. Disponível em: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/404317. Acesso em: 5 jul. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2018). *Environmental noise guidelines for the European region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. Disponível em: https://www.who.int Acesso em: 03 jul. 2025.

CAMINHAR E OBSERVAR: O CENTRO HISTÓRICO DE SÃO JOÃO DEL-REI (MG) ATRAVÉS DAS PESSOAS IDOSAS

Erik Fillipy de Oliveira[1], **Daniela Antunes Lessa**[2], **Bárbara Abreu Matos**[2]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO
O envelhecimento populacional e as particularidades das cidades históricas impõem desafios significativos à mobilidade a pé de pessoas idosas, exigindo abordagens sensíveis e contextualizadas. Inserido nesse cenário, este estudo analisou as condições de caminhabilidade no centro histórico de São João Del-Rei (MG), a partir da experiência de quatro participantes com idades entre 66 e 75 anos. Utilizou-se a metodologia dos passeios acompanhados, técnica qualitativa baseada na observação e no diálogo durante trajetos previamente definidos. A análise considerou quatro dimensões: acessibilidade, atratividade, segurança viária e segurança pessoal. Os resultados revelaram obstáculos recorrentes, como calçadas irregulares, ausência de sinalização, iluminação precária e deficiência em equipamentos urbanos, comprometendo a mobilidade segura e autônoma das pessoas idosas. A técnica mostrou-se eficaz para captar a experiência real de deslocamento e contribuir com diagnósticos urbanos mais sensíveis. O estudo reforça a importância de considerar a perspectiva da pessoa idosa no planejamento urbano, especialmente em contextos patrimoniais.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A qualidade dos espaços públicos urbanos pode ser medida, em grande parte, pela experiência de quem caminha. Para o urbanista Gehl (2015), cidades saudáveis e inclusivas são aquelas que acolhem o pedestre, oferecendo condições para que o ato de caminhar seja confortável, seguro e socialmente estimulante. Jacobs (2011) defende que a vitalidade urbana nasce da diversidade de usos, da presença constante de pessoas nas ruas e da escuta atenta ao cotidiano. Ambos convergem na defesa de um urbanismo centrado nas pessoas — especialmente naquelas que vivem a cidade com mais vulnerabilidades, como é o caso da população idosa. Esse debate se torna ainda mais relevante diante do acelerado processo de envelhecimento populacional. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010; 2022), o percentual de pessoas idosas passou de 10,8% em 2010 para 15,8% em 2022. Para as próximas décadas, a Organização das Nações Unidas (ONU, 2024) estima que, em nível mundial, o número de pessoas idosas chegará a 3,1 bilhões. Diante dessa realidade, repensar as cidades torna-se uma questão de justiça espacial e cidadania (OMS, 2007).

Especialmente nas cidades patrimonializadas, os desafios relacionados à mobilidade a pé são expressivos. No caderno técnico "Mobilidade e Acessibilidade Urbana" elaborado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em 2014, são destacados desafios como: calçadas estreitas, pavimentação irregular, topografia acidentada e ausência de acessibilidade tátil. Em consonância, o estudo de Oliveira *et al.* (2022) para São João Del-Rei (Minas Gerais), desenvolvido a partir da aplicação da ferramenta de diagnóstico da caminhabilidade elaborada por Matos *et al.* (2021), destaca um centro histórico pouco amigável ao pedestre. Nesse cenário, barreiras físicas, como a ausência de rampas e a má conservação das calçadas, somam-se ao sentimento de insegurança pública e viária (Oliveira *et al*., 2022). Assim, o direito de caminhar e pertencer ao espaço urbano é negado às pessoas idosas.

Com o objetivo de compreender essas questões sob a ótica de quem vive a cidade diariamente, este artigo propõe analisar as condições de caminhabilidade no centro histórico de São João Del-Rei, a partir da perspectiva da pessoa idosa, utilizando a metodologia dos passeios acompanhados (*walkthrough*). Desenvolvida por Kevin Lynch nos anos 1960, essa técnica tem se mostrado eficaz na identificação de obstáculos físicos e simbólicos à mobilidade urbana, ao privilegiar o olhar de quem experimenta o espaço em deslocamento. No contexto brasileiro, já foi aplicada em diferentes realidades urbanas, como no estudo conduzido por Gonçalves (2023) em Mariana (Minas Gerais), que investigou os deslocamentos de pessoas com deficiência em áreas de valor histórico e cultural. Por meio de caminhadas dialogadas, essa abordagem permite registrar, com riqueza sensível, os relatos, percepções, emoções e gestos dos participantes, revelando dinâmicas invisibilizadas pelas ferramentas tradicionais de diagnóstico urbano (Rheingantz *et al*., 2009).

Ao integrar teoria, método e escuta ativa, esta pesquisa busca contribuir para o planejamento de cidades mais humanizadas, inclusivas e responsivas às demandas do envelhecimento, reforçando o direito de todos à mobilidade segura e ao pertencimento urbano. Nesse sentido, o estudo se alinha às diretrizes propostas pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para a construção de Cidades Amigas das Pessoas Idosas, reafirmando a importância de ambientes urbanos acessíveis e caminháveis como pilares de uma cidade que cuida.

2. METODOLOGIA

O recorte espacial do estudo localiza-se no centro histórico de São João Del-Rei, uma localidade que representa um contexto histórico, cultural, turístico, arquitetônico e artístico, em razão de sua formação colonial, datada entre os séculos XVII e XVIII, relacionada ao ciclo do ouro, a qual representa atualmente uma área de valor e preservação patrimonial. Para a aplicação do Passeio Acompanhado, foi realizada previamente uma observação exploratória, com o intuito de identificar os serviços essenciais que caracterizam a presença contínua de pedestres no espaço urbano. Foram considerados, nessa análise, elementos como prédios públicos, agências bancárias, hospitais, estabelecimentos comerciais em geral e templos religiosos. A partir dessa identificação, selecionaram-se quatro áreas para a realização dos percursos, contemplando as principais vias, com o objetivo de abranger os pontos de maior circulação e interação cotidiana dos pedestres (Figura 1).

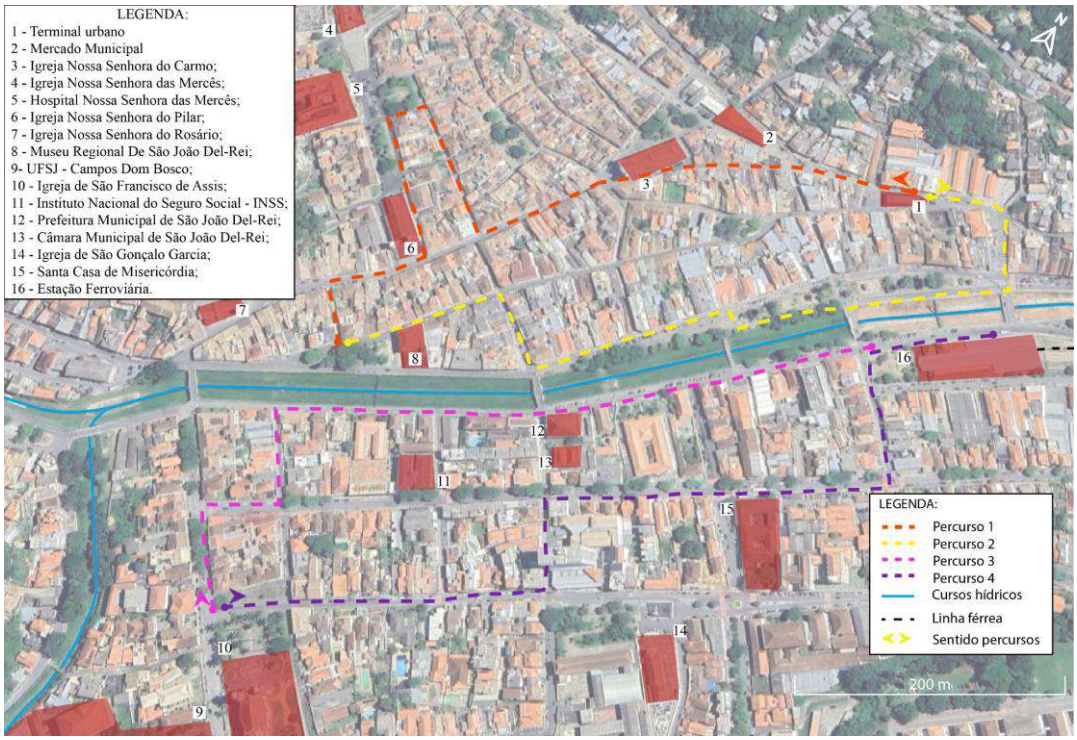


Figura 1: Mapa de localização dos Percursos. Fonte: Elaboração própria.

A partir da observação, consolidaram-se os trajetos percorridos nos quatro itinerários da pesquisa. O Percurso 1 teve início no Terminal Urbano e compreendeu as seguintes vias: Rua do Carmo, Avenida Getúlio Vargas, Rua Doutor José Mourão, Rua Padre Lourival Salvo Rios e Rua Maestro João Pequeno, encerrando-se na Praça Severiano de Resende. Também com ponto de partida no Terminal Urbano, o Percurso 2 abrangeu as ruas José Leite de Andrade, Avenida Presidente Tancredo Neves, Rua Artur Bernardes e Rua Marechal Deodoro, finalizando-se igualmente na Praça Severiano de Resende. O Percurso 3 teve início na Praça Frei Orlando, percorrendo a Rua Padre José Maria Xavier, Avenida Tiradentes, Rua Aureliano Mourão, Avenida Eduardo Magalhães e encerrando-se no ponto de ônibus localizado na Rua Hermílio Alves. Por fim, o Percurso 4, com início na mesma Praça Frei Orlando, percorreu as ruas Doutor Balbino da Cunha, Ministro Gabriel Passos, Avenida Tiradentes e Rua Maria Teresa, encerrando-se também no ponto de ônibus da Rua Hermílio Alves.

A análise fundamentou-se na ferramenta denominada *walkthrough*, traduzida como Passeio Acompanhado, que consiste na realização de caminhadas por ambientes previamente definidos, permitindo aos participantes identificarem aspectos positivos e negativos do espaço e de seu uso (Rheingantz *et al*., 2009). O método foi complementado por registros fotográficos, croquis e gravações de áudio, que enriqueceram a documentação e a análise dos resultados. Durante a aplicação, também foram registradas impressões, reações e recomendações, em diálogo com os participantes. Assim, a definição da ferramenta mostrou-se fundamental para a coleta das percepções da população que pode apresentar vulnerabilidades no espaço de circulação, permitindo o mapeamento de irregularidades e a identificação de possíveis transformações. Nesse contexto, a escolha do público-alvo fundamentou-se na prospecção de indivíduos interessados, por meio da busca por participantes residentes em São João Del-Rei com idade superior a 60 anos. Para tanto, foi realizada uma abordagem inicial,

na qual se apresentou a pesquisa e os objetivos propostos, permitindo a seleção dos participantes que demonstraram interesse em colaborar com o estudo. A aplicação foi estruturada em duas etapas: (i) observação inicial e definição dos percursos; e (ii) realização dos passeios com coleta dos dados. A pesquisa foi direcionada ao acompanhamento de pessoas idosas, com a participação de quatro moradores de São João Del-Rei — um homem e três mulheres —, com idades entre 66 e 75 anos.

A análise em campo foi orientada por quatro eixos principais: (1) Acessibilidade, (2) Atratividade; (3) Segurança viária; e (4) Segurança pessoal. Esses eixos foram adaptados da metodologia de análise territorial proposta por Malavasi *et al*. (2007), ajustados à realidade do Passeio Acompanhado e às especificidades do centro histórico de São João Del-Rei. A Tabela 1 sistematiza as informações, apresentando de forma sintética os principais aspectos observados na etapa de campo.

Tabela 1: Categorias de análise do Passeio Acompanhado

Pilares	Análise
(1) Acessibilidade	Observar a existência de calçadas em bom estado de conservação, bem cuidadas, sem obstáculos, grandes, pavimentadas e com a inclinação adequada, é um convite para que as pessoas caminhem com qualidade.
(2) Atratividade	Observar a presença de sombras ao longo do percurso, arborização, mobiliário urbano em bom estado e ruas limpas, influenciam na percepção da atratividade do local.
(3) Segurança Viária	Item direcionado à segurança durante o deslocamento a pé em relação à mobilidade motorizada, com observações sobre a educação no trânsito, presença de veículos em alta velocidade, sinalização para pedestres (placas e faixas de pedestre) e tempo de espera dos semáforos.
(4) Segurança Pessoal	Direcionado à sensação de segurança do pedestre, analisando a presença de iluminação, ruas seguras (pouca criminalidade), presença de comércio, capacidade de ser vista e ouvida, se há movimentação de pessoas transitando pela zona de estudo, facilidade de obter ajuda e presença de vigilância pública.

Fonte: Elaboração própria.

3. RESULTADOS

Ao longo da realização dos passeios acompanhados, foi possível identificar diversos problemas relacionados às condições dos espaços destinados à circulação. Entre os principais, destacam-se: calçadas com buracos e pavimentação comprometida, ausência de equipamentos urbanos ao longo dos trajetos e deficiência na iluminação pública (Figura 2).



Figura 2: Condições dos espaços destinados à circulação na área de estudo.
Fonte: Elaboração própria.

Na categoria (1) Acessibilidade, a condição das calçadas foi algo bastante observado em todos os percursos realizados, destacando-se a presença de buracos, pavimentação irregular, dimensões reduzidas e desníveis acentuados. A ausência de faixas de pedestres e de rampas de acessibilidade configurou-se como um problema comum, comprometendo a mobilidade das pessoas. Constatou-se, ainda, a presença de ruas inclinadas e trechos

com escadarias, como no Percurso 1, onde evidenciou a necessidade de instalação de corrimãos nas Ruas Padre Lourival Salvo Rios e Maestro João Pequeno. As percepções foram semelhantes em todos os trajetos realizados quanto às dificuldades para circulação nas calçadas. Ressalta-se, contudo, trechos dos Percursos 3 e 4 que apresentaram calçadas de maior largura. Os estudos conduzidos por Oliveira *et al*. (2022) já haviam revelado a precariedade das condições das calçadas, o que foi reforçado na presente análise, que evidenciou dificuldades recorrentes no deslocamento.

No eixo (2) Atratividade, destacou-se a ausência e a precariedade na manutenção dos equipamentos urbanos como um dos principais fatores observados ao longo dos percursos. Um dos pontos recorrentes foi o acúmulo de lixo nas vias, atribuído à falta de lixeiras ou à presença de unidades danificadas, situação registrada em todos os trajetos analisados. A ausência de cobertura em pontos de ônibus foi observada em algumas vias durante a análise, em trechos específicos, como nos Percursos 1 e 4, o que compromete o conforto dos usuários. Constatou-se a presença de bancos danificados ou inexistentes em praças e largos, o que gerou situações de desconforto para os participantes. Quanto à vegetação urbana, foi registrada em praças e largos, embora nos Percursos 3 e 4 tenha sido notada a necessidade de podas adequadas. Um aspecto recorrente foi a deficiência da drenagem urbana, evidenciada tanto pela existência de bueiros entupidos quanto pela escassez de estruturas eficientes para o escoamento de água pluvial.

Na categoria (3) Segurança Viária, foi registrada a ausência de faixas de pedestres, sobretudo em locais de intenso fluxo de veículos, o que representa um risco significativo. Destacam-se como pontos críticos as proximidades da Igreja Nossa Senhora do Carmo (Percurso 1), na Rua José Leite de Andrade (Percurso 2), na Rua Padre José Maria Xavier (Percurso 3) e na Rua Hermílio Alves (Percurso 4). Além disso, foram observadas faixas de pedestres sem conexão adequada com as calçadas, dificultando o deslocamento seguro dos pedestres. Locais estratégicos, como as margens da Santa Casa, não apresentaram estruturas e conexões adequadas. No Percurso 3, na Rua Hermílio Alves, constatou-se a presença de semáforos com tempo insuficiente para a travessia segura, situação agravada pela alta velocidade dos veículos. Também foram registrados problemas como estacionamento irregular e excessivo, falta de sinalização viária e desrespeito às normas de trânsito, especialmente no Percurso 2, demandando ações integradas para melhorar a segurança.

No eixo da (4) Segurança Percebida, os relatos dos participantes apontaram deficiências na infraestrutura de iluminação pública, fator que gera insegurança segundo os participantes. Mesmo em trechos onde há presença de luminárias, a intensidade da iluminação noturna foi considerada insatisfatória. Verificaram-se lamparinas danificadas, queimadas ou inadequadas, além da predominância de lâmpadas de vapor de sódio, cuja capacidade de iluminação é inferior em comparação a tecnologias mais modernas, como o LED, o que evidencia a necessidade de atualizações mais recorrentes. Os locais mais mencionados pelos participantes incluem o Terminal Urbano, a Rua do Carmo, a Avenida Getúlio Vargas, a Rua Doutor José Mourão, a Rua Padre Lourival Salvo Rios, e as praças Severiano de Resende e da Estação. Somado a isso, observou-se a ausência de vigilância durante a aplicação, não sendo registrado nenhum posto policial ou viatura.

As observações realizadas com as pessoas idosas reforçam a necessidade de reconhecer os desafios cotidianos do espaço de circulação e de promover ambientes mais igualitários e acessíveis. Ao valorizar a escuta ativa, evidencia-se a importância de incorporar a perspectiva da população idosa no planejamento urbano e nas políticas públicas, reafirmando o compromisso com cidades mais justas e voltadas ao bem-estar coletivo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da escuta qualificada de pessoas idosas em deslocamento, esta pesquisa evidenciou que o centro histórico de São João Del-Rei impõe barreiras importantes à mobilidade segura e autônoma, comprometendo o direito básico de circular com dignidade. Calçadas irregulares, sinalização precária e insegurança pública foram apontadas como desafios recorrentes. A aplicação da metodologia do Passeio Acompanhado mostrou-

se pertinente para identificar essas fragilidades de forma realista, ao captar a experiência direta de quem utiliza os espaços públicos diariamente. O público-alvo desta pesquisa revelou-se de grande importância, uma vez que os relatos obtidos foram fundamentais para o mapeamento das vulnerabilidades que demandam melhorias. A população idosa pode apresentar restrições de mobilidade, sejam elas permanentes ou temporárias, o que reforça a necessidade de espaços verdadeiramente inclusivos. Futuros estudos podem aprofundar essa abordagem ao incluir outros grupos sociais, como pessoas com deficiência, e integrar ferramentas quantitativas e geoespaciais ao diagnóstico participativo. A articulação entre mobilidade urbana, preservação patrimonial e políticas públicas será essencial para a construção de centros históricos mais acessíveis, funcionais e inclusivos.

Reconhece-se a importância de pesquisas que priorizem a escuta ativa dos pedestres e incorporem a perspectiva da população idosa como elementos fundamentais para uma abordagem urbana mais sensível. A técnica do Passeio Acompanhado destacou-se por valorizar o protagonismo do pedestre e contribuir para intervenções mais alinhadas às necessidades reais da população, promovendo ambientes urbanos mais responsivos e acolhedores. Por cidades mais justas, inclusivas e comprometidas com o bem-estar coletivo.

Agradecimentos
Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes (GeoTrans) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gehl, J. (2015) *Cidades para pessoas* (3. ed.). São Paulo: Perspectiva.

Gonçalves, C. C. (2023) *Caminhabilidade em centros históricos: uma análise sob a ótica de pessoas com deficiência e mobilidade reduzida em Mariana (MG)*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) *Censo demográfico 2010*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/censo2010> (acesso em 05/07/2025).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) *Prévia do censo demográfico 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/> (acesso em 05/07/2025).

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (2014) *Mobilidade e acessibilidade urbana em centros históricos*. Organização de Sandra Bernardes Ribeiro. Brasília: IPHAN. (Cadernos Técnicos, 9).

Jacobs, J. (2011) *Morte e vida de grandes cidades*. São Paulo: Martins Fontes.

Malavasi, L. de M. et al. (2007). Escala de mobilidade ativa no ambiente comunitário – News Brasil: retradução e reprodutibilidade. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano,* v. 9, n. 4.

Matos, B. A.; A. L. R. S. Santos e M. G. Silva (2021) Caminhabilidade nas cidades históricas: um estudo para o Centro Urbano Histórico de Glaura, em Ouro Preto (MG). In: *Anais do XVIII Congresso Rio de Transportes* (Rio de Janeiro, RJ). Rio de Janeiro: [s.n.].

OMS – Organização Mundial da Saúde (2007) *Guia global das cidades amigas das pessoas idosas*. Genebra: OMS.

ONU – Organização das Nações Unidas (2017) *Envelhecimento*. Centro Regional de Informações para a Europa Ocidental. Disponível em: <https://unric.org/pt/envelhecimento/> (acesso em 20/06/2024).

Rheingantz, P. A.; A. Brasileiro; D. de Alcântara; G. A. Azevedo e M. Queiroz (2009) *Observando a qualidade do lugar: procedimentos para a avaliação pós-ocupaçã*o. Rio de Janeiro: PROARQ/UFRJ.

Oliveira, E. F.; B. A. Matos; P. C. A. Fernandes; D. A. Lessa; M. G. da Silva; J. M. de Oliveira e A. L. R. S. Santos (2022) Caminhabilidade no centro urbano histórico de São João Del-Rei, Minas Gerais. In: *Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (Fortaleza, CE). Fortaleza: ANPET.

Erik Fillipy de Oliveira (erikfillipy.ufmg@gmail.com), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes (Geotrans), Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil
Daniela Antunes Lessa (daniela.lessa@ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Civil (DECIV/UFOP), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil
Bárbara Abreu Matos (barbara.matos@ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Urbana (DEURB/UFOP), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil

CÁLCULO DO NÍVEL DE SERVIÇO DE CALÇADAS NO SETOR CYLLENEO FRANÇA EM JATAÍ-GO

Giovanna Barcelos Ribeiro, Isabela Gomes Gouveia, Joyce Moraes Rocha, Moisés Barbosa Borges Victor Ferreira Santos e Caroline Duarte Alves Gentil
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

RESUMO
A infraestrutura destinada à circulação de pedestres deve atender à demanda local, garantindo conforto, segurança e acessibilidade aos usuários. Esses aspectos tornam-se especialmente relevantes em cidades de pequeno porte, onde, devido à ausência de transporte público e às curtas distâncias, os deslocamentos a pé representam a base da mobilidade urbana. Este estudo teve como objetivo calcular o nível de serviço (NS) das calçadas, disponibilizando um recurso técnico para a gestão desses espaços pela administração local. O método denominado Índice de Serviço das Calçadas (ISC), composto por dois indicadores que analisam a qualidade do espaço (ISCqe) e a acessibilidade (ISCa) foi aplicado em Jataí-GO, no setor Cylleneo França. Os níveis de serviço podem variar de A (melhor condição) a F (pior condição). Os resultados apontaram uma maior ocorrência do NS-F, nas calçadas avaliadas no setor em questão. O modelo demonstrou aplicabilidade para cidades de pequeno porte.

1. INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

A situação das calçadas no Brasil é crítica, impactando diretamente a mobilidade e a segurança dos pedestres. Estudos do Mobilize Brasil (2019) apontam que, apesar de algumas iniciativas, a infraestrutura das calçadas nas cidades brasileiras permanece inadequada. Esse cenário é preocupante, considerando que, segundo a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2018), 39% dos deslocamentos no país são feitos a pé. O município de Jataí, em Goiás, se destaca como uma potência do agronegócio brasileiro e vem passando por uma expressiva expansão nos setores comercial, industrial, tecnológico e científico. Com uma população estimada em 105.729 habitantes (IBGE, 2022), a cidade demanda infraestrutura urbana adequada para garantir a acessibilidade e a qualidade de vida da população. Calçadas bem planejadas e mantidas são fundamentais para a inclusão social, a redução de acidentes e a promoção de hábitos saudáveis, como a caminhada.

A acessibilidade urbana, segundo a ABNT NBR 9050, refere-se ao uso seguro e autônomo dos espaços (ABNT, 2020), mas ainda é prejudicada por deficiências estruturais. Calçadas precárias e a falta de rotas acessíveis dificultam o acesso a serviços básicos (Freire et al., 2013). O Código de Trânsito Brasileiro (Lei nº 9.503/1997) reforça que as calçadas são parte da via pública e devem priorizar os pedestres, podendo abrigar vegetação, mobiliário e sinalização quando viável (BRASIL, 1997).

As calçadas são essenciais à mobilidade urbana, funcionando como espaço de circulação de pedestres e integrando modos de transporte e acesso à cidade. Sua qualidade e acessibilidade influenciam diretamente segurança, autonomia e inclusão, especialmente de crianças, idosos e pessoas com deficiência. Quando inadequadas comprometem a mobilidade ativa e agravam desigualdades socioespaciais, sendo, portanto, alvo de políticas públicas estratégicas para cidades mais justas e sustentáveis. Estas contem três faixas: serviço, junto à guia, para mobiliário urbano e barreiras; livre, central, para fluxo seguro; e acesso, junto às edificações, permitindo rampas e entradas de imóveis. Essa divisão, prevista na ABNT NBR 9050: 2021, evita interferências e garante conforto e segurança a todos os usuários.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar as condições atuais das calçadas no Setor Cylleneo França, identificando os principais problemas encontrados. Além disso, buscou fornecer informações que pudessem contribuir para a melhoria do nível de serviço das calçadas na região.

2. METODOLOGIA

Por meio do método adaptado de Silva e Neto (2019) e Araújo (2022), foi calculado o Nível de Serviço (NS), uma classificação qualitativa que expressa a percepção dos usuários sobre as calçadas (HCM, 2016). A adaptação ocorreu devido à ausência de contato com os moradores da região, o que restringiu a subjetividade do estudo. O objetivo foi desenvolver o Índice de Serviço de Calçadas (ISC), um valor quantitativo obtido a partir de indicadores da infraestrutura local, contribuindo para a gestão urbana e da mobilidade em Jataí-GO. A pesquisa foi organizada em três etapas, descritas a seguir: i. Avaliação técnica das calçadas realizada pelos pesquisadores *in loco*, que atribuíram graus de qualidade aos fatores determinantes do NS, através do método

de Análise Hierárquica (AHP). Esse método, segundo Alves e Alves (2014), permitiu considerar simultaneamente múltiplas variáveis, oferecendo suporte qualificado à decisão de gestores públicos e planejadores urbanos; ii. Determinação da importância relativa dos parâmetros de qualificação com base nas preferências do usuário, realizada por especialistas envolvidos no desenvolvimento do novo Plano Diretor de Jataí: arquiteto urbanista responsável pelo Plano Diretor atual, superintendente de Obras e Planejamento Urbano, superintendente de Engenharia e coordenadora de Lançamento e Processamento de Infraestrutura e iii. Avaliação final do nível de serviço com base no Índice de Serviço das Calçadas (ISC).

Para a determinação do bairro que seria avaliado utilizou-se os seguintes critérios para escolha: estar próximo ao Instituto Federal de Goiás, isto é circunscrito em um raio de até dois quilômetros do centro do lote do edifício sede do supracitado; conter até doze quadras, tendo em vista a equipe limitada de alunos que iriam fazer o levantamento;

Com base nesses critérios, o espaço amostral foi reduzido a duas áreas: o Setor Cylleneo França e o Bairro Primavera II. O primeiro foi selecionado para o estudo por meio de um critério de desempate, considerando a sua geometria ortogonal, que facilita a análise de inclinação durante a etapa prática da pesquisa.

2.1 Área de estudo

De acordo com o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022), a cidade de Jataí apresenta uma densidade demográfica de 14,73 habitantes por quilômetro quadrado (hab/km²) e uma média de 2,74 habitantes por residência. Com base na Equação 1, foi obtida uma estimativa de 751 habitantes no setor avaliado. No que se refere aos indicadores sociais, o município possui um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0.757, classificado como alto, e um Índice de Gini de 0.55, conforme dados do Infosambas (2024).

$$\sum Lotes\ residenciais \times 2{,}74 \cong 750{,}76\ hab \quad (1)$$

O objeto de estudo apresenta 0,1418km² delimitados em 1.538km de perímetro. Possui 7 quadras com 34 lotes residenciais cada; 1 quadra de 17 lotes residenciais; 1 quadra com 10 lotes residenciais; 1 quadra com 5 lotes residenciais; 1 quadra mista com 4 lotes residenciais e 3 lotes comerciais/industriais; e 1 quadra comerciais com 6 áreas comerciais/industriais.

2.2 Avaliação técnica das calçadas

Conforme método proposto por Silva e Neto (2019), definiram-se dez variáveis de qualificação para a composição do Índice de Serviço das Calçadas (ISC), sendo estas subdivididas na Tabela 1.

Tabela 1: Qualificação para composição do ISC

Grupo	Variável	Descrição
Qualidade do espaço	Segurança	Conflito entre pedestres e veículos
	Construção e manutenção	Material utilizado e estado de conservação do pavimento
	Seguridade	Vulnerabilidade do pedestre a ações de pessoas mal-intencionadas
	Atratividade	Agradabilidade estética visual do meio
	Arborização da calçada	Adequabilidade técnica das espécies à composição arbórea nas calçadas
Acessibilidade	Largura efetiva	Faixa livre disponível
	Sinalização e rampas	Existência de faixas de pedestres e rampas nas travessias
	Inclinação longitudinal	Variação do perfil do pavimento no sentido longitudinal
	Inclinação transversal	Variação do perfil do pavimento no sentido transversal
	Desníveis	Existência de desníveis e degraus ao longo do trajeto

O grupo de qualidade do espaço relaciona as condições físicas existentes às demandas sociais, enquanto o grupo de acessibilidade considera essas condições em relação aos possíveis obstáculos. Para tornar a análise intuitiva, definiu-se uma escala de 1 (péssimo) a 5 (excelente), e os pesquisadores atribuíram os escores com base na condição observada em cada quadra, considerando o ponto mais crítico ao longo de sua extensão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Tabela 2 os índices de serviço determinam a condição e o nível de serviço (NS) das calçadas. Os níveis A e B indicam alta qualidade e acessibilidade, sendo ideais para novas construções ou reformas. O nível C ainda é adequado, mas com menor atratividade e conforto. O nível D é aceitável, porém pode ser melhorado com intervenções urbanas. Já os níveis E e F indicam condições precárias, exigindo ações urgentes para garantir segurança e conforto aos pedestres.

Tabela 2: Faixa de índice de serviço coma respectiva condição e nível de serviço

Índice de Serviço	Condição	Nível de serviço
5,0	Excelente	A
4,0 a 4,99	Ótimo	B
3,0 a 3,99	Bom	C
2,0 a 2,99	Regular	D
1,0 a 1,99	Ruim	E
0,0 a 0,99	Péssimo	F

Fonte: Silva, O. H. da; De Angelis Neto, G. (2019)

Para analisar a qualidade e a acessibilidade do espaço, foi aplicada uma pesquisa de ranking de 1 a 5 com especialistas em planejamento urbano, em que 5 indica maior relevância. Foram avaliados critérios de segurança, construção e manutenção, seguridade, atratividade e arborização, bem como largura efetiva, sinalização, rampas, inclinação longitudinal e transversal e desníveis. Esses aspectos são utilizados para garantir um ambiente urbano funcional, agradável e acessível para todos os usuários das calçadas (Tabela 3).

Tabela 3: Número de atribuições do *score* por variável – especialista.

Grupo	Variável	Número de atribuições do *score* por variável - especialista						ISC
		1	2	3	4	5	Resultados	
Qualidade do espaço	Segurança	0	0	0	2	4	4,67	B
	Construção e manutenção	0	0	0	4	2	4,33	B
	Seguridade	0	1	5	0	0	2,83	D
	Atratividade	3	3	0	0	0	1,5	E
	Arborização da calçada	3	2	1	0	0	1,67	E
Acessibilidade	Largura efetiva	1	0	0	1	4	4,17	B
	Sinalização e rampas	0	0	2	4	0	3,67	C
	Inclinação longitudinal	1	3	2	0	0	2,17	D
	Inclinação transversal	3	3	0	0	0	1,50	E
	Desníveis	1	0	2	1	2	3,50	C

Define-se a Importância Relativa (IR), Equação 2, como a razão entre o produto da frequência (Fi) e o peso (Pi) atribuído, dividido pelo número total de respostas (N). Essa métrica permitiu quantificar a relevância de cada fator analisado, ponderando sua ocorrência e impacto dentro do conjunto de dados coletados.

$$IR = \frac{\sum (Fi \times Pi)}{N} \quad (2)$$

Utilizando o método de Silva e De Angelis Neto (2018), os pesquisadores realizaram levantamento no local para atribuir scores de 0 a 5 às categorias: segurança, construção e manutenção, seguridade, atratividade, arborização, largura efetiva, sinalização de rampas e travessias, inclinações e desníveis, permitindo avaliação padronizada da qualidade das calçadas. A partir da Equação 2, obtiveram-se os resultados da pesquisa de campo e o Índice de Regularidade (IR) do Setor Cylleneo França, evidenciando diferenças significativas entre as percepções dos grupos, especialmente em segurança, acessibilidade e arborização (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados das atribuições dos scores (Levantamento de Campo).

Grupo	Variável	Número de atribuições do *score* por variável							
		0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Resultados**	**ISC**
Qualidade do espaço	Segurança	0	0	6	5	21	3	3,60	C
	Construção e manutenção	0	3	11	8	9	4	3,00	C
	Seguridade	1	2	18	10	3	1	2,43	D
	Atratividade	9	4	4	15	3	0	1,97	E
	Arborização da calçada	7	10	7	4	5	2	1,89	E
Acessibilidade	Largura efetiva	0	0	5	4	8	18	4,11	B
	Sinalização e rampas	4	2	21	2	6	0	2,11	D
	Inclinação longitudinal	0	12	4	8	6	5	2,66	D
	Inclinação transversal	0	2	2	0	13	17	4,09	B
	Desníveis	4	3	8	5	5	10	2,97	D

É possível inferir que na categoria segurança e manutenção, os especialistas atribuíram ISC mais alto que o levantamento de campo: "Segurança" recebeu 4,67 (B) pelos técnicos e 3,60 (C) *in loco*, enquanto "Construção e Manutenção" tiveram menor diferença (2,83 e 2,43 – D). Em atratividade e arborização, houve consenso sobre a baixa atratividade (1,50 E especialistas; 1,97 E campo). Já a arborização foi avaliada de forma mais crítica pelos especialistas (1,67 E) do que em campo (2,43 D).

Na acessibilidade, "Largura Efetiva" teve avaliações próximas (4,11 e 4,17 – B), enquanto "Sinalização e Rampas" foi superior pelos especialistas (3,67 C) em relação ao campo (2,66 D), evidenciando dificuldades percebidas pelos pedestres. Inclinações e desníveis também mostraram pequenas diferenças, mas desempenho insatisfatório em ambas as avaliações.

Os resultados mostram que especialistas tendem a atribuir notas mais altas para segurança e acessibilidade, enquanto o levantamento de campo evidencia deficiências no uso cotidiano das calçadas, refletindo a diferença entre avaliação técnica e experiência direta dos pedestres. Como síntese, foi elaborado um mapa de cores (Figura 1) com a média do NS por rua, predominando faixas C, D, E e F, e NS Regular na maioria das calçadas do setor Cylleneo França, indicando que as expectativas técnicas não foram alcançadas. Esse mapa pode orientar ações de manutenção para tornar os espaços mais acessíveis e seguros.

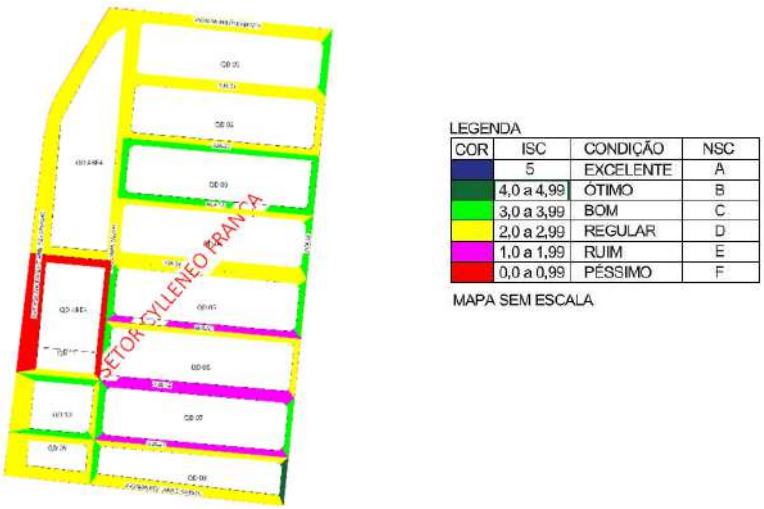


Figura 1: Mapa de cores com a escala de NS - Cylleneo França.

4. CONCLUSÃO

A partir da aplicação do método adaptado de Silva e Neto (2019) foi possível obter, como produto, o Índice de Serviço das Calçadas do setor Cylleneo França. Os achados permitiram fazer uma análise sobre características relativas à qualidade do espaço e acessibilidade. Esse índice visa fornecer suporte técnico qualificado para auxiliar gestores públicos na tomada de decisões, especialmente em planejamentos e ações futuras de manutenção e requalificação da infraestrutura urbana, envolvendo até mesmo o plano diretor. Portanto, o estudo pretende subsidiar futuras intervenções na infraestrutura urbana contribuindo para a construção de um ambiente mais acessível.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. (2024) *Jataí - GO: Informações sobre o município.* Disponível em: https://infosanbas.org.br/municipio/jatai-go (acesso em 23/11/2024).

Alves, J. R. X.; J. M. Alves. (2015) Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (AHP). *Produção*, v. 1, p. 13–26. DOI: 10.1590/S0103-65132014005000023 (acesso em 14/02/2025).

Freire Jr., R. C.; A. Beltrano e F. Silva. (2013) Estudo de acessibilidade de idosos ao centro da cidade de Caratinga, MG. *Revista Brasileira de Geriatria e Gerontologia*, v. 16, p. 541–558.

Galarraga, E.; Pereira, H. M. S. (2015) Avaliação da qualidade de calçadas: proposta de um índice de qualidade do passeio público. *Revista Transportes*, v. 23, n. 3, p. 17–28.

Grinóver, L. (2013) Hospitalidade, qualidade de vida, cidadania, urbanidade: categorias novas e velhas para a compreensão da hospitalidade urbana. *RITUR - Revista Iberoamericana de Turismo*, v. 1, p. 16–24.

Highway Capacity Manual – HCM. (2016) *Transportation Research Board.* 6th edition. Washington, D.C.: TRB.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024) *Panorama Jataí - GO.* Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/jatai/panorama (acesso em 23/11/2024).

Silva, O. H. da; G. de Angelis Neto. (2019) Índice de Serviço das Calçadas (ISC). *Ambiente Construído*, v. 1, p. 221–236.

Simob/ANTP – Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público. (2019) *Calçadas do Brasil.* Disponível em: https://www.mobilize.org.br/midias/campanhas/calcadas-2019/relatorio-final.pdf (acesso em 15/02/2025).

A cidade. (2025) Disponível em: https://www.jatai.go.gov.br/cidade-jatai/ (acesso em 15/02/2025).

Giovanna Barcelos Ribeiro (gi.barcelos13@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 775, Residencial Flamboyant, Jataí, Goiás, Brasil.

Isabela Gomes Gouveia (isabelagomesgouveia@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 775, Residencial Flamboyant, Jataí, Goiás, Brasil.

Joyce Moraes Rocha (joycemoraesrocha@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 775, Residencial Flamboyant, Jataí, Goiás, Brasil.

Moisés Barbosa Borges (eng.moisesbborges@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 775, Residencial Flamboyant, Jataí, Goiás, Brasil.

Victor Ferreira Santos (victorfer_agri@outlook.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 775, Residencial Flamboyant, Jataí, Goiás, Brasil.

Caroline Duarte Alves Gentil (Caroline.gentil@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 775, Residencial Flamboyant, Jataí, Goiás, Brasil.

CARACTERIZAÇÃO DO USO CICLOVIÁRIO DA CIDADE DE MARINGÁ/PR

Marinna Carneiro Cunningham, Jan Lincoln Lugli, Igor José Botelho Valques, Thiago Botion Neri
Universidade Estadual de Maringá

RESUMO
O artigo realiza um estudo sobre o uso cicloviário da cidade de Maringá/PR para caracterizar o perfil da micromobilidade da cidade. A metodologia adotada inclui a análise dos dados provenientes da Pesquisa Origem e Destino do Plano de Mobilidade de Maringá, aliada a aplicação de técnicas estatísticas e análises gráficas. O objetivo principal é analisar perfis, características socioeconômicas, dados de viagem e a distribuição da malha cicloviária. A análise dos resultados mostrou que a bicicleta em Maringá não é apenas uma opção, mas uma solução de transporte viável e necessária para a população trabalhadora, que enfrenta diariamente os desafios de uma infraestrutura urbana nem sempre adequada. O estudo pretende contribuir para o entendimento dos padrões de micromobilidade em Maringá, visando promover deslocamentos mais seguros e eficientes.

1. INTRODUÇÃO

Os espaços urbanos são ambientes complexos que desempenham um papel fundamental no desenvolvimento da vida social, econômica e cultural. No entanto, o planejamento urbano do século XX foi dominado por um paradigma focado no transporte motorizado individual, priorizando soluções para o número crescente de veículos. Essa abordagem negligenciou sistematicamente os modos de transporte ativos. Neste cenário, insere-se a difícil realidade da micromobilidade — abordagem que se refere a deslocamentos de bicicletas, patinetes, skates e outros meios de transporte de baixa velocidade, elétricos ou não.

A hegemonia do automóvel resultou na queda da qualidade de vida urbana, no aumento de problemas de tráfego e em conflitos entre usuários (Neri, 2016). Em oposição direta a esse modelo, emerge o conceito de mobilidade urbana sustentável, que busca reequilibrar a distribuição do espaço viário, priorizando o transporte ativo e coletivo. A micromobilidade é vista como peça-chave nessa transição, especialmente para solucionar o "problema da última milha" (o trecho final do deslocamento) e reduzir a dependência do carro em curtas distâncias. Contudo, como aponta Magalhães (2004), a falta de estrutura adequada influencia diretamente o comportamento dos usuários, pois o desenho urbano hostil desestimula a escolha desses modos.

Segundo o Denatran (2010), ciclista é a pessoa responsável pela direção de bicicletas. Este usuário do transporte encontra todos os dias inúmeras dificuldades para a circulação no ambiente urbano, tais como: falta de infraestrutura de ciclovias, bicicletários e paraciclos, desconhecimento das leis de trânsito (não somente por parte dos usuários de ciclos, mas também dos motoristas), inexistência de fiscalização e ausência de planos de transporte cicloviário. Esses fatores criam uma condição de vulnerabilidade que não é inerente à bicicleta, mas sim produzida pela infraestrutura inadequada e pela assimetria de poder no trânsito.

Maringá é uma cidade planejada localizada no norte do Paraná. O município possui uma área territorial de 487,9 km² e 409.657 habitantes, de acordo com o Censo de 2022 (IBGE). A cidade se destaca pela qualidade de vida e é considerada uma das mais arborizadas e limpas do país. Segundo o PlanMob (Maringá, 2022), 6% das viagens do município são geradas por bicicletas, o que representa três vezes a média nacional. Apesar disso, pouco se sabe sobre de que forma os padrões de viagem podem influenciar o uso da bicicleta como modo de transporte.

Dessa forma, mapear o perfil dos ciclistas e seus padrões de viagem em Maringá se torna essencial para fundamentar políticas públicas de mobilidade sustentável. Estudos recentes demonstram que a micromobilidade amplia de forma substantiva a acessibilidade às estações de média e alta capacidade, aumentando o contingente de pessoas a distância pedalável e favorecendo a integração com o transporte público (Nicola, 2024). Além disso, quando substitui deslocamentos curtos que seriam realizados por automóvel, tende a reduzir emissões de gases de efeito estufa. Em paralelo, os dados de crescimento da micromobilidade no sul global evidenciam uma demanda reprimida por infraestrutura adequada e integração entre modos (Tembici, 2022).

Para este estudo, parte-se da hipótese de que os deslocamentos de bicicleta em Maringá concentram-se em rotas curtas e em áreas com melhor infraestrutura cicloviária, e que usuários com renda mais baixa e idade

jovem dependem mais da bicicleta para deslocamentos cotidianos, enquanto fatores como falta de infraestrutura segura, inexistência de bicicletários e interação deficiente com o transporte coletivo limitam a adoção do modo.

Ao caracterizar os usuários e analisar os dados da Pesquisa Origem e Destino, o estudo pretende contribuir para a análise do perfil desses usuários, com o objetivo de propor melhorias para esse tipo de transporte, contribuindo diretamente para a qualidade de vida da população. Com base nisso, o objetivo do estudo foi caracterizar os usuários das ciclovias da cidade de Maringá/PR.

2. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, este estudo fundamenta-se em uma abordagem técnica e quantitativa, que consiste na análise de dados secundários para a compreensão dos padrões de deslocamento.

2.1. Fonte de Dados

A fonte para esta pesquisa é a base de dados da Pesquisa Origem e Destino (OD), realizada como parte do Plano de Mobilidade Urbana (PlanMob) de Maringá. Os dados foram obtidos através do Portal da Mobilidade Urbana do município, que disponibiliza publicamente as informações coletadas.

O estudo concentra-se exclusivamente nas viagens realizadas pelo modal "bicicleta", uma vez que não havia, na pesquisa original, dados consolidados para outros meios de micromobilidade, como patinetes e skates. A partir dos dados, utilizando o fator de expansão fornecido pela pesquisa, estima-se que são realizadas 52.998,28 viagens de bicicleta por dia em Maringá, de um total de 795.762,68 viagens diárias na cidade.

2.2. Variáveis Analisadas

A seleção das variáveis foi feita a partir de que um planejamento cicloviário eficiente depende fundamentalmente do conhecimento sobre o perfil e as necessidades dos seus usuários. Dessa forma, foram analisados os seguintes grupos de variáveis:

- Dados da Viagem: Origem e Destino dos deslocamentos e tempo de viagem.
- Perfil Socioeconômico: Renda familiar mensal dos ciclistas.
- Perfil Demográfico: Faixa etária dos usuários.

2.3. Procedimentos de Análise

O tratamento dos dados iniciou-se com a retirada e análise dos dados da base de dados da Pesquisa OD, isolando todas as entradas correspondentes às viagens por bicicleta. Em seguida, os dados referentes às variáveis selecionadas foram tabulados e processados em planilhas.

Para a apresentação dos resultados, foram elaborados gráficos que sintetizam as informações, permitindo uma visualização clara e a identificação de padrões de usuários. Esta análise descritiva e gráfica visa traduzir os dados quantitativos em informações estratégicas que possam subsidiar futuras tomadas de decisão no planejamento da micromobilidade de Maringá.

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da análise dos dados da Pesquisa Origem e Destino do Plano de Mobilidade de Maringá. A análise foca em quatro variáveis principais para caracterizar o perfil do ciclista na cidade: origem e destino das viagens, renda mensal e faixa etária dos usuários.

A análise dos dados de origem e destino revela um padrão claro de utilização da bicicleta como meio de transporte para atividades cotidianas e essenciais. Praticamente metade (48,5%) de todas as viagens de bicicleta se iniciam ou finalizam em "Casa". O "Trabalho" é o segundo ponto mais relevante, com 29,8% das viagens, seguido pela "Escola", com 15,6%. Juntas, essas três categorias representam 93,9% das origens, indicando que a bicicleta é fundamentalmente um modal de transporte para o dia a dia e não primariamente para o lazer. Isso

é mostrado na Figura 1.

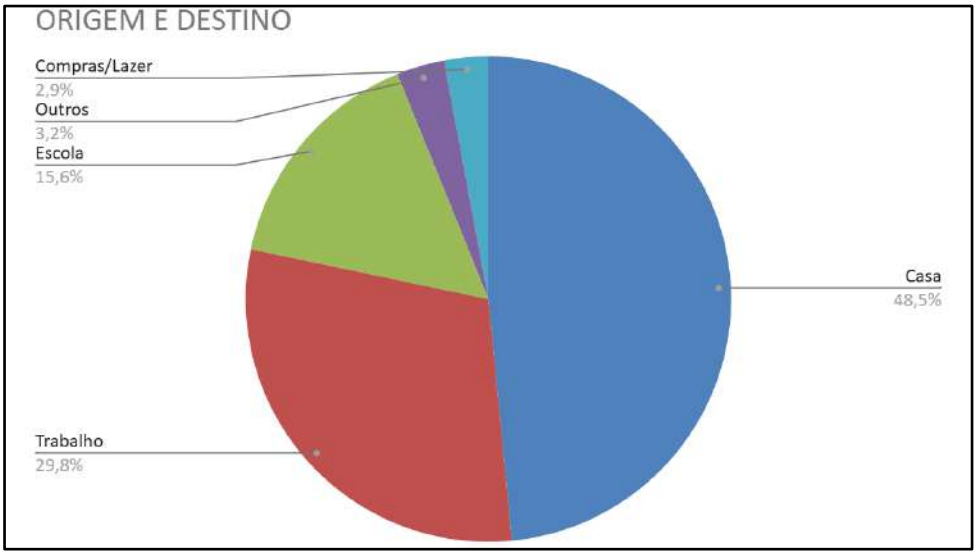


Figura 1: Relação entre as variáveis origem e destino

A maioria das viagens são de menor duração. As viagens de 0 a 15 minutos se destacam significativamente, correspondendo a 59,98% do total, o que indica que a maioria dos fatores está associada a viagens mais curtas. Em seguida, o grupo de 16 a 30 minutos representa 29,19%, mantendo uma parcela considerável. A partir disso, observa-se uma queda acentuada: as viagens de 31 a 45 minutos respondem por 6%, as de 46 a 60 minutos por 3,12%, e as viagens com mais de 60 minutos representam a menor fatia, com apenas 1,71% do total. Isso é evidenciado na Figura 2: o eixo x apresenta as classes de duração do deslocamento e o eixo y indica a participação relativa (%) das viagens de bicicleta em cada classe.

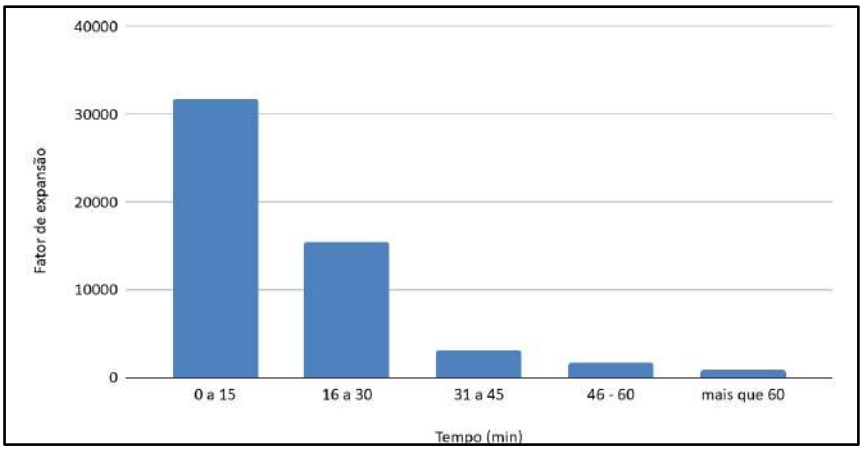


Figura 2: Tempo das viagens de bicicleta

As características socioeconômicas e de faixa etária dos ciclistas fornecem informações cruciais sobre quem depende deste modal de transporte. O uso da bicicleta em Maringá está fortemente concentrado nas faixas de menor renda. A maior parcela dos ciclistas, com 45% do total, possui uma renda mensal de até 2 salários mínimos. Somados, os usuários com renda de até 4 salários mínimos representam a maioria dos ciclistas, com 44.698 das viagens diárias, representando 40%. Usuários com renda de 4 a 10 salários mínimos também possuem um valor importante, de 12% do total. O uso da bicicleta diminui à medida que a renda aumenta, sugerindo que, para uma parcela significativa da população, a bicicleta é uma necessidade econômica além de uma escolha de transporte. Isso é evidenciado na Figura 3: o eixo x reúne as faixas de renda familiar mensal dos ciclistas, expressas em salários mínimos, enquanto o eixo y mostra a participação relativa (%) correspondente a cada faixa.

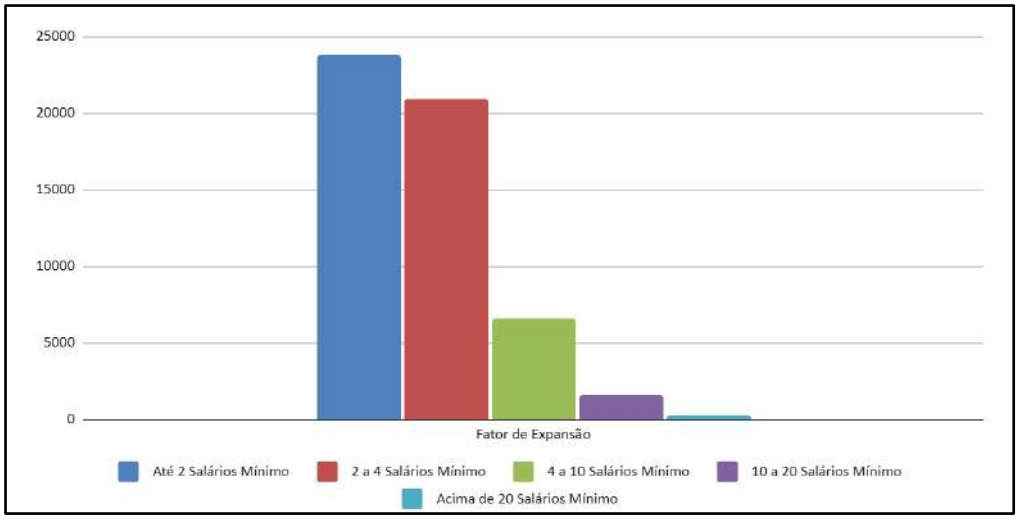


Figura 3: Análise da renda dos usuários de bicicleta

A análise da idade dos usuários mostra que a bicicleta é utilizada por todas as idades, mas com uma grande concentração na população economicamente ativa. O grupo de "20 a 59 anos" responde por 68% das viagens diárias. Há também uma participação relevante de adolescentes ("15 a 19 anos") com 11% e idosos ("acima de 60 anos") também com 11%, o que demonstra a versatilidade da bicicleta como meio de transporte intergeracional na cidade. Isso é mostrado na Figura 4.

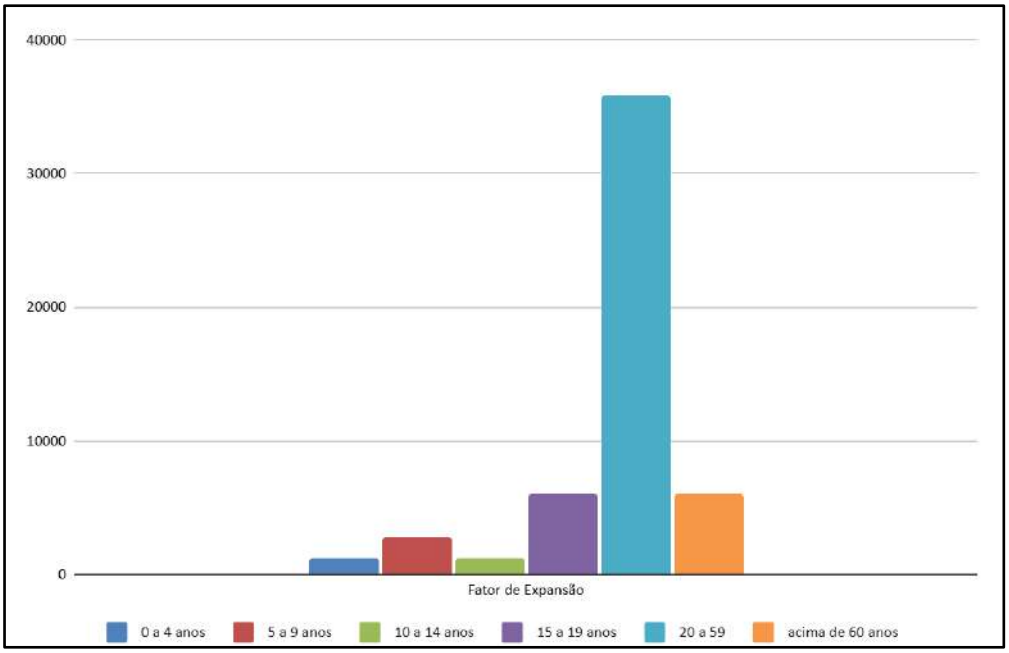


Figura 4: Faixa etária dos ciclistas

Assim, com a análise dos dados é possível identificar que a bicicleta se destaca como um meio de transporte funcional para o dia a dia, utilizado principalmente para deslocamentos entre casa, trabalho e escola. As viagens são majoritariamente curtas, com a maioria durando menos de meia hora. O uso é mais concentrado nas faixas de menor renda, sugerindo que a bicicleta é uma necessidade econômica para uma parcela considerável da população. Além disso, embora seja utilizada por diversas faixas etárias, a bicicleta é o modal predominante para a população economicamente ativa, com participação relevante também de adolescentes e idosos.

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo caracterizar o perfil de uso da bicicleta na cidade de Maringá/PR, utilizando

os dados da Pesquisa Origem e Destino do Plano de Mobilidade Urbana. Os resultados demonstram que a bicicleta desempenha um papel fundamental na micromobilidade da cidade, sendo responsável por 6% de todas as viagens, um índice três vezes superior à média nacional. A análise dos dados revelou um perfil de uso predominantemente utilitário. A bicicleta é o modal escolhido principalmente para os deslocamentos pendulares entre "Casa", "Trabalho" e "Escola", sendo que a maioria das viagens são de curta duração, em média de 15 minutos. Isso desconstrói a imagem da bicicleta como um veículo apenas para lazer e a posiciona como uma ferramenta de transporte essencial para o funcionamento da vida cotidiana de milhares de maringaenses.

O perfil socioeconômico dos ciclistas reforça essa conclusão. A maioria dos usuários pertence às faixas de renda mais baixas, com até 4 salários mínimos, e está na faixa etária economicamente ativa (20 a 59 anos). Fica evidente que a bicicleta em Maringá não é apenas uma opção, mas uma solução de transporte viável e necessária para a população trabalhadora, que enfrenta diariamente os desafios de uma infraestrutura urbana nem sempre adequada.

Cabe pontuar, para fins de transparência metodológica, que o estudo se limita à análise dos dados secundários da Pesquisa O/D. Limitações inerentes a essa fonte, como a temporalidade específica da coleta e a ênfase em dados quantitativos, significam que percepções subjetivas dos ciclistas, como a sensação de segurança, motivações detalhadas ou barreiras específicas de infraestrutura, não foram aqui aprofundadas. Pesquisas futuras poderiam suprir essa lacuna através de abordagens qualitativas (como entrevistas e grupos focais) e análises espaciais que cruzem as rotas identificadas com a malha cicloviária existente, de 45km.

Portanto, os dados apresentados fornecem um grande subsídio técnico para o poder público. Investir em infraestrutura cicloviária, como ciclovias seguras e conectadas, bem como bicicletários, não é apenas uma política de mobilidade sustentável, mas também uma ação de inclusão social. As políticas públicas devem focar na criação de rotas seguras que conectem as áreas residenciais aos principais polos de trabalho e educação, garantindo deslocamentos mais seguros e eficientes para a significativa parcela da população que depende da bicicleta. O estudo contribui, assim, para o planejamento de uma Maringá que valorize e proteja seus ciclistas, melhorando a qualidade de vida urbana para todos.

FINANCIAMENTO
Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da Bolsa de Mestrado – GM (processo nº 130512/2025-7) concedida a Jan Lincoln Lugli.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito. (2010) *Instrução Básica de Estatística de Trânsito.*

Magalhães, M. T. Q.; Rios, M. F. e Yamashita, Y. (2004) Identificação de Padrões de Posicionamento Determinantes do Comportamento dos Pedestres. *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v. 1, p. 999–1010.

Neri, T. B.; Barbosa, A. N. P.; Chiroli, D. M. G.; Teixeira, T. M. e SIMOES, F. A. (2010) Pesquisa sobre Comportamento de Pedestres e Ciclistas em Trecho de Via na Cidade de Maringá. *Anais do 4º Congresso Luso-brasileiro para Planejamento Urbano*, Regional, Integrado, Sustentável, Faro, Portugal.

Neri, T. B.; Bordim Filho, S. H. e Savi, E. (2016) A Pesquisa com Ciclistas como Suporte para o Planejamento Cicloviário: estudo em Maringá/PR, Brasil. *Anais do 7º Congresso Luso Brasileiro para Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, Maceió/AL*, p. 1-12.

Nicola, L. (2024) Micromobilidade como alternativa para cidades sustentáveis. *Mobilidade Estadão*. Disponível em: https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/micromobilidade-para-cidades-sustentaveis/

Prefeitura de Maringá. (2022) *PlanMob Maringá.* Disponível em: https://www3.maringa.pr.gov.br/semob/planmob/consolidado.

Tembici. (2022) Micromobilidade no sul global. *Mobilize Brasil*. Disponível em: https://www.mobilize.org.br/estudos/483/micromobilidade-no-sul-global.html

Marinna Carneiro Cunningham (pg406347@uem.br)
Jan Lincoln Lugli (pg406344@uem.br)
Igor José Botelho Valques (ijbvalques@uem.br)
Thiago Botion Neri (tbneri2@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Av. Colombo 5790, Zona 7, Maringá/PR, Brasil.

CLASSIFICAÇÃO DE HIERARQUIAS VIÁRIAS METROPOLITANAS: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA

Helena Pauline Schulze Rotta[1], **Nathaly Louise Zalkoski**[2], **Alceu Dal Bosco Junior**[1], **Gustavo Taniguchi**[1, 2]
[1]URBTEC™ – Engenharia, Planejamento e Consultoria, [2]Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR

RESUMO
Sistemas Viários Metropolitanos (SVMs) carecem de uma metodologia de identificação e hierarquização viária, considerando a sobreposição de funções que uma mesma via, nessa escala, pode assumir. Este artigo, portanto, apresenta um método para classificação hierárquica de vias, aplicado à Região Metropolitana de Curitiba (RMC). Com abordagem multicritério, foram comparadas 10 variáveis derivadas da macrossimulação de tráfego e de informações geográficas da região, visando categorizar mais de 4 mil quilômetros de arcos em quatro níveis funcionais: Expressa, Integração, Ligação e Acesso. Os resultados indicaram altas correlações entre classes específicas, demonstrando a sobreposição funcional de trechos viários. Após, foram definidas notas de corte para seleção inicial das vias, que foram refinadas a partir da análise da equipe gestora do SVM da RMC. Observou-se a persistência das vias preliminares às alterações (ex.: 94,7% das Vias Expressas) no produto final, reforçando a efetividade da metodologia e sua possibilidade de aplicação em processos similares.

1. INTRODUÇÃO

A hierarquização do sistema viário é fundamental no planejamento de transportes ao estabelecer funções prioritárias para os diferentes trechos que compõem a malha viária, organizando-os de maneira coerente e eficiente. Busca-se garantir a adequada distribuição dos fluxos de tráfego, considerando aspectos como segurança viária, fluidez operacional, conforto, acessibilidade e integração modal (Pietrantonio, 2004). Por ser tecnicamente inviável atribuir todas as funções a um mesmo segmento viário sem comprometer seu desempenho e gerar conflitos de uso, faz-se necessária a diferenciação conforme os objetivos de mobilidade e do território.

Nesse contexto, é comum a aplicação de padrões e critérios oficiais por instrumentos normativos, a exemplo da *Federal Highway Administration* (FHWA, 2023) e do Código de Trânsito Brasileiro (CTB) (Brasil, 1997). Ambas as fontes citadas focam, principalmente, em mobilidade e acesso, onde vias de maior hierarquia priorizam a mobilidade – em termos de velocidade de deslocamento e poucas possibilidades de interferência no tráfego –, enquanto que de menor ordem favorecem o acesso – permitindo maior quantidade de oportunidades de entrada e saída da malha. As definições visam não apenas oficializar a função atual que as vias desempenham, como também auxiliar investimentos e intervenções, inclusive em trechos ainda não implantados.

A diferenciação entre mobilidade e acesso é mais clara entre hierarquias opostas, não obstante, o sistema viário necessita de classificações intermediárias, as quais, por desempenharem funções semelhantes, resultam em decisões subjetivas de hierarquização. Como alternativa à parcialidade, muitos estudos apresentam critérios auxiliares relacionados à topologia da rede (Ye, Wu e Rong, 2015), performance e segurança (Gianfranco *et al*., 2023), por exemplo. Nesse sentido, Sekihara *et al*. (2024) propõe um método de avaliação do nível hierárquico de vias, aplicando-o nas regiões de Gifu e Shizuoka, no Japão. Os autores buscam avaliar o grau de hierarquia das vias com base na distância das viagens realizadas e taxa de uso das infraestruturas, além de observar funções regionais dos elementos da rede, o que demonstra a possibilidade de sobreposições funcionais de uma mesma via.

Tal sobreposição é bastante relevante no contexto brasileiro, visto que em Regiões Metropolitanas (RMs) a hierarquização viária regional assume papel estratégico e de justaposição às demais escalas, principalmente a municipal. As vias desempenham a integração regional, articulando deslocamentos de longa distância, viagens pendulares e fluxos logísticos de abastecimento urbano. O sistema viário metropolitano (SVM) é, portanto, uma função pública de interesse comum com pouca padronização quanto às determinações metodológicas no contexto brasileiro.

Assim, o objetivo deste artigo é propor um método de classificação auxiliar para sistemas viários metropolitanos. Para tanto, é realizada sua aplicação nos mais de 4 mil km de arcos da Região Metropolitana

de Curitiba (RMC), no contexto de revisão do SVM para seu Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (PDUI). Além da definição prévia das hierarquias a serem obtidas, a aplicação utiliza uma metodologia multicritério que leva em consideração a avaliação de técnicos responsáveis pela gestão do sistema, incorporando a importância que a equipe da Câmara Técnica do Sistema Viário Metropolitano (CTSVM) dá a cada critério.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em três etapas principais: definição conceitual das classes viárias metropolitanas, aplicação de método multicritério para classificação automatizada dos trechos e validação técnica com refinamentos empíricos. Cabe destacar que a seleção dos critérios quantitativos adotados se baseou em informações de volumes e trajetos resultantes do macromodelo de tráfego da Região Metropolitana, com uso do *software* PTV Visum. A modelagem foi realizada durante a fase de diagnóstico do PDUI, cuja metodologia e resultados podem ser verificados em produto específico (AMEP, 2024), e calibrada para os fluxos viários em toda a RMC, conferindo robustez à avaliação comparativa dos diferentes segmentos viários e à aplicação do método multicritério proposto. O presente trabalho, portanto, limita-se à aplicação do método de classificação das vias, mas reforça a importância dos dados basais utilizados nas variáveis.

2.1. Definição Conceitual das Classes Viárias

Inicialmente, as classes viárias foram organizadas em quatro categorias, adaptadas a partir do documento da então COMEC[1] (2000), de modo a refletir as funções predominantes no contexto metropolitano. As Vias Expressas foram definidas como aquelas destinadas a deslocamentos externos-externos, externos-internos e internos-externos, priorizando fluidez inter-regional, sendo sua implantação não desejável em áreas urbanas densas devido aos impactos sobre a permeabilidade viária local. As Vias de Integração, de conexão às zonas externas, municípios periféricos e ao Núcleo Urbano Central, viabilizando viagens de longa distância intra e intermetropolitanas. Por sua vez, as Vias de Ligação devem articular deslocamentos metropolitanos cotidianos de média distância entre municípios vizinhos, enquanto que as Vias de Acesso se traduziram em trechos responsáveis pela distribuição final dos fluxos em cada município, conectando as demais classes aos destinos locais, especialmente equipamentos de importância metropolitana.

Para cada classe, foram definidas especificidades físicas e operacionais voltadas ao tratamento viário, como velocidade, tipo de parada de ônibus, interseções permitidas etc. Tais especificações, no entanto, não foram tratadas como critérios de definição funcional, mas sim como características finais de adequação. Portanto, uma vez consolidadas as hierarquias desejadas, é necessário obter os critérios mais importantes para diferenciá-las.

2.2. Aplicação do Método Multicritério

Os critérios de avaliação definidos para classificação dos trechos viários são apresentados na Tabela 1, obtidos a partir dos resultados da macrossimulação do tráfego da RMC, mencionada anteriormente, e do uso de ferramentas SIG. A unidade de obtenção das variáveis, que representam os critérios é o conjunto de trechos viários de mesmo nome para um mesmo município. Como a rede viária é representada por um grafo direcional, em que os arcos representam trechos viários entre interseções, as variáveis e os resultados finais são representativos de vários arcos. Todos os critérios com variáveis contínuas foram normalizados entre zero e um, garantindo comparabilidade entre diferentes escalas de medição; e as variáveis *dummy*, como a presença de linhas de transporte coletivo, foram valoradas com padrões binários de zero ou um.

A aplicação se deu em oficinas técnicas conduzidas em 2025 entre a equipe do Consórcio PDUI-RMC Sustentável, com três representantes – dois engenheiros civis e um arquiteto e urbanista – e da AMEP e CTSVM, composta por cinco representantes – três arquitetos e urbanistas, um engenheiro civil e um comunicador social. Os técnicos da AMEP, além de suas formações garantem a incorporação da gestão cotidiana do Sistema Viário Metropolitano.

Os critérios são, então, submetidos ao método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1980), para definição dos pesos representativos de sua importância em cada classe viária. O método

[1] Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba.

AHP estrutura problemas complexos de maneira graduada, e permite comparações paritárias entre critérios que auxiliam na decisão, considerando sua robustez para decisões técnicas que predispõem de arcabouço empírico. A escolha desse método se fundamentou na experiência prévia das equipes técnicas envolvidas no estudo, e na viabilidade de sua operacionalização frente a métodos alternativos. Assim, em um primeiro momento, foi realizada a estruturação conceitual das classes hierárquicas e dos critérios avaliativos. Em seguida, procedeu-se à comparação par a par dos critérios por classe viária, utilizando a escala semântica que varia de 1/9 para quando o primeiro critério é muito menos importante do que o segundo, à 9 para quando é muito mais importante.

Após a comparação paritária, foram calculados os pesos relativos por meio da soma das colunas da matriz de comparação e normalizados os elementos, finalizando com a média por linha. A aplicação seguiu com a verificação de consistência das matrizes utilizando o índice de consistência (RC), sendo aceitas apenas aquelas com valores inferiores a 0,10, conforme o parâmetro de Saaty (1980). Somente quando garantida a densidade das respostas, os pesos finais apresentados na Tabela 1 foram aplicadas aos valores normalizados das variáveis para cada trecho viário, gerando a nota final por hierarquia e via. Destaca-se que os sinais negativos ou positivos dos critérios variam para cada classe viária, de acordo com o entendimento da equipe técnica para o tipo de impacto que o critério deve ter para dada classificação.

2.3. Definição das notas de corte e refinamento

Uma vez definidos os pesos para os critérios e as notas finais para cada via e classe hierárquica – por meio da soma dos pesos multiplicados pelas variáveis –, o processo de definição da hierarquia final das vias é realizado seguindo os passos: (i) seleciona-se as vias com as maiores notas para a classe Expressa, até uma nota de corte a ser definida; (ii) para as vias não selecionadas como Expressas, efetua-se o mesmo processo para a de Integração, com outra nota de corte; (iii) para as vias ainda não selecionadas, repete-se para a classe de Ligação, até a nota de corte dessa classificação; e (iv) o mesmo processo é realizado para as Vias de Acesso. As notas mínimas de corte para cada classe foram definidas com base na similaridade ao sistema viário vigente (COMEC, 2000), com vistas a contemplar seu histórico institucional.

Por fim, realizou-se a validação técnica dos resultados quantitativos com revisões qualitativas da equipe da Câmara Técnica. Verificou-se a coerência funcional dos trechos classificados, com ajustes de trechos isolados e descontínuos e inclusão de vias estratégicas planejadas. Esse refinamento parte do pressuposto de que a concepção de um SVM, cuja responsabilidade é da governança metropolitana, não é realizada somente a partir de critérios quantitativos, mas também de decisões empíricas. Portanto, apesar de haver subjetividade na seleção das notas de corte e no refinamento, permite-se o manejo dos resultados numéricos para uma discussão embasada com os tomadores de decisão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os pesos definidos pela aplicação do método AHP demonstram a importância relativa dada a cada critério (Tabela 1). Nota-se preponderância nos critérios que qualificam as viagens, como esperado para uma avaliação de função das vias. A conexão e o deslocamento receberam pesos altos em todas as classes viárias, com destaque também para a extensão das rotas. A extensão da via, no entanto, não se mostrou relevante, assim como às questões relacionadas ao uso do solo (trecho rural, trecho urbano fora do NUC e trecho urbano no NUC), com ênfase apenas para trechos urbanos no NUC nas hierarquias de Ligação e Acesso, dada a necessidade de conexão de áreas conurbadas.

A densidade de acessos por quilômetro foi mais relevante para vias Expressas, priorizando aquelas com menor interferência. Por fim, o volume motorizado não se mostrou tão relevante, indicando que a quantidade de veículos não é tão importante quanto a qualificação das viagens realizadas, corroborando estudos que se baseiam na topologia para as classificações (Ye, Wu e Rong, 2015; Sekihara *et al*., 2024).

É interessante observar que a similaridade entre pesos de algumas das hierarquias pode levar a notas finais semelhantes. A Figura 1 demonstra o resultado de correlação de Spearman (s) entre as notas obtidas para cada classe viária, onde é possível notar alta correlação das hierarquias Ligação e Acesso, indicando sobreposição das funções ou demonstrando que divisão classificatória não se justificaria. Similarmente, as hierarquias Expressa e Integração apresentaram correlações altas, mas com distinção mais aparente. As baixas correlações

apontam distinção clara entre as hierarquias mais relacionadas à mobilidade (Expressa e Integração) e as mais relacionadas à acessibilidade (Ligação e Acesso), conforme critérios convencionais (Brasil, 1997; FHWA, 2023).

Por meio da Figura 1 também se observa a distribuição das classes, revelando coerência com os princípios teóricos de hierarquização viária. As Vias Expressas apresentaram menor número de elementos com notas altas, o que reflete seu caráter seletivo e restrito a funções de escoamento de tráfego de longa distância e integração inter-regional. As Vias de Integração apresentaram distribuição semelhante, abrangendo trechos que conectam zonas externas, municípios periféricos e o Núcleo Urbano Central. Já as Vias de Ligação concentram-se em notas mais elevadas, demonstrando que grande parte das vias estariam possivelmente operando com essa função. E isso se pronuncia mais para as Vias de Acesso, refletindo a função de maior capilaridade, consistente com seu papel de viabilizar deslocamentos metropolitanos de menor distância, articulando municípios vizinhos ou conexões finais.

Tabela 1: Critérios e pesos estabelecidos para a HVM da RMC.

Critério	**Descrição**	**Classe Viária**			
		Expressa	**Integração**	**Ligação**	**Acesso**
Acessos por km	Densidade de acessos da via	-0,122	-0,088	0,079	0,094
Conexões	Número total de municípios conectados pelas viagens na via	0,159	0,194	0,207	0,204
Deslocamento (*dummy*)	Indica passagem de viagens com destino ou origem em zonas externas à RMC	0,220	0,250	-0,120	-0,138
Extensão	Comprimento em metros da via, por município	0,087	0,057	0,076	0,035
Extensão das rotas	Extensão média, em km, das rotas que passam pela via	0,157	0,125	0,077	0,103
Linhas do TPC (*dummy*)	Indica passagem de linhas de TPC	-0,090	0,055	0,134	0,085
Trecho rural	Porcentagem da via que se encontra em área rural	0,050	0,038	-0,074	-0,094
Trecho urbano fora do NUC	Porcentagem da via que se encontra em área urbana, exceto NUC	-0,020	-0,070	0,037	0,058
Trecho urbano no NUC	Porcentagem da via que se encontra na área conurbada no NUC	-0,019	-0,063	0,125	0,126
Volume motorizado	Carregamento da via em unidade de veículos de passeio	0,076	0,060	0,071	0,062

Para a última etapa, portanto, as notas mínimas estabelecidas foram: 0,78 para Vias Expressas, 0,80 para Vias de Integração, 0,81 para Vias de Ligação e 0,80 para Vias de Acesso. A partir das vias selecionadas foi conduzido o processo de refinamento juntamente à equipe da CTSVM, incorporando trechos estratégicos que, embora não classificados pela etapa automatizada, apresentavam importância política para a continuidade do SVM. Não obstante, a seleção atual automatizada demonstra persistência mesmo após refinamento, 94,7% da extensão de Vias Expressas selecionada apenas com a nota de corte se manteve após alterações. As porcentagens para as Vias de Integração, Vias de Ligação e Vias de Acesso foram 17,7%, 26,6% e 6,5%, respectivamente.

Destaca-se que muitas Vias de Integração são coincidentes com rodovias estaduais e federais, que por motivos de jurisdição, a equipe multidisciplinar optou por mantê-las como Vias Expressas. Porém, os resultados explicitaram os trechos que apresentam funções mais relacionadas às dinâmicas metropolitanas, o que irá auxiliar em tratamentos viários. As Vias de Acesso apresentaram a pior porcentagem de persistência, devido, principalmente, a adequações posteriores nas definições teóricas da classe viária. Ademais, muitas modificações ocorreram a partir da complementação de diretrizes viárias ainda não implantadas, indicando que o método pode se beneficiar da incorporação desses trechos nas etapas iniciais.

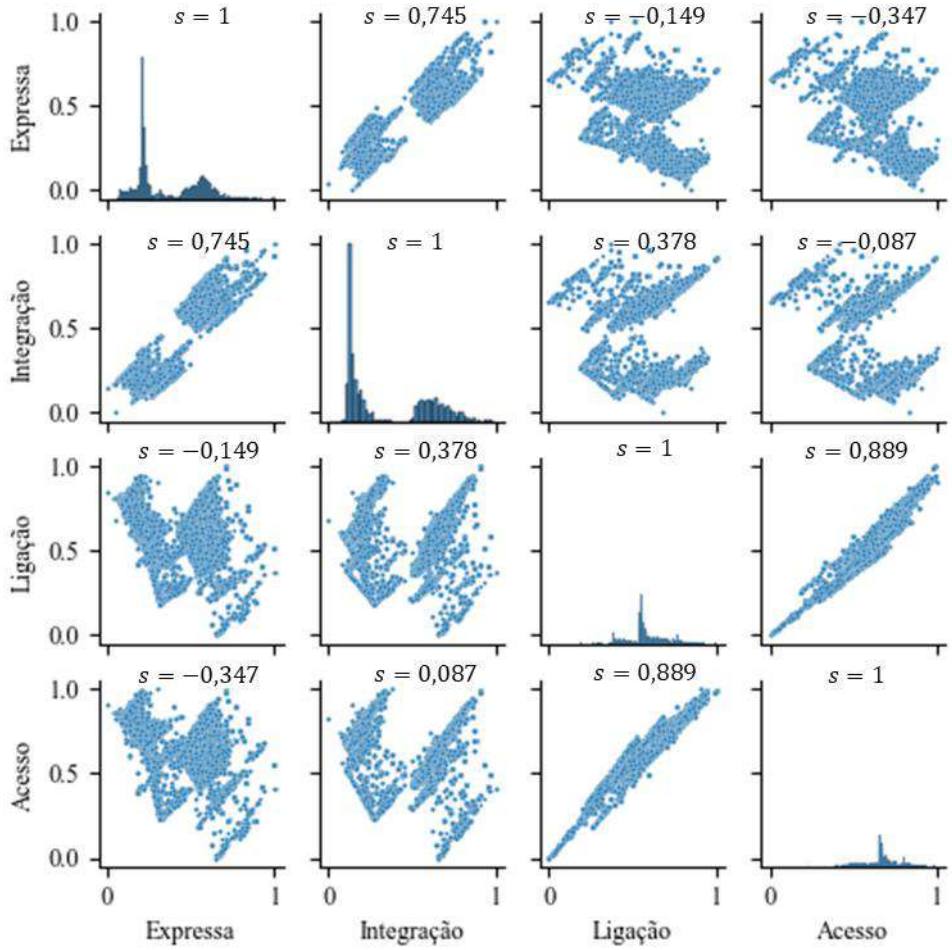


Figura 1: Distribuições e correlação entre as notas das classes hierárquicas (correlações significativas com p<0,00).

4. CONCLUSÕES

O método aplicado permite a sistematização da definição das classes viárias metropolitanas, reduzindo a subjetividade do processo decisório e garantindo coerência técnica. Os resultados permitiram a diferenciação das funções viárias e indicaram os critérios mais relevantes para cada hierarquia, subsidiando debates multidisciplinares. O método proposto incorpora o conhecimento técnico dos órgãos gestores para planejamento viário integrado e a informações fundamentadas para a tomada de decisão.

Destaca-se a possibilidade de replicação da metodologia em outras regiões metropolitanas brasileiras, dada sua flexibilidade de adaptação de critérios e pesos, bem como sua fundamentação consolidada na literatura de apoio multicritério à decisão. Entre as limitações identificadas, contudo, ressalta-se a dependência de bases de dados atualizadas e completas, sobretudo informações sobre volumes de tráfego e origem e destino, bem como a necessidade de validação qualitativa final para ajustes pontuais decorrentes de especificidades territoriais não capturadas pela etapa de notas de corte. Não obstante, muitas das adequações realizadas posteriormente foram motivadas ou auxiliadas pelos resultados numéricos, reiterando que o processo acelerou as discussões e decisões para o estabelecimento de um SVM. Para avanços futuros, recomenda-se a comparação dos resultados com modelos operacionais de tráfego aos critérios topológicos, a fim de identificar relações que reduzam a necessidade de modelos de macrossimulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência de Assuntos Metropolitanos do Paraná – AMEP (2024) **Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana de Curitiba (PDUI-RMC): Produto 02B — Diagnóstico para Mobilidade Metropolitana da RMC**. Curitiba, Brasil.

Brasil. (1997) Lei Federal n°. 9.503, de 23 de setembro de 1997. *Institui o Código de Trânsito Brasileiro*. Brasília.

Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba — COMEC. (2000) *Diretrizes de gestão para o sistema viário metropolitano*. Curitiba. Disponível em:

https://www.amep.pr.gov.br/sites/comec/arquivos_restritos/files/documento/2019-11/diretrizessistemaviariometropolitano.pdf. (acesso em 06/07/2025).

Federal Highway Administration – FHWA (2023) Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures. Ed 2023. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/hwy-functional-classification-2023.pdf (acesso em 06/07/2025).

Gianfranco, F. D. Mariangela, S. Patrizia, P. Edoardo, P. Massimiliano (2023) A GIS-supported methodology for the functional classification of road networks, *Transportation Research Procedia*, v. 69, p. 368-375. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.184.

Pietrantonio, H. (2004) Capítulo 2. *Organização do sistema viário*. Disponível em: https://sites.poli.usp.br/d/ptr2377/Cap%C3%ADtulo2a.pdf. (acesso em 06/07/2025)

Saaty, T. L. (1980) The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, v. 41, p. 1073–1076.

Sekihara, T., Y. Kakimoto, H. Nakamura, M. Iryo, X. Zhang (2024) A method for evaluating the functional hierarchy of road networks, *Transport Policy*, v. 155, p. 178-188, 2024.

Ye, P.; W. B. Wu; D. Rong. (2015) A Quantitative Method of Urban Road Hierarchy. *Proceedings of the Fifth International Conference on Transportation Engineering*. p. 2708-2716. DOI: 10.1061/9780784479384.346.

Helena Pauline Schulze Rotta (helena@urbtec.com.br)
URBTEC™ – Engenharia, Planejamento e Consultoria, Av. João Gualberto, 1721, 12º andar – Juvevê, Curitiba – PR, Brasil
Nathaly Louise Zalkoski (nzalkoski@pucpr.edu.br)
PPGTU – Programa de Pós Graduação em Gestão Urbana, Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba – PR, Brasil
Alceu Dal Bosco Junior (alceu@urbtec.com.br)
URBTEC™ – Engenharia, Planejamento e Consultoria, Av. João Gualberto, 1721, 12º andar – Juvevê, Curitiba – PR, Brasil
Gustavo Taniguchi (gustavo@urbtec.com.br)
URBTEC™ – Engenharia, Planejamento e Consultoria, Av. João Gualberto, 1721, 12º andar – Juvevê, Curitiba – PR, Brasil
PPGTU – Programa de Pós Graduação em Gestão Urbana, Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba – PR, Brasil

COMPLEXIDADE DA ACESSIBILIDADE URBANA UTILIZANDO DIMENSÃO FRACTAL SOBRE ISÓCRONAS

Rodrigo de Sousa Pissardini[1], **Rafael Henrique de Oliveira**[2], **Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho**[1]
[1]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [2]Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
A análise da acessibilidade urbana é fundamental para orientar decisões estratégicas nas cidades, com o objetivo de otimizar e qualificar as atividades humanas nelas realizadas. Como o acesso se distribui no espaço-tempo heterogeneamente, este estudo propõe avaliar a irregularidade da acessibilidade pela análise da rugosidade das linhas isócronas de diferentes modos de transportes, utilizando-se o conceito de dimensão fractal. O modelo é aplicado a uma área da cidade de São Paulo, Brasil comparando-se três modos de transportes – a pé, bicicleta e carro – para diferentes intervalos de tempo de percurso. Os resultados demonstram que, enquanto os modos ativos (a pé e bicicleta) geram isócronas mais regulares, porém de menor alcance, o modo carro apresenta maior alcance e irregularidade devido às limitações da malha viária. O uso de dimensão fractal complementa indicadores tradicionais de acessibilidade e auxilia intervenções urbanas que busquem acesso mais equitativo.

1. INTRODUÇÃO

Acessibilidade urbana refere-se à facilidade com a qual pessoas podem chegar a lugares, bens e serviços, sendo influenciada pela forma urbana e pela conectividade dos modos de transporte disponíveis (Rode *et al.*, 2017). É um tema de interesse no planejamento urbano e engenharia de transportes, por impactar fatores como densidade urbana, oferta de serviços, tráfego de veículos, emissão de gases e consumo energético (Śleszyński *et al.*, 2023).

Para transportes rodoviários, a acessibilidade é avaliada sob duas abordagens principais: o acesso aos destinos e a acesso aos sistemas de transportes, ambas mensuradas por índices diversos (Bracarense e Ferreira, 2018). Em geral, a principal métrica para mensurar acessibilidade é o tempo de viagem (Ingram, 1971; Śleszyński *et al.*, 2023), sendo a avaliação das linhas isócronas – delimitação das áreas acessíveis a partir de um ponto de origem em determinado intervalo de tempo – umas das estratégias mais simples e eficazes para descrever a eficiência espaço-temporal de sistemas de transportes (Galton, 1881; Śleszyński *et al.*, 2023).

Em transportes, as isócronas são geralmente associadas a um modo específico, permitindo-se estimar a área total acessível, o número de destinos atingíveis ou a população atendida. Essas representações são disponibilizadas como ferramentas de informação visual (na forma de mapas ou diagramas de isócronas), mas também utilizadas para geração de índices de mobilidade e avaliação de cobertura de serviços, das disparidades no acesso a oportunidades e dos impactos de eventos extremos na rede viária (Aranguren *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2025; Oliveira *et al.*, 2018).

Em abordagens simplificadas, análises de isócronas são baseadas em formas circulares estruturadas no raio de alcance a partir de um determinado ponto de origem (Oliveira *et al.*, 2018). Isócronas teóricas são tipicamente calculadas pelo uso de algoritmos de menor caminho (e.g. Dijkstra, A*), combinados com a geração da envoltória convexa dos pontos de acesso disponíveis. Alternativamente outras técnicas podem utilizar dados reais (e.g. dados de rastreamento como GPS, RFID, celulares) para obter os tempos de viagem para os diferentes pontos da rede (Ma *et al.*, 2025).

A presente pesquisa propõe uma nova métrica de acessibilidade urbana a partir da análise da rugosidade das linhas isócronas (i.e. sua borda) de um determinado modo de transporte para uma região de interesse: enquanto uma linha circular representa acessibilidade uniforme em todas as direções, linhas irregulares evidenciam limitações estruturais como barreiras físicas, malhas viárias irregulares ou baixa conectividade da rede. Neste intuito, propõe-se o uso da dimensão fractal para capturar as nuances estruturais das linhas isócronas. Dimensão fractal é uma medida matemática que descreve o índice de complexidade ou de irregularidade para caracterizar um padrão geométrico. Nesse contexto, para formas geométricas clássicas, os índices estão vinculadas à dimensão euclidiana ou topológica do conjunto, sendo valores inteiros (1- linhas, 2 – superfícies e 3- volumes), enquanto conjuntos fractais extrapolam a dimensão, apresentando índices fracionados (Falconer, 2014; Mandelbrot, 2004).

Para validação do conceito, analisa-se a dimensão fractal da rugosidade de linhas isócronas para três modos de transporte para uma região na cidade de São Paulo, Brasil. Por meio da geração das isócronas espaço-temporais busca-se identificar diferenças na complexidade para cada modo para a compreensão das limitações e potencialidades deste tipo de análise.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Etapas de análise

A presente pesquisa foi sistematizada sob as seguintes etapas:

1. Escolha dos pontos centrais (origens das viagens);
2. Geração das isócronas reais baseadas em modo de deslocamento e tempo de percurso desejado;
3. Aquisição das linhas isócronas (bordas) como vetor ou binário;
4. Cálculo da dimensão fractal da borda:
    a. Análise da relação perímetro/área;
    b. Comparar diferentes tempos de deslocamento.
5. Comparação dos resultados no contexto de acessibilidade urbana.

2.2. Escolha do ponto central (origem das viagem)

Para a presente pesquisa, selecionou-se como ponto de origem a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (São Paulo, SP, Brasil) cujas coordenadas geográficas são 23° 33' 17,42" S e 46° 43' 54,69" W (SIRGAS 2000). A escolha deste ponto de origem justifica-se por ser um ambiente controlado com infraestrutura para diferentes modos de transporte, ativos ou não, e integração urbana consolidada. Ademais, a região conta com ampla disponibilidade pública de dados urbanos e de transporte favorecendo a aplicação, calibração e validação do modelo proposto.

2.3 Cálculo das isócronas

As coordenadas de origem foram utilizadas como referência para a geração de isócronas com intervalos de 15, 30 e 60 minutos, considerando os modos de transportes a pé, bicicleta e carro.

As isócronas foram calculadas a partir da extração de grafos da rede de transporte viário (a pé, de bicicleta e carro) da cidade de São Paulo, Brasil, obtendo-se o tempo de viagem do ponto de origem para todos os vértices da rede, considerando aspectos de velocidade máxima e restrições de transportes (e.g. semáforos, paradas obrigatórias etc.). Os dados utilizados para os grafos foram obtidos das seguintes fontes de dados:

- **OpenRouteService (ORS) (https://openrouteservice.org):** plataforma de dados de rotas de acordo com o modo de transporte escolhido.
- **OpenStreetMap (OSM) (https://www.openstreetmap.org):** plataforma de dados geográficos, utilizados para enriquecimento de dados obtidos do ORS.

A partir da aquisição da rede viária, calcula-se a isócrona pertinente no formato GeoJSON.

2.4 Aquisição das bordas

Para aquisição das bordas das isócronas, o arquivo GeoJSON é carregado e o espaço geográfico é transformado para o sistema de coordenadas da imagem *raster*. A linha isócrona, então, é convertida de vetor (formato geométrico) para uma máscara binária, sobre a qual aplica-se a técnica de erosão binária, utilizando-se o algoritmo XOR para obter a diferença entre a máscara original e a versão erodida.

2.5 Cálculo da dimensão fractal

Para estimar a dimensão fractal aplicou-se o método de contagem de caixa (ou dimensão de Minkowski-Bouligand) sobre a borda obtida. A técnica subdivide o espaço de análise em grades sucessivamente menores, contando-se o número de caixas que interceptam a linha isócrona em cada escala. A dimensão fractal (Df) é calculada de acordo com a Equação (1) (Falconer, 2014):

$$Df = \lim_{\epsilon \to 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)} \quad (1)$$

sendo $N(\epsilon)$ o número de caixas de tamanho ϵ que cubra o conjunto. Aplicando-se a análise para diferentes escalas de tamanho de caixa, obtém-se a inclinação da regressão *log-log* associada à dimensão fractal.

3. ANÁLISE E RESULTADOS

O resultado da análise das dimensões fractais das redes viárias para a Cidade Universitária em diferentes modos para diversas escalas temporais são apresentados na Tabela 1 e Figura 1.

Tabela 1: Dimensão fractal e diâmetro da isócrona por modo de transporte e faixa de intervalo

Sigla	Modo	Faixas de intervalo					
		15 min		30 min		60 min	
		Df	**Diam(m)**	***Df***	**Diam(m)**	***Df***	**Diam(m)**
A	**A pé**	1,2304	2.328,95	1,2374	4.457,81	1,2377	6.750,73
B	**Bicicleta**	1,2391	6.907,34	1,2456	14.563,58	1,2528	22.843,21
C	**Carro**	1,2902	16.040,06	1,3677	48.045,03	1,3990	95.348,33

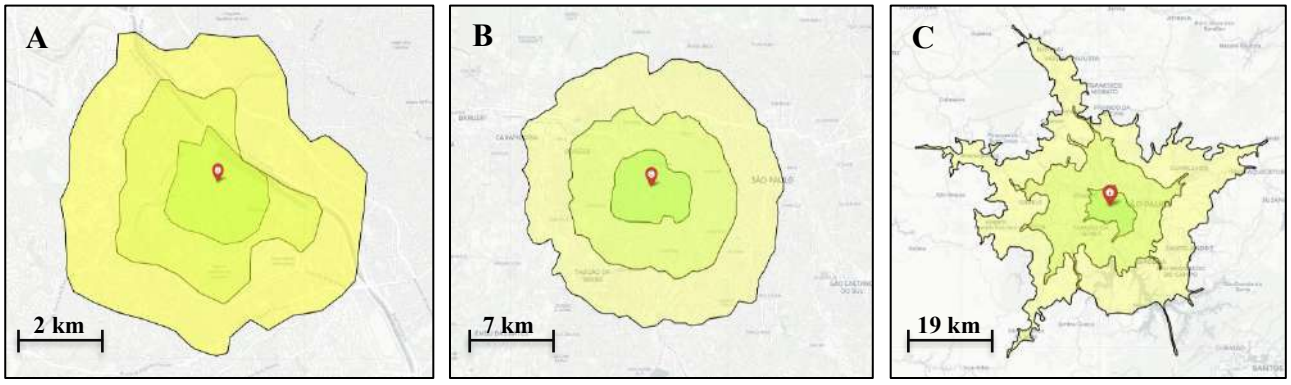


Figura 1: Isócronas para os diferentes modos de um mesmo ponto de origem

A dimensão fractal no contexto proposto é um valor entre 1 e 2 (superfícies 2D): isócronas perfeitas (Df ≈ 1) indicam acessibilidade mais linear e eficiente, alcançando áreas de forma mais uniforme e rápida, enquanto isócronas rugosas (Df > 1) indicam que a forma não se expande uniformemente, tornando-se mais complexa.

Nos cenários de testes, a rede de acessibilidade a pé (Figura 2, associadas às isócronas da Figura 1-A) apresenta pouca variação (entre 1,2304 e 12377) mesmo com o aumento de intervalos de tempo.



Figura 2: Isócronas reais para a região da Cidade Universitária, modo a pé (sem escala)

As isócronas relacionadas ao deslocamento a pé tendem a apresentar geometria mais simples e próxima das isócronas ideais, com alcance reduzido devido às limitações inerentes ao modo. Nos testes realizados, estas limitações são potencializadas pelas variações de elevação e restrições de acesso ao deslocamento a pé que restringem a expansão radial da isócrona. Ainda assim, como a malha acessível a pé é densa e contínua, mesmo com o aumento do tempo de deslocamento, as formas tendem a se manter regulares, crescendo de forma lenta e homogênea.

O uso do modo bicicleta possui, por natureza, acesso a território mais amplo e complexo do que o deslocamento a pé, porém restrito e sensível à disponibilidade da malha cicloviária (Figura 3, associada às isócronas da Figura 1-B). Nos testes realizados, este modo apresenta tendência moderada de crescimento da complexidade conforme o tempo de deslocamento aumenta, de 1,2391 (15 min) a 1,2528 (60 min). Deslocamento por bicicleta, ainda que possua maior alcance, é mais suscetível à malha viária incompleta, restrições de acesso, zonas de tráfego e barreiras. Nos testes realizados, a taxa média simples crescimento do diâmetro da isócrona é de 83,8%, atingindo limite de 22.843,21 m (raio ≈ 11.421,60 m).

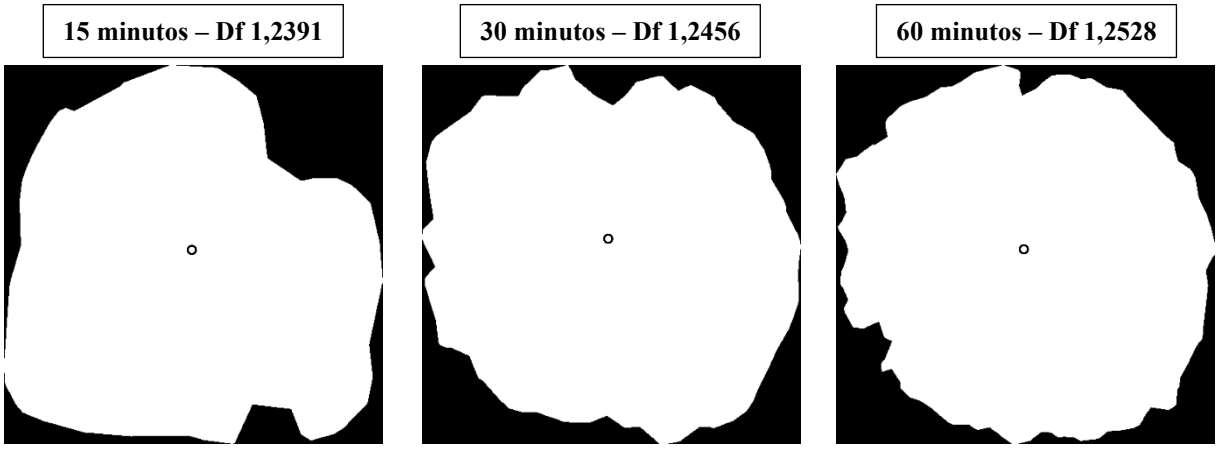


Figura 3: Isócronas reais para a região da Cidade Universitária, modo bicicleta (sem escala)

O transporte por carro fornece maior amplitude de deslocamento em relação a outros modos de transportes (Figura 3, com isócronas associadas à Figura 1-C): nos testes realizados a taxa média de crescimento do diâmetro da isócrona é de 149%, atingindo limite de 95.348,33 m (raio ≈ 47.674,17 m). É um modo que tende a se tornar mais fragmentado por acessar malhas locais de áreas urbanas e periurbanas integrando estruturas heterogêneas. Nos testes realizados, este modo apresenta maiores valores de dimensão fractal, com crescimento significativo de 1,2902 (15 min) para 1,3990 (60 min), pois à medida que o tempo de percurso aumenta, o deslocamento tende a se concentrar em grandes eixos viários (rodovias e avenidas), gerando linhas isócronas apresentam geometria com maior quantidade de ramificações, saliências e recortes complexos devido à variedade topológica de vias e da desigualdade de acesso.

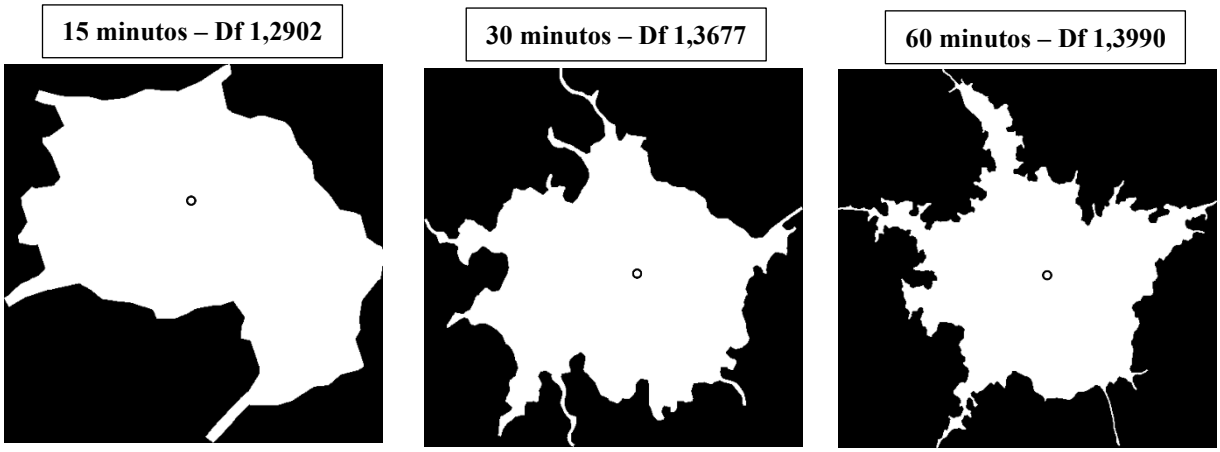


Figura 4: Isócronas reais para a região da Cidade Universitária, modo carro (sem escala)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise indica que a complexidade das isócronas, em termos de sua rugosidade, descreve aspectos espaço-temporais relativos à velocidade e ao alcance de cada modo de transporte. Os resultados permitem comparar as isócronas de um mesmo modo; contudo a comparação entre modos pode demandar análises mais aprofundadas: e.g. o deslocamento a pé que sofre, por padrão, de alta fragmentação, apresenta baixos valores de dimensão fractal nos testes devido à maior densidade e continuidade da malha disponível. Isto é particularmente verdadeiro no cenário de testes, mas pode não ser generalizável para outros cenários.

Conforme os testes realizados, a métrica de dimensão fractal da linha isócrona (borda) pode ser usada como um indicador quantitativo de acessibilidade complementar a outros índices, avaliando possíveis intervenções que tendam a tornar a dimensão fractal mais próxima de 1 (um) considerando determinado intervalo de deslocamento e distância de percurso de interesse. A métrica proposta não possui como objetivo substituir outras métricas presentes na literatura, mas servir como complemento a elas.

Entre as opções de expansão do tema desta pesquisa inclui-se a utilização de dados de tráfego, cuja integração ao modelo deve permitir analisar as isócronas de forma dinâmica em conjunto de índices de congestionamento. A análise de rugosidade das bordas de isócronas também permite comparar a complexidade entre diferentes regiões geográficas, variando extensão territorial de análise, considerando um ou mais modos de transportes, verificando regiões mais ou menos acessíveis em contextos específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aranguren, A.; I. Laña; E. Osaba, e S. Urra-Uriarte (2023) Isochrone Overlapping: A Novel Approach to Mobility and Infrastructure Planning. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (September), 6199–6205. DOI:10.1109/ITSC57777.2023.10422209

Bracarense, L. S. F. P. e J. O. N. Ferreira, (2018) Accessibility index for comparison between private and collective transport modes. *Urbe*, v.10, n.3, p. 600–613. DOI:10.1590/2175-3369.010.003.AO08

Falconer, K. (2014) *Fractal Geometry*. Chichester: John Wiley & Sons.

Galton, F. (1881) On the Construction of Isochronic Passage-Charts. *Proceedings of the Royal Geographical Society and Monthly Record of Geography*, v.3, n.11, p. 657–658.

Ingram, D. R. (1971) The concept of accessibility: A search for an operational form. *Regional Studies*, v.5, n. 2, p. 101–107.

Ma, Y.; M. Xu; X. Qin e Y. Zeng (2025) Dynamic isochrones development and analysis for the time-effective performances evaluation of road networks. *Journal of Urban Management*. DOI:10.1016/j.jum.2025.05.001

Mandelbrot, B. B. (2004) *Fractals and Chaos*. *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11). Springer New York, New York, NY. DOI:10.1007/978-1-4757-4017-2

Oliveira, R. H.; R.S. Pissardini e F. G. V. Almeida Filho (2018) Proposta de requalificação de sistemas de informação ao pedestre. *8º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Integrado e Sustentável (Pluris 2018)*. Coimbra, Portugal.

Rode, P.; G. Floater; N. Thomopoulos; J. Docherty; P. Schwinger; A. Mahendra e W. Fang (2017) Accessibility in Cities: Transport and Urban Form. *Lecture Notes in Mobility*, (November), 239–273. DOI:10.1007/978-3-319-51602-8_15

Śleszyński, P.; P. Olszewski; T. Dybicz; K. Goch e M. A. Niedzielski (2023) The ideal isochrone: Assessing the efficiency of transport systems. *Research in Transportation Business and Management*, v.46 (January 2022). DOI:10.1016/j.rtbm.2021.100779

Rodrigo de Sousa Pissardini (pissardini@usp.br)
Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho (flaviovaz@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica
Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2, 83 – Butantã, São Paulo – SP, CEP: 05508-070

Rafael Henrique de Oliveira (rafaelho@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia
Rua Paschoal Marmo, 1888 – Jd. Nova Itália, Limeira – SP, CEP: 13484-332

CYCLING UNDER PRESSURE: THE ROLE OF TRAFFIC STRESS IN LIMITING URBAN JOB ACCESSIBILITY BY BICYCLE

Jorge Ubirajara Pedreira Junior[1], **Lucas Brandão Monteiro de Assis**[2], **Thiago Vinicius Louro**[2]
Universidade Federal da Bahia[1], Universidade de São Paulo[2]

ABSTRACT
This study investigates how traffic stress conditions affect job accessibility by bicycle in the city of Salvador, Brazil. The analysis aims to evaluate disparities in access to employment under different Levels of Traffic Stress (LTS), which reflect cyclists' tolerance to challenging traffic environments. Using demographic and employment data, combined with network-based routing simulations and LTS classifications derived from OpenStreetMap, we estimate the proportion of formal jobs reachable within 15, 30, 45, and 60 minutes. Results show that substantial accessibility gains occur under high-stress conditions (LTS 4), indicating a transport network predominantly designed for motorized mobility. At the 60-minute threshold, LTS 4 enables access to nearly three times more jobs than LTS 1. These differences are especially relevant for low- and middle-income neighborhoods near high-capacity corridors. The findings underscore critical infrastructure gaps and offer evidence to support inclusive cycling investments that enhance access to urban opportunities.

1. INTRODUCTION

The accelerated growth of the global population has posed increasing challenges for urban planners, especially in developing countries. It is estimated that by 2050, around 70% of the world's population will be living in urban areas (UN, 2022). In response to rapid urbanization, many cities have adopted transportation models centered on private motorization. While this has supported mobility for some, it has also led to a range of negative externalities, including traffic congestion, air pollution, greenhouse gas emissions, road safety concerns, and the spatial exclusion of low-income populations. As these issues intensify, the limitations of car-oriented urban development become increasingly evident. A paradigm shift is therefore necessary to promote more sustainable, inclusive, and resilient urban mobility systems.

In this context, cycling emerges as a powerful alternative for the development of sustainable mobility, bridging the gap between walking and motorized travel. It extends the range of active travel, potentially providing access to more opportunities while preserving health and environmental benefits. Cycling has also proven to be one of the healthiest, most affordable, and zero-emission modes of transport, with no direct CO_2 or noise pollution (Heinen *et al.*, 2010). However, its adoption is closely linked to the availability of appropriate infrastructure that supports safe and convenient cycling. In other words, factors related to cyclists' comfort and safety are key determinants in both mode choice and route selection (Broach *et al.*, 2012; Buehler e Pucher, 2012). These aspects are therefore fundamental in the planning of cycling infrastructure within urban spaces, with the goal of encouraging functional daily trips, such as commuting to work, school, or running errands, as viable alternatives to motorized transport, whether by car or motorcycle.

Despite growing interest in cycling, a key gap in the literature is research on cycling accessibility, which refers to the extent to which land use and transportation systems allow people to reach destinations using a bike (Geurs and van Wee, 2004). Historically, accessibility research has focused on automobiles and public transportation, with comparatively limited attention to cycling (Lee et al., 2017). A key aspect of cycling accessibility is that the actual possibility of accessing opportunities by bike is closely tied to the presence of a safe, connected, and comprehensive network of cycling infrastructure. A range of studies have shown that installing bicycle infrastructure, such as bike lanes or cycle tracks, increases the cycling mode share and the frequency of cycling trips (Buehler and Pucher, 2012; Dill and Carr, 2003; Mitra et al., 2017).

One approach to assessing the feasibility of a cycling route is the Level of Traffic Stress (LTS) framework, proposed by Mekuria et al. (2012). This method evaluates infrastructure characteristics to determine the suitability of a given facility based on different cyclist typologies. LTS 1 is suitable for children, LTS 2 is tolerable for the general adult population, LTS 3 is appropriate for cyclists categorized as Enthused and Confident, and LTS 4 is only tolerated by Strong and Fearless cyclists. In its original formulation, the LTS classification incorporates a range of geometric and operational factors, including street width, cyclist operating space, posted or prevailing speed limits, frequency of bike lane obstructions, type of infrastructure, and intersection or crossing configurations. In this study, we applied the LTS classification using the r5r package, which assigns stress levels to street segments based on OpenStreetMap attributes and enables routing

constrained by maximum allowable stress levels (Pereira et al., 2021). Due to limited detail in OpenStreetMap data for Salvador, we used a simplified version of the LTS methodology adapted to available data.

Another important gap in the literature is the limited application of the LTS framework in the context of the Global South, where urban environments often differ significantly from those in North America or Europe. Additionally, there has been relatively little attention to job accessibility within cycling-based accessibility research. Most studies to date have focused on access to amenities such as schools, parks, and healthcare, often neglecting the central role of employment. This omission is problematic, as job accessibility is fundamental to urban functionality and social equity. Cities operate as labor markets, bringing people together to exchange skills, goods, and services (Bertaud, 2018). Poor access to employment opportunities leads to inefficient labor allocation, constrained economic growth, and deepened social inequalities.

This study addresses these gaps by examining how varying traffic stress conditions influence access to employment opportunities by bicycle in Salvador, Brazil. Using demographic and employment data combined with network-based routing and Levels of Traffic Stress classifications from OpenStreetMap, we assess how the structure and stress levels of the cycling network affect the number of jobs reachable within specific travel time thresholds. This approach highlights how the availability or absence of low-stress cycling infrastructure influences urban accessibility outcomes. The study provides empirical evidence on infrastructure-related barriers to cycling access and supports more equitable and inclusive transportation planning in cities of the Global South.

2. MATERIALS AND METHOD

The methodological approach of this study was structured in three sequential stages. First, population data were obtained from the 2022 Brazilian Demographic Census, disseminated by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). These data were originally provided in a regular 200 x 200 m statistical grid. To enable spatial consistency and facilitate network-based accessibility modeling, the statistical grid was overlaid with a hexagonal grid based on the H3 spatial index at resolution 9. Population counts were then redistributed to the hexagons using areal interpolation, implemented via the areal package in R (Prener & Revord, 2019). Employment data were drawn from the 2019 RAIS (Annual Social Information Report), made available through the Access to Opportunities Project coordinated by IPEA via the aopdata package (Pereira et. al, 2022). These data include geocoded records of formal job locations across the hexagonal grid.

The second stage consisted of simulating cycling travel times from each populated hexagon to all employment locations under different assumptions about cyclist comfort, operationalized through the Level of Traffic Stress (LTS). Routing was performed using the r5 engine developed by Conveyal, via the r5r package in R (Pereira et al., 2021). In these computations, bicycle speeds follow the default R5 assumption of ~15.5 km/h, with adjustments derived from a digital terrain model (DTM), which reduce speeds on uphill segments and penalize steep downhill segments for safety. The engine applies a default methodology to classify street network edges according to traffic stress, relying on tags from OpenStreetMap (Conveyal, 2025). Version 5.9.0 of the routing engine implements a rule-based logic to assign Conveyal Estimated LTS values through two main stages: an initial classification round and an unsignalized intersection adjustment round. In the first stage, LTS values are assigned based on the attributes of each OSM way, following the logic below:

- If the way does not allow motor vehicle traffic (e.g., pedestrian-only paths or dedicated cycleways), LTS 1 is assigned.
- If the way is tagged “highway = service”, which refers to service roads such as parking lot access, industrial roads, or building entrances, no LTS value is assigned during this round.
- If the way is tagged “highway = residential” (typical residential streets) or “highway = living_street” (low-speed, pedestrian-priority streets), LTS 1 is assigned.
- If the “maxspeed” tag is less than 40.25 km/h and the number of lanes is less than 4 or not specified, LTS 2 is assigned.
- If the way is tagged “highway = unclassified” (minor roads of local importance), “highway=tertiary” (collector roads), or “highway = tertiary_link” (connector ramps to tertiary roads), and the number of

lanes is less than 4 or a “cycleway” tag is present in the correct direction, LTS 2 is assigned.
- Otherwise, if a “cycleway” tag is present in the correct direction, LTS 3 is assigned.
- If none of the above conditions are met, LTS 4 is assigned, indicating high stress for cyclists.

After the initial classification, LTS values are updated to reflect the effects of unsignalized intersections. At each street intersection (i.e., network node) without a “traffic_signals” tag, the highest LTS of any incoming or outgoing edge is applied to all connected edges at that node. This adjustment is intended to capture the increased stress cyclists may experience when crossing intersections without signal control. For example, a segment of a cycleway that would normally be classified as LTS 1 may be downgraded to LTS 4 if it crosses a high-stress street (e.g., LTS 4) at an unsignalized intersection.

In the routing computation, for each LTS level, the underlying street network was filtered to include only links considered cyclable under that specific stress threshold, using the LTS classification based on OpenStreetMap attributes. For each origin hexagon, the percentage of total jobs reachable within 4 travel time thresholds (15, 30, 45 and 60 minutes) was calculated. This allowed the construction of accessibility surfaces that reflect the interplay between network conditions and potential reach to employment opportunities.

Finally, the third stage involved exploratory data analysis of the resulting accessibility patterns. Descriptive statistics and spatial visualizations were used to compare the percentage of jobs accessible under each LTS scenario, identifying areas of high and low accessibility and quantifying disparities across the city. The analysis illustrates how variations in traffic stress levels, interpreted as proxies for cyclist comfort and safety, shape the spatial distribution of employment accessibility and highlight potential inequities in access to opportunities.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 displays the cumulative accessibility to jobs across different Levels of Traffic Stress (LTS 1 to LTS 4) and travel time thresholds (15, 30, 45, and 60 minutes). As expected, differences in accessibility between LTS levels are relatively minor at the 15-minute cutoff, since the short travel time restricts the reachable area regardless of network conditions. However, as the time threshold increases, more pronounced differences emerge.

Results from Figure 2a reveal that accessibility increases more significantly when cyclists are assumed to tolerate higher-stress conditions (LTS 4), underscoring how the city’s infrastructure has been primarily designed for motorized transport. Differences in accessibility across LTS 1, LTS 2, and LTS 3 are relatively small, especially for shorter cutoffs (up to 30 minutes), and LTS 2 and LTS 3 remain very close at all time thresholds. For example, at the 60-minute cutoff, LTS 4 enables access to approximately 45% of all jobs in the city, nearly three times more jobs than LTS 1, and more than twice as many as LTS 2 and LTS 3. This pattern holds consistently for the 45- and 30-minute thresholds, indicating that the expansion of the reachable job market under LTS 4 is substantial and persistent across these travel time cutoffs.

The observed increase in accessibility from LTS 3 to LTS 4 primarily reflects the potential impact of implementing dedicated cycling infrastructure along high-capacity corridors, coupled with improved intersection treatments that enhance safety and route continuity for cyclists. As shown in the spatial distribution of accessibility under LTS 4 for the 30-minute cutoff (Figure 2b), this pattern is particularly evident in several centrally located, medium- and low-income neighborhoods such as Engenho Velho da Federação, Cosme de Farias, Luís Anselmo, Brotas, and Matatu. These areas lie near major arterials like Av. Mário Leal Ferreira, Av. Vasco da Gama, and Av. Anita Garibaldi, which provide direct connections to key employment clusters. In contrast, peripheral neighborhoods, especially those in the Rail Suburb and central-northern (“Miolo”) region, exhibit limited accessibility gains under LTS 4, largely due to their lower proximity to job concentrations and the absence of direct connections to high-capacity corridors.

As travel time thresholds increase to 45 and 60 minutes, however, the accessibility landscape changes, and other areas become more prominent. Notably, the more southern portions of the Rail Suburb and the Miolo region, home to large populations in neighborhoods such as Liberdade, São Caetano, and Cabula, begin to

register more significant gains in job accessibility under LTS 4. These findings underscore the importance of analyzing multiple travel time cutoffs, as accessibility outcomes are closely shaped by the spatial distribution of employment and the structure of the arterial road network. Varying the time threshold allows for a more nuanced understanding of which areas stand to benefit most from improved cycling infrastructure, and how urban morphology and travel dynamics interact to determine access to opportunities.

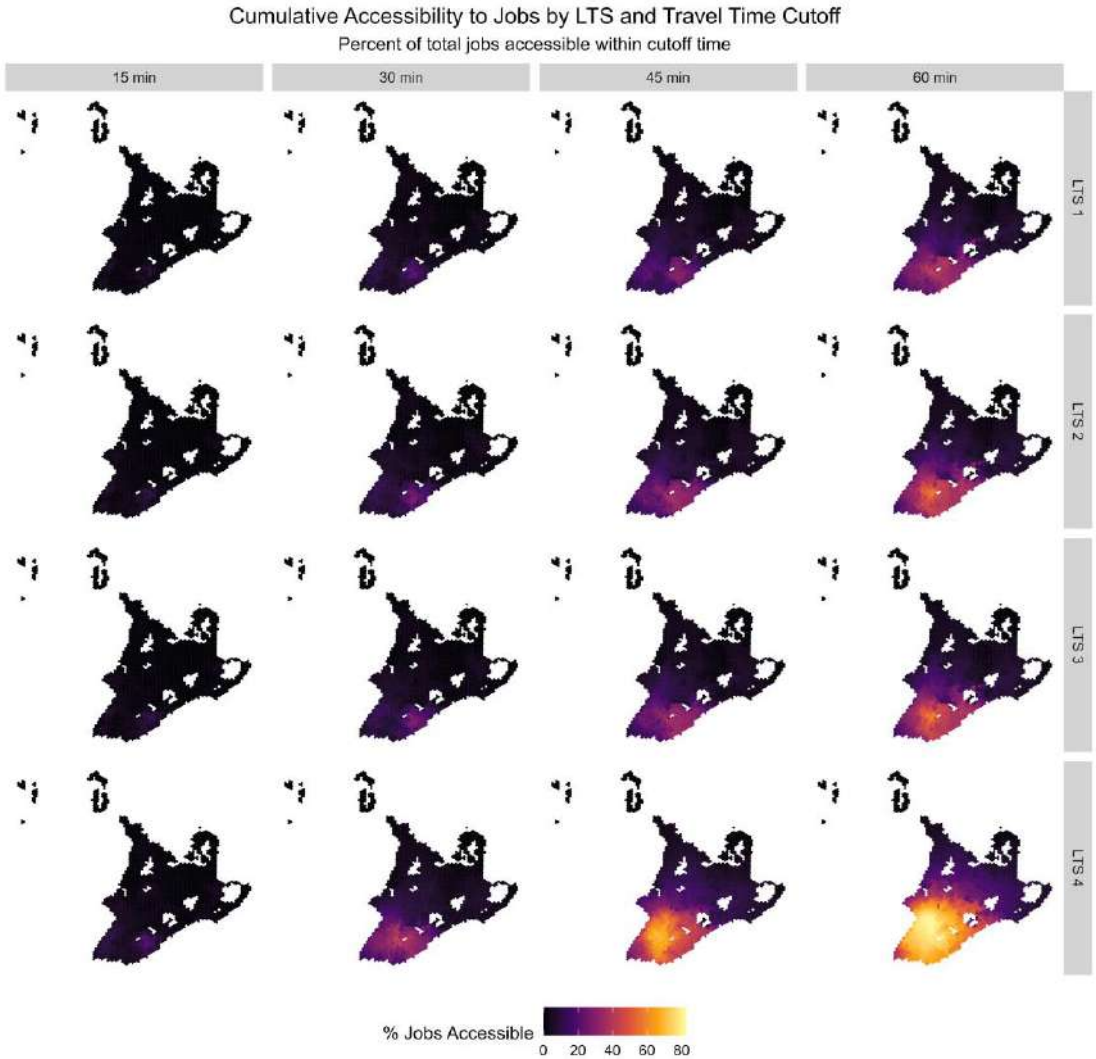


Figure 1: % Jobs accessible for each combination of cutoff time and Level of Traffic Stress (LTS)

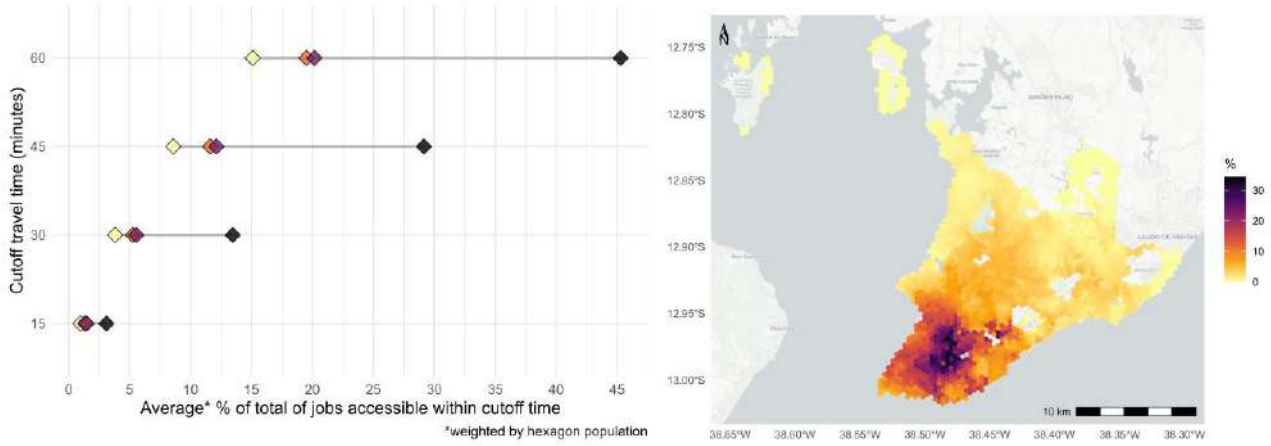


Figure 2: (a) average % of total jobs acessible by travel cuttof time; (b) difference in % jobs accessible between LTS 4 and LTS3 scenarios for the 30 min travel cutoff time

4. CONCLUSIONS

This study underscores the urgency of expanding inclusive cycling infrastructure as a strategic pathway toward more sustainable and accessible transportation systems. While low-stress networks (LTS 1 to LTS 3) provide limited access to employment, particularly within short travel time cutoffs, high-accessibility scenarios only materialize under LTS 4, indicative of environments tolerable to only the most experienced cyclists. This pattern suggests that current infrastructure fails to serve the broader population, especially those who are "interested but concerned" and would cycle more regularly if safer routes were available.

To promote equitable access to jobs, policymakers should prioritize investments in dedicated, protected cycling infrastructure along high-capacity corridors. Additionally, intersection treatments, including signalization and cyclist priority measures, must be improved to reduce perceived and actual risk. The evidence suggests that even modest interventions, if strategically implemented, can significantly enhance the reach of low-stress cycling networks, supporting broader goals of sustainable mobility, urban equity, and social inclusion. Future research could incorporate additional stressors not considered in the original LTS framework, such as street slope.

REFERENCES

Bertaud, A. (2018). Order without design: How markets shape cities. *MIT Press*.

Broach, J., Dill, J., e Gliebe, J. (2012) Where do cyclists ride ? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A*, *46*(10), 1730–1740. doi:10.1016/j.tra.2012.07.005

Buehler, R., e Pucher, J. (2012) Cycling to work in 90 large American cities : new evidence on the role of bike paths and lanes., 409–432. doi:10.1007/s11116-011-9355-8

Castañon, U. N., e Ribeiro, P. J. G. (2021) Bikeability and Emerging Phenomena in Cycling : Exploratory Analysis and Review.

Conveyal, 2025. *Cycling Level of Traffic Stress*. Avaliable at: https://docs.conveyal.com/learn-more/traffic-stress. Acessed: July 12, 2025

Dill, J., e Mcneil, N. (2013) Four Types of Cyclists ? Examination of Typology for Better Understanding of Bicycling Behavior and Potential., (2387), 129–138. doi:10.3141/2387-15

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

Heinen, E., Wee, B. Van, Maat, K., Heinen, E. V. A., Wee, B. V. A. N., e Maat, K. (2010) Commuting by Bicycle : An Overview of the Literature Commuting by Bicycle : An Overview of the Literature., *1647*. doi:10.1080/01441640903187001

Lee, R. J., Sener, I. N., & Jones, S. N. (2017). Understanding the role of equity in active transportation planning in the United States. Transport Reviews, 37(2), 211–226. https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1239660

Mekuria, M.C., P.G. Furth, and H. Nixon. Low-Stress Bicycling and Network Connectivity. Research report 11-19, Mineta Transportation Institute, 2012.

United Nations. (2022) World Population Prospects 2022. United Nation. Obtido de www.un.org/development/ desa/pd/.

Pereira, Rafael H. M., Marcus Saraiva, Daniel Herszenhut, Carlos Kaue Vieira Braga, and Matthew Wigginton Conway (2021). "R5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R 5 in R." *Findings*. DOI:10.32866/001c.21262.

Pereira, Rafael H. M. et al. (2022) *Distribuição espacial de características sociodemográficas e localização de empregos e serviços públicos das vinte maiores cidades do Brasil*. Texto para Discussão 2772. Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. http://dx.doi.org/10.38116/td2772

Prener, Christopher, and Charles Revord. 2019. "Areal: An R Package for Areal Weighted Interpolation." *Journal of Open Source Software* 4(37): 1221. DOI:10.21105/joss.01221.

United Nations. (2025) Sustainable Development Goals. Obtido de https://sdgs.un.org/goals

Jorge Ubirajara Pedreira Junior (jorge.ubirajara@ufba.br)
Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia - Rua Aristides Novis, 2 – Salvador (BA), Brasil

DATASET DE LINHAS E VIAGENS DO TRANSPORTE PÚBLICO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

Almir Monteiro[1], Francisco Glaubos Nunes Clímaco[1], Marcos A. Guerine[1], Cintia Machado de Oliveira[2], Romulo Dante Orrico Filho[1], Pedro Henrique González[1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
[2]Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Cefet/RJ

RESUMO
Este estudo teve como objetivo principal apresentar e documentar um *dataset* sobre o sistema de transporte público da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O método utilizado envolveu a aplicação de técnicas de *web scraping* na plataforma colaborativa Moovit, superando as limitações de dados oficiais e permitindo a coleta de informações detalhadas sobre linhas, viagens, empresas operadoras, trajetos e pontos de parada. Como resultado, foi gerado um *dataset* que revela a complexidade do sistema, com destaque para a predominância de linhas no Rio de Janeiro e em Petrópolis. A relevância deste trabalho reside no potencial do *dataset* para embasar o planejamento urbano, estudos acadêmicos sobre equidade e eficiência do transporte, bem como a formulação de políticas públicas mais eficazes ao oferecer uma nova ferramenta para a análise da mobilidade urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transporte público urbano desempenha papel fundamental na mobilidade das grandes metrópoles brasileiras, influenciando diretamente a qualidade de vida dos cidadãos, o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental das cidades (Andrade et al., 2023). No contexto brasileiro, onde a urbanização acelerada resultou em regiões metropolitanas importantes como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), com mais de 12 milhões de habitantes dispersos em 22 municípios, a eficiência e a acessibilidade dos sistemas de transporte público tornam-se questões críticas para o planejamento urbano e as políticas públicas (dos Reis, 2022).

Nos últimos anos, a disponibilização de dados abertos sobre transporte público revolucionou como pesquisadores abordam questões de mobilidade urbana (Pereira et al., 2017). O formato GTFS (General Transit Feed Specification), desenvolvido inicialmente pelo Google em parceria com a TriMet de Portland, tornou-se o padrão internacional para compartilhamento de informações sobre transporte público (Google Inc., 2023). Esse formato padronizado permite a interoperabilidade entre diferentes sistemas e facilita o desenvolvimento de aplicações, análises acadêmicas e ferramentas de planejamento (Wu et al., 2023).

Entretanto, a disponibilidade de dados oficiais em formato GTFS ainda apresenta limitações significativas em muitas cidades brasileiras (Lanzini et al., 2023), tais como a fragmentação institucional (diferentes municípios e operadores mantêm sistemas de dados independentes), a falta de padronização entre diferentes fontes de dados, e a ausência de informações detalhadas sobre aspectos específicos. Diante destas limitações, metodologias alternativas de coleta de dados têm emergido como soluções viáveis para a obtenção de informações abrangentes sobre sistemas de transporte. O *web scraping*, ou raspagem de dados, técnica de extração automatizada de dados de websites, tem se mostrado eficaz para a coleta de informações de transporte público, em especial quando aplicado a plataformas colaborativas como o Moovit. Essa abordagem permite superar algumas das limitações dos dados oficiais, oferecendo cobertura mais ampla e informações mais detalhadas sobre o funcionamento real dos sistemas de transporte (Agard et al., 2006).

O Moovit, plataforma global de informações sobre transporte público, mantém uma base de dados colaborativa alimentada por mais de 680 milhões de usuários em todo o mundo. No contexto brasileiro, esta plataforma oferece informações sobre linhas, trajetos, pontos de parada, horários e empresas operadoras, constituindo uma fonte de dados para pesquisas acadêmicas e aplicações práticas (Santos et al., 2021).

Vela et al. (2019) propuseram um método semiautomático para extração de dados de transporte público e informações de acessibilidade de websites. Estudos similares têm explorado diferentes aspectos da coleta automatizada de dados de transporte, incluindo a validação da qualidade dos dados extraídos e sua integração com outras fontes de informação (Hashiguchi et al., 2020). No contexto específico da RMRJ, estudos têm identificado desafios significativos relacionados à mobilidade urbana, incluindo altos índices de imobilidade (Baumvol et al., 2016). Outros estudos também enfatizam a necessidade de dados mais detalhados e

metodologias inovadoras para compreender os padrões de mobilidade em regiões metropolitanas (Pereira et al., 2021). Lanzini et al. (2023) destacaram a importância de novos paradigmas para a mobilidade urbana brasileira, enfatizando a necessidade de abordagens baseadas em dados para o planejamento de transportes. Kozievitch et al. (2016) demonstraram o potencial da análise exploratória de dados de transporte público em cidades brasileiras, utilizando dados de IoT para extrair informações e conhecimentos sobre sistemas baseados em ônibus.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar e documentar um conjunto de dados (*dataset*) sobre o sistema de transporte público da RMRJ, obtido por meio da metodologia de raspagem de dados aplicada à plataforma Moovit. O *dataset* resultante oferece cobertura dos diferentes municípios da RMRJ, incluindo informações sobre linhas municipais e intermunicipais, empresas operadoras, trajetos geográficos, pontos de parada e características operacionais específicas. A metodologia desenvolvida pode ser replicada em outros contextos urbanos, contribuindo para o avanço do conhecimento em mobilidade urbana e para o desenvolvimento de ferramentas mais eficazes de planejamento de transportes. Para o restante deste artigo, a Seção 2 detalha a metodologia empregada, enquanto a Seção 3 descreve o *dataset* e suas especificidades.

2. METODOLOGIA

Esta seção descreve a metodologia adotada no estudo. A Seção 2.1 apresenta uma visão geral do processo, destacando suas principais etapas. A Seção 2.2 justifica a escolha da Região Metropolitana do Rio de Janeiro como área de estudo. Por fim, a Seção 2.3 detalha o processo de raspagem e tratamento dos dados, incluindo as ferramentas utilizadas e os tipos de informações coletadas.

2.1. Visão Geral do Processo

O processo metodológico foi estruturado em seis etapas principais, conforme ilustrado na Figura 1. Inicialmente, procedeu-se à criação de uma conta de usuário no ambiente de edição de dados do Moovit (https://mooviters.moovit.com/), selecionando a região "Rio de Janeiro e Região" como área de cobertura. Posteriormente, implementou-se um sistema automatizado de autenticação e extração de dados utilizando as bibliotecas Python *Selenium* e *Playwright*.



Figura 1: Fluxograma da metodologia de coleta de dados do Moovit. Fonte: próprio autor.

2.2. Área de Estudo e Justificativa

A seleção da Região Metropolitana do Rio de Janeiro como área de estudo foi estratégica, considerando sua importância como a segunda maior região metropolitana do Brasil e a complexidade de seu sistema de transporte público, permitindo a coleta de dados tanto de linhas municipais quanto intermunicipais. Essa região apresenta características particulares que justificam estudos sobre mobilidade urbana. Koch et al. (2012) identificaram desafios únicos no sistema de transporte do Rio de Janeiro, especialmente relacionados à integração entre diferentes modais e à cobertura de áreas de difícil acesso.

2.3 Processo de Raspagem

A etapa inicial compreende a autenticação no sistema, executada com base no usuário previamente cadastrado, para que o acesso aos dados seja concedido. O acesso à página de *login* é feito de forma automatizada, com o preenchimento automático dos campos de usuário e senha. Subsequentemente, a opção de edição de linhas do editor é selecionada.

Os primeiros dados recuperados foram os referentes às linhas de transporte público existentes na região de interesse. Nesta interface, é possível obter informações como sigla, nome da linha, situação cadastral corrente e a quantidade de informações cadastradas em cada linha, como viagens. Adicionalmente, pode-se verificar a data da última modificação e o usuário responsável por ela. Os dados são dispostos em formato tabular, passível de filtragem por empresa responsável pela linha, situação cadastral das linhas e/ou texto

contido no registro (vide Figura 2, à esquerda).

Após recuperar os dados das linhas, cada viagem vinculada a elas foi recuperada. Nesta tela, além das informações sobre as viagens, como direção e situação cadastral, também é possível recuperar a empresa responsável por operar aquela linha (ver Figura 2, ao meio). Após a recuperação dos dados das linhas, cada viagem a elas vinculada foi processada. Nesta interface, além das informações pertinentes às viagens, como direção e situação cadastral, torna-se igualmente viável a recuperação da entidade empresarial responsável pela operação da linha (conforme ilustrado na Figura 2, ao meio).

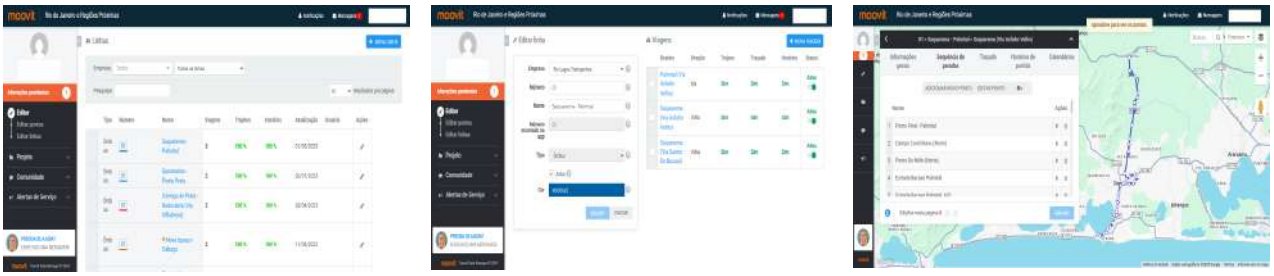


Figura 2: Tela de Linhas, Viagens e Detalhes da Viagem.

Subsequentemente, para cada viagem identificada, foi possível acessar e recuperar seu trajeto percorrido (*shape*), assim como os pontos de parada. Por fim, um procedimento adicional de processamento é executado nesses dados, com o objetivo de extrair os pontos de parada e armazená-los em um arquivo separado, visando uma melhor formatação para utilização posterior.

Com relação às ferramentas, o *Selenium* foi inicialmente empregado para efetuar o *login* e recuperar os dados referentes a linhas, empresas e viagens. No entanto, para obter os dados de *shape* e pontos, é imprescindível consultar informações enviadas ao *console* do navegador. Visto que esta funcionalidade não é diretamente suportada pelo *Selenium*, tornou-se necessário o uso do *Playwright* para a recuperação desses dados, pois esta biblioteca possibilita o registro de um *listener*, uma função ativada a cada informação gravada no *console*. Dessa forma, é possível acessar os dados previamente mencionados.

3. DESCRIÇÃO E POTENCIAL DE USO DO *DATASET*

Nesta seção, detalha-se o conjunto de dados desenvolvido neste trabalho. Os dados, recuperados pela metodologia apresentada na Seção 3, foram armazenados em dois arquivos distintos (viagens e pontos), ambos no formato .csv. Além de identificadores de viagem, também foram armazenados nomes das linhas, sentidos das viagens e nomes das empresas responsáveis. No que tange aos dados, destaca-se que 113 empresas são responsáveis pelo serviço de transporte público por ônibus na RMRJ. Dentre estas, a Viação Cidade Real, de Petrópolis, na região serrana, lidera em número de linhas, operando 80. Em seguida, encontra-se a TURP - Transportes Urbanos de Petrópolis, com 77 linhas, seguida pelo Consórcio São Gonçalo, com 58 linhas. Somente em quarto lugar figura uma empresa da capital fluminense, a Viação Redentor, que opera um total de 48 linhas. Em nível intermunicipal, o Rio de Janeiro é ponto de origem de 88 linhas, enquanto Nova Iguaçu, com 51, e Duque de Caxias, com 45, completam as três cidades com o maior número de linhas intermunicipais partindo de seus respectivos municípios.

O *dataset* de linhas e viagens de transporte público da RMRJ apresenta potencial para diversas aplicações em planejamento urbano, pesquisas e políticas públicas, oferecendo informações detalhadas sobre a distribuição espacial das linhas de transporte, conforme ilustrado na Figura 3, que apresenta a distribuição de linhas municipais por cidade na região metropolitana. A análise dessa Figura revela uma concentração significativa de linhas no município do Rio de Janeiro, com 547 linhas municipais, seguido por Petrópolis com 198 linhas. Essa distribuição desigual reflete não somente as diferenças populacionais entre os municípios, mas também disparidades na oferta de serviços de transporte público que podem ser objeto de políticas de equalização.

A visualização dos trajetos por cidade, apresentada na Figura 4 (à esquerda), permite identificar padrões de conectividade intra e intermunicipal fundamentais para o planejamento de sistemas integrados de transporte. A diferenciação por cores facilita a identificação de sobreposições e lacunas na cobertura territorial,

informações essenciais para o dimensionamento adequado da oferta de transporte público.

Para planejadores urbanos, o *dataset* oferece ainda a possibilidade de análises de densidade de pontos de parada, conforme demonstrado na Figura 4 (à direita). Esse tipo de análise é importante para identificar áreas com deficiência na cobertura de transporte público e orientar investimentos em infraestrutura urbana.

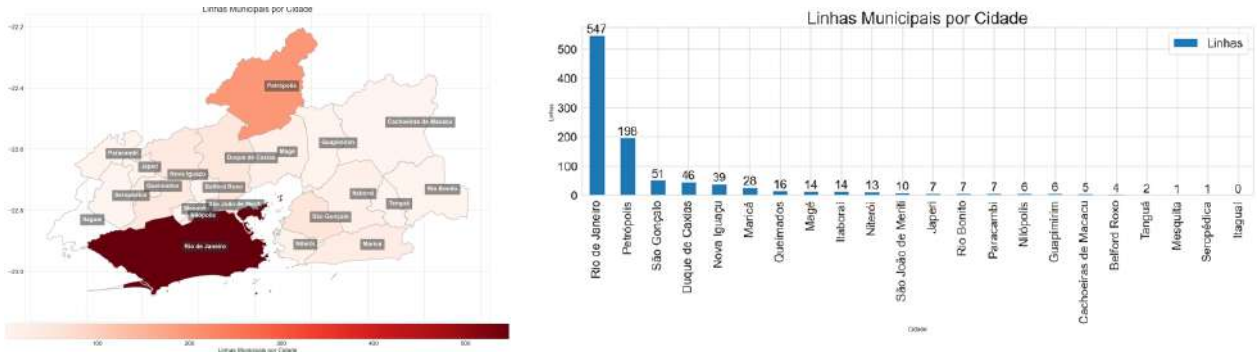


Figura 3: Distribuição espacial (à esquerda) e quantitativa (à direita) das linhas municipais de transporte.

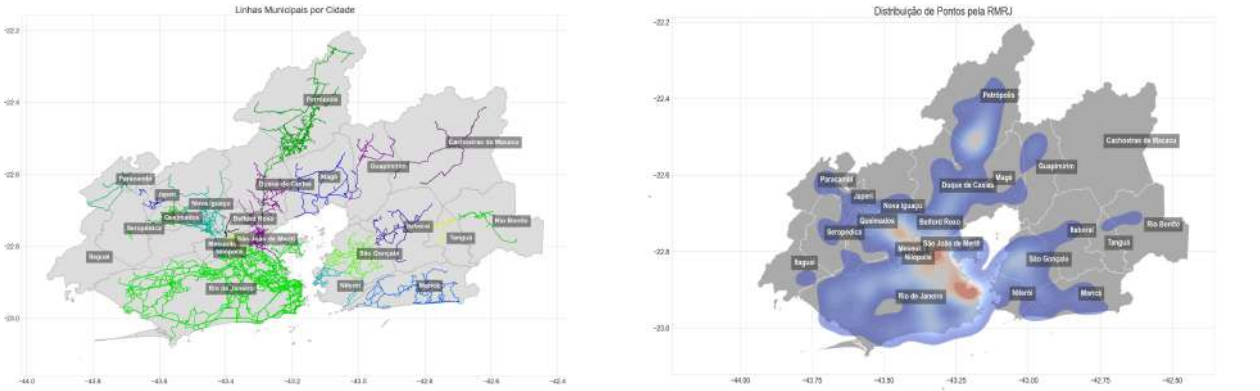


Figura 4: Visualização das linhas municipais diferenciadas por cores segundo o município de origem (à esquerda) e distribuição de densidade de pontos de parada representada no mapa de calor (à direita).

O *dataset* da RMRJ é uma importante alternativa para o apoio na análise de impacto de políticas públicas de mobilidade, pois oferece evidências empíricas para orientar decisões sobre investimentos, regulação e organização dos serviços de transporte público. Ele permite análises detalhadas de acessibilidade e equidade social, com mais de 15.000 pontos de parada georreferenciados revelando disparidades no acesso aos serviços. O potencial do *dataset* é ampliado pela integração com outras bases de dados, como o Censo Demográfico do IBGE, para correlacionar a oferta de transporte com características socioeconômicas, viabilizando estudos sobre equidade social e justiça espacial. Contudo, suas limitações incluem variações na qualidade e completude das informações devido à natureza colaborativa da plataforma Moovit, necessitando de validação cruzada com fontes oficiais.

O *dataset* desenvolvido neste estudo está disponível para acesso público em: https://bit.ly/anpet2025. A disponibilização visa fomentar novas pesquisas, análises e aplicações práticas relacionadas à mobilidade urbana na RMRJ.

4. CONCLUSÕES

Este estudo conseguiu suprir uma lacuna importante na análise do transporte público da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) ao desenvolver um *dataset* abrangente de linhas e viagens, utilizando uma metodologia de *web scraping* na plataforma Moovit. Essa abordagem permitiu superar as

limitações de dados oficiais, frequentemente inconsistentes e incompletos, em alguns casos até inexistentes, e criar uma base de dados que inclui informações sobre mais de 100 empresas de ônibus, cobrindo o Rio de Janeiro e diversos municípios da região metropolitana. Os resultados obtidos demonstram não somente a viabilidade de técnicas de raspagem de dados em contextos urbanos complexos, mas também revelam padrões de distribuição de linhas e densidade de pontos de parada importantes para o planejamento e a gestão da mobilidade urbana na região. Apesar de limitações relacionadas à natureza colaborativa da fonte de dados, este trabalho oferece uma contribuição significativa para a comunidade científica e para os gestores públicos, fornecendo uma ferramenta para aprimorar a compreensão de dados em sistemas de transportes.

Agradecimentos
Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Koch, J., Lindau, L. A., & Nassi, C. D. (2022). *Transportation in the Favelas of Rio de Janeiro*. Lincoln Institute of Land Policy.

Motte-Baumvol, B., Bonin, O., David Nassi, C., & Belton-Chevallier, L. (2016). Barriers and (im) mobility in Rio de Janeiro. *Urban Studies*, *53*(14), 2956-2972.

Twardzik, E., Schrack, J. A., Porter, K. M. P., Coleman, T., Washington, K., & Swenor, B. K. (2024). TRansit ACessibility Tool (TRACT): Developing a novel scoring system for public transportation system accessibility. *Journal of transport & health*, *34*, 101742.

Agard, B., Morency, C., & Trépanier, M. (2006). Mining public transport user behaviour from smart card data. *IFAC Proceedings Volumes*, *39*(3), 399-404.

Pereira, R. H. M., Braga, C. K. V., & Servo, L. M. (2021). Urban mobility trends and inequalities in Brazil I: the use of public and private transport. Brasília: IPEA. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/acessooportunidades/en/publication/2021_td2673_tendencias/ (Acesso em: 25 jun. 2025).

Kozievitch, N. P., Gadda, T. M., Fonseca, K. V., Rosa, M. O., Gomes Jr, L. C., & Abkar, M. (2016). Exploratory analysis of public transportation data in Curitiba. In *Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH)* (pp. 1656-1667). SBC.

Lanzini, P., Pinheiro, D., & Jara, E. (2023). Toward a new paradigm for urban mobility in Brazil: An empirical investigation in the city of Florianópolis. Transport Policy, 132, 115-128.

Hashiguchi, K. K., Gai, B. D. F., Pigatto, D. F., & Fonseca, K. V. (2020).Exploratory Analysis of Public Transportation Data ofVela, B., Cavero, J. M., Caceres, P., & Cuesta, C. E. (2019). A semi-automatic data–scraping method for the public transport domain. *IEEE Access*, *7*, 105627-105637.

Santos, G., & Nikolaev, N. (2021). Mobility as a service and public transport: a rapid literature review and the case of Moovit. *Sustainability*, *13*(7), 3666.

Andrade, N. F., de Lima Junior, F. B., Soliani, R. D., de Souza Oliveira, P. R., de Oliveira, D. A., Siqueira, R. M., ... & de Macêdo, J. J. S. (2023). Urban mobility: a review of challenges and innovations for sustainable transportation in Brazil. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *17*(3), 1-14.

dos Reis, J. G. M., Rodrigues, G. S., & Machado, S. T. (2022). Urban Mobility in Brazil: An Comparison Overview in Thirteen State Capitals. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 601-608). Cham: Springer Nature Switzerland.

Pereira, R. H., Schwanen, T., & Banister, D. (2017).Distributive justice and equity in transportation. *Transport reviews*, *37*(2), 170-191.

Google Inc. (2023). General Transit Feed Specification Reference. Disponível em: https://gtfs.org/documentation/schedule/reference/ (Acesso em: 15 jun. 2025).

Wu, J., Du, B., Gong, Z., Wu, Q., Shen, J., Zhou, L., & Cai, C. (2023). A GTFS data acquisition and processing framework and its application to train delay prediction. *International Journal of Transportation Science and Technology*, *12*(1), 201-216.

Lanzini, P., Pinheiro, D., & Jara, E. (2023). Toward a new paradigm for urban mobility in Brazil: An empirical investigation in the city of Florianópolis. *International Journal of Sustainable Transportation*, *17*(4), 319-332.

DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO UAM-ATM NO PLANEJAMENTO DE MOBILIDADE URBANA NO BRASIL: O CASO DO DISTRITO FEDERAL

Emilia Stenzel, Li Weigang, Juliano Maia, Lucas Ramson,
Universidade de Brasília

RESUMO
A integração entre Mobilidade Aérea Urbana (UAM) e sistemas de gestão de tráfego aéreo (ATM) representa um desafio técnico e institucional no contexto brasileiro, marcado pela fragmentação entre escalas e entre políticas urbanas e regulatórias. Este artigo analisa os obstáculos à implementação de uma rede UAM no Distrito Federal, articulada ao futuro ecossistema nacional BR-UTM. A partir de análise documental e simulações conduzidas no âmbito do TransLab/UnB, são discutidas as condições normativas, operacionais e territoriais que influenciam a viabilidade da implantação do modal aéreo. Argumenta-se que a inexistência de marcos regulatórios urbanos compatíveis com a lógica vertical da UAM, somada à baixa articulação entre entes locais e federais, compromete o aproveitamento da infraestrutura espacial existente. A proposta é reposicionar Brasília como cidade-piloto na integração entre UAM e ATM, explorando sua morfologia linear, centralidade institucional e potencial de governança intermodal.

1. INTRODUÇÃO

A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) tem sido apresentada como uma das frentes mais promissoras para enfrentar os desafios contemporâneos da mobilidade urbana e regional. Baseada no uso de aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOLs), drones logísticos e sistemas digitais de controle de tráfego de baixa altitude (UTM), a UAM propõe uma reorganização tridimensional dos fluxos urbanos com menor ocupação de solo, menor custo de infraestrutura e maior flexibilidade operacional.

No contexto brasileiro, os desafios à implantação da UAM não se limitam à esfera tecnológica, mas se estendem à sua articulação com o planejamento urbano e à governança territorial. A estrutura normativa setorializada, a fragmentação institucional e a ausência de tipologias intermediárias entre os modais ativos e motorizados criam obstáculos à integração da UAM aos instrumentos existentes, como os Planos Diretores, os PMUS e os PDTUs.

O Distrito Federal (DF) apresenta uma configuração singular para a análise dessas questões. Como sede da capital federal e centro de uma Região Integrada de Desenvolvimento (RIDE) com 33 municípios, o DF concentra atributos técnicos e simbólicos que o tornam estratégico para a experimentação de um modelo UAM escalável e replicável. A malha urbana do Plano Piloto — com faixas verdes centrais, hierarquia viária nítida e baixíssima densidade vertical — permite a instalação de corredores aéreos sobre o Eixão com mínima interferência física. Simultaneamente, o desequilíbrio estrutural entre o núcleo do DF e os municípios da RIDE evidencia a necessidade de soluções de conectividade que transcendam os modelos viários legados.

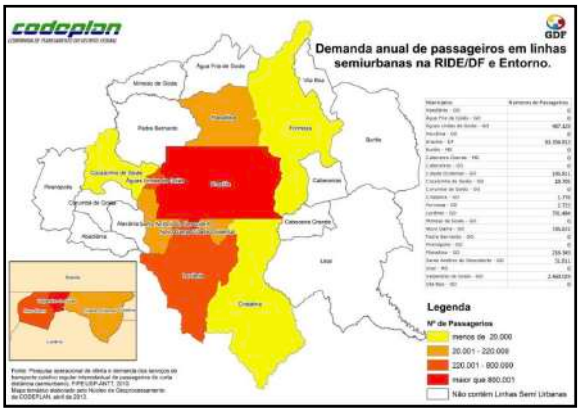


Figura 1: Mapa da RIDE e fluxos viários DF-Entorno
Fonte: FIPE/USP-ANTT, 2010

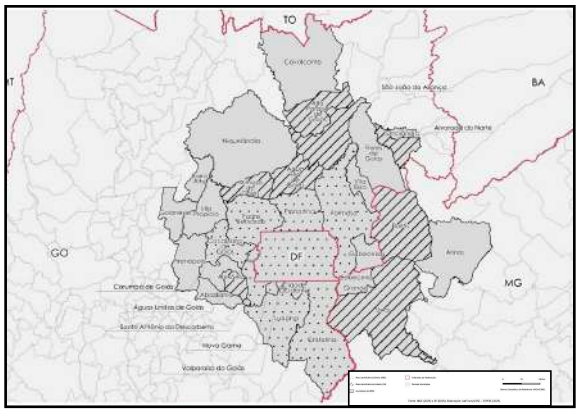


Figura 2: Mapa da Zona de Influencia do DF
Fonte:LabTrans/UFSC - FEPESE (2025).

A fragmentação espacial e funcional da Região Integrada de Desenvolvimento do Entorno (RIDE), marcada por fortes desequilíbrios no acesso à infraestrutura e aos serviços públicos, vem sendo objeto de diversas análises críticas no contexto do Distrito Federal. Jatobá (2018) enfatiza o impacto dos deslocamentos pendulares sobre a coesão territorial e o custo social da segmentação urbana, enquanto Delfim (2020) ressalta a incapacidade dos instrumentos tradicionais de mobilidade em responder à complexidade

metropolitana. Desde uma perspectiva mais ampla, Rolnik (2013) argumenta que a persistência de um modelo urbanístico centrado no viário reforça a exclusão espacial e limita a emergência de soluções integradoras. A rede UAM, ao propor uma malha de conexões multiescalares e de baixa interferência física, reconfigura esse cenário ao articular centralidade, capilaridade e redistribuição de valor territorial.
O presente artigo analisa as oportunidades e limitações da integração entre a UAM e o planejamento de mobilidade urbana no Brasil, com base no estudo de caso do Distrito Federal. O foco recai sobre a implantação de um corredor aéreo experimental sobre o Eixão de Brasília, proposto pelo TransLab/UnB, e sobre as implicações territoriais de sua expansão em direção aos municípios da RIDE. O objetivo é discutir os requisitos técnicos, normativos e institucionais para que a UAM funcione como infraestrutura pública interoperável, integrando-se ao sistema de mobilidade existente e contribuindo para a coesão territorial.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia adotada neste estudo combina abordagem exploratória qualitativa com análise normativa e espacial aplicada. A investigação partiu de uma revisão documental dos principais marcos regulatórios nacionais e internacionais aplicáveis à Mobilidade Aérea Urbana (ICA 100-37, diretrizes ANAC para UAS, estudos da NASA/UTM e U-Space europeu), e de planos diretores e metropolitanos vigentes no Distrito Federal (PDTU-DF, PMUS-DF, PDOT).
Paralelamente, foram examinadas propostas e experimentações em curso no âmbito do TransLab/UnB, que desenvolve simulações de corredores UAM com base em modelagens geoespaciais e parâmetros técnicos do BR-UTM. Os critérios utilizados para o desenho da rede incluem: topografia, densidade de obstáculos verticais, padrões de uso e cobertura do solo, acessibilidade intermodal e integração com hubs logísticos.
Para a análise territorial, foram mapeadas rotas pendulares, vazios urbanos e zonas de potencial instalação de vertiports de baixo custo, sobrepondo-se os dados às diretrizes de segurança operacional e afastamentos previstos na regulamentação. A proposta resultante foi avaliada segundo indicadores de capilaridade, viabilidade normativa e compatibilidade urbana.
.

3. UAM COMO INFRAESTRUTURA EMERGENTE: TECNOLOGIA, REGULAÇÃO E INTEROPERABILIDADE

A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) representa um novo paradigma de estruturação espacial e logística. Seu funcionamento depende de uma infraestrutura composta por veículos eVTOL, sistemas UTM (Unmanned Traffic Management), vertiportos e protocolos digitais de autorização de voo. A lógica técnica da UAM é, portanto, integrada, digitalizada e tridimensional. Seu modelo de expansão é baseado em corredores aéreos escaláveis, organizados por classes de altitude, tipos de missão e níveis de interferência com o espaço urbano consolidado.
Internacionalmente, destacam-se os avanços do U-Space europeu e das zonas-piloto chinesas, onde a integração entre os setores de aviação civil, transporte urbano e regulação territorial tem permitido a experimentação de redes UAM em contextos metropolitanos densos. No Brasil, embora ainda incipiente, a infraestrutura regulatória encontra-se em desenvolvimento, com a publicação do ICA 100-37 pelo DECEA e das diretrizes técnicas da ANAC para aeronaves não tripuladas. Esses instrumentos definem critérios de segurança, zonas de operação e parâmetros para a interoperabilidade com a aviação convencional (ATM).



Figura 3: Mapa dos limites da AMB e RIDE
Fonte: Codeplan- GDF



Figura 4: Regiões de Informação de Voo (FIR)
Fonte: DECEA

A arquitetura normativa da UAM difere da dos sistemas terrestres por operar sob jurisdição federal e por

basear-se em protocolos técnicos de alcance nacional, o que lhe confere maior previsibilidade regulatória. Enquanto o planejamento urbano sofre com a fragmentação entre escalas e competências, a mobilidade aérea herda da aviação civil uma cultura de padronização e comando unificado. Esse diferencial institucional permite que a UAM seja implementada com menor dependência das estruturas políticas locais, frequentemente marcadas por instabilidade ou baixa capacidade técnica.

Essa lógica é particularmente relevante no contexto brasileiro, em que a defasagem da infraestrutura terrestre e a baixa integração entre transporte e uso do solo comprometem a eficácia dos sistemas tradicionais. A UAM, ao permitir conexões ponto a ponto sobrepostas à malha existente, reduz a necessidade de obras pesadas, evita desapropriações e favorece a instalação modular de pontos de acesso (vertistops, vertiports). Sua lógica de expansão é centrífuga e adaptativa, ajustando-se às zonas de demanda sem induzir adensamentos descontrolados.

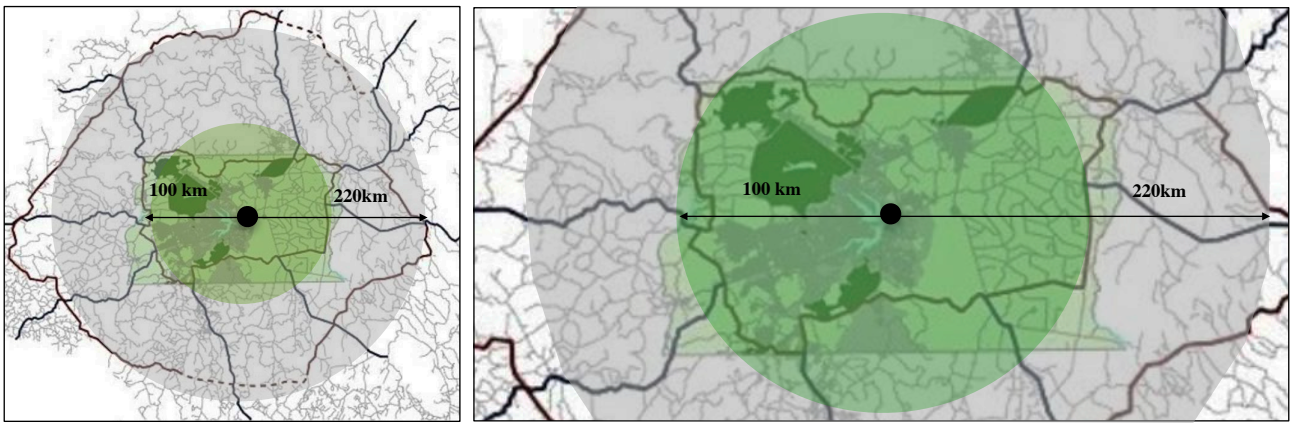
No entanto, sua integração ao planejamento urbano exige a superação de barreiras conceituais. Muitos instrumentos de mobilidade, como os PMUS e PDTUs, mantêm uma definição restrita de modal, equiparando o transporte individual ao rodoviário e excluindo tecnologias emergentes. Essa miopia normativa compromete o alinhamento entre a infraestrutura aérea e as estratégias urbanas, criando lacunas de reconhecimento institucional. Como observa Rolnik (2011), a própria arquitetura institucional do planejamento urbano brasileiro apresenta limites profundos à coordenação entre escalas decisórias e à construção de consensos estratégicos duradouros, o que restringe o potencial transformador de inovações técnicas quando descoladas de uma agenda política clara.

4. CONECTIVIDADE MULTIESCALAR E ARTICULAÇÃO METROPOLITANA

A fragmentação funcional entre Brasília e os municípios que compõem a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE-DF) constitui uma das principais barreiras à construção de um sistema de mobilidade territorialmente equitativo e eficiente. A dependência exclusiva da malha viária, combinada à escassez de alternativas modais e à ocupação dispersa do solo, agrava as desigualdades de acesso a oportunidades e serviços. Estudos como os de Jatobá (2020) e Silveira & Magalhães (2018) revelam que os deslocamentos pendulares nas regiões periféricas impõem custos econômicos, temporais e ambientais desproporcionais, sobretudo para populações de baixa renda residentes nas bordas da metrópole.

A implantação de uma rede de Mobilidade Aérea Urbana (UAM), ancorada em corredores verticais e em uma infraestrutura federativa de gestão do tráfego aéreo (UTM), oferece um novo regime de conectividade capaz de articular núcleos urbanos dispersos sem depender da expansão da infraestrutura viária. Diferentemente de outras soluções de mobilidade, a UAM não exige obras pesadas nem altera a paisagem urbana consolidada. Sua operação em sobreposição aos eixos existentes permite racionalizar os fluxos urbanos e regionais sem induzir processos de adensamento predatório ou ocupação extensiva.

Figura 5: Anéis de conectividade aéreo/terrestre propostos pelo TransLab/UnB para Brasília e RIDE-DF.
Fonte: TransLab - UNB



O modelo proposto pelo TransLab/UnB organiza-se em três anéis concêntricos de conexão aérea, definidos com base em critérios morfológicos, funcionais e operacionais. O primeiro anel, de alta frequência e curta distância, conecta o Plano Piloto a bairros adjacentes, como Cruzeiro, Sudoeste, Guará e Lago Sul. O segundo anel abrange cidades-satélite com maior densidade populacional e centralidades secundárias

consolidadas, como Taguatinga, Ceilândia, Samambaia e Águas Claras. O terceiro anel, de média ou baixa frequência, alcança municípios da RIDE com perfil periurbano ou rural, como Planaltina de Goiás, Valparaíso e Padre Bernardo, incorporando zonas de produção agrícola e áreas de expansão urbana.
A lógica concêntrica da rede, combinada à segmentação vertical por classes de aeronaves e tipos de missão (passageiros, logística, serviços públicos), permite articular múltiplos escalões de demanda com eficiência operacional. A modularidade da infraestrutura - com vertihubs centrais, vertiports regionais e vertistops operacionais - garante flexibilidade na implantação e facilita a adaptação a distintas realidades territoriais.

Além dos ganhos logísticos, a UAM representa um instrumento de reorganização espacial, ao permitir que centros de serviços e polos de consumo se tornem acessíveis a partir das periferias, sem a necessidade de deslocamentos rodoviários longos e imprevisíveis. Essa inversão de acessibilidade contribui para reequilibrar o território metropolitano, promovendo não apenas mobilidade, mas também inclusão produtiva e coesão funcional.



Figura 6: Projeto Piloto de Corredor UAM proposto pelo TransLab/UNB para o Eixão de Brasília e Entorno
Fonte: TransLab-UNB

Brasília, por sua centralidade geográfica e institucional, e por dispor de capacidade técnica instalada, apresenta condições singulares para irradiar essa nova infraestrutura de conectividade. Ao se tornar ponto de origem e ancoragem da rede UAM, a capital federal deixa de operar isoladamente e passa a funcionar como nó integrador de uma lógica territorial distribuída, compatível com os princípios de eficiência, sustentabilidade e interoperabilidade que regem os sistemas de mobilidade do século XXI.
.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração da Mobilidade Aérea Urbana (UAM) ao planejamento territorial brasileiro exige não apenas soluções técnicas e regulatórias, mas também inflexões metodológicas que reposicionem o planejamento como prática multiescalar e sistêmica. O caso do Distrito Federal revela as potencialidades e os desafios dessa transição. Ao mesmo tempo em que apresenta limitações dos modelos viários herdados, o DF reúne as condições urbanas, técnicas e institucionais para liderar uma agenda de reorganização territorial ancorada no espaço aéreo.
A proposta de rede UAM estruturada pelo TransLab/UnB aponta para um modelo replicável, com potencial de impacto não apenas sobre a fluidez da mobilidade urbana, mas também sobre a coesão funcional do território metropolitano. Sua organização modular, sua compatibilidade normativa e sua lógica de camadas verticais tornam viável a ativação de corredores aéreos mesmo em contextos urbanos complexos, sem demandar intervenções físicas extensivas.
A adoção de diretrizes técnicas unificadas - a exemplo da ICA 100-37 (DECEA) e dos normativos da ANAC - permite mitigar a fragmentação regulatória que historicamente comprometeu a interoperabilidade dos sistemas de mobilidade brasileiros. A perspectiva de um ecossistema federativo de gestão de tráfego de baixa altitude (como o BR-UTM) reforça essa possibilidade, oferecendo uma infraestrutura normativa que, por operar em nível nacional, evita os bloqueios políticos e institucionais que travam o planejamento territorial nas escalas local e regional.
A experiência do Distrito Federal demonstra que a integração entre a Mobilidade Aérea Urbana e os sistemas de planejamento existentes exige coordenação normativa e visão estratégica, capazes de superar a fragmentação que caracteriza o modelo urbano-regional brasileiro. O desafio não reside apenas na implantação de uma nova infraestrutura modal, mas na construção de uma nova lógica de articulação espacial, que reconheça o espaço aéreo como vetor funcional de integração metropolitana. A proposta analisada reforça a viabilidade dessa inflexão, ao evidenciar que o DF reúne as condições institucionais, regulatórias e urbanas necessárias para inaugurar uma agenda de reorganização territorial ancorada em

corredores aéreos seguros, interoperáveis e compatíveis com os marcos regulatórios emergentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. M. de; BALBIM, R. A nova agenda do desenvolvimento urbano e os desafios do planejamento metropolitano no Brasil. Revista Paranaense de Desenvolvimento, v. 143, p. 99–114, 2022. https://doi.org/10.5380/rpd.v143i0.82470.

BRASIL. Estatuto da Cidade: Lei n.º 10.257, de 10 de julho de 2001. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2001.

CASTELLS, M. The Rise of the Network Society. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.

DECEA. ICA 100-37: Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo para Aeronaves Não Tripuladas. Rio de Janeiro: Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2022. Disponível em: https://www.decea.mil.br/publicacoes. Acesso em: 14 set. 2025.

DELFIM, A. C. Urbanização dispersa e políticas públicas: notas sobre mobilidade e fragmentação nas metrópoles brasileiras. Cadernos Metrópole, v. 22, n. 48, p. 147–164, 2020. https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4808.

FURTADO, T. Mobilidade aérea urbana no Brasil: desafios regulatórios e perspectivas de implantação. Boletim de Transporte Aéreo – IPEA, n. 53, p. 1–12, 2022.

GOMIDE, A.; PIRES, R. Capacidades estatais e democracia: arranjos institucionais de políticas públicas. Rio de Janeiro: IPEA, 2014.

IBGE. Indicadores de distribuição de renda e serviços na RIDE-DF. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021.

JATOBÁ, S. Deslocamentos pendulares na Brasília Metropolitana. In: PMAD – Pesquisa Metropolitana por Amostra de Domicílios. Brasília: SEDUH/GDF, 2018. Disponível em: https://www.seduh.df.gov.br/documents/8133848/9237941/Deslocamentos-Pendulares-S%C3%A9rgio-Jatob%C3%A1.pdf. Acesso em: 04 jul. 2025.

JATOBÁ, S. Influência urbana e econômica de Brasília. In: CODEPLAN. Seminário Regional: Estratégias de Desenvolvimento para a Região Geoeconômica de Brasília. Brasília: CODEPLAN, 2018. Disponível em: https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Sérgio-Jatobá.pdf. Acesso em: 04 jul. 2025.

KLINK, J. Região metropolitana: desafios da governança urbana no Brasil. São Paulo: Cortez, 2013.

KOPARDEKAR, P.; MURRAY, J.; KOCH, D. et al. Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM): Concept of Operations. NASA Ames Research Center, 2016. Disponível em: https://utm.arc.nasa.gov/docs. Acesso em: 14 set. 2025.

PDTU-DF. Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal – Relatório Executivo. Brasília: SEMOB/TC Urbes, 2019.

PMUS-DF. Plano de Mobilidade Urbana Sustentável do Distrito Federal. Brasília: Secretaria de Transporte e Mobilidade – SEMOB, 2021.

ROLNIK, R. Democracia no fio da navalha: limites e possibilidades para a gestão democrática das cidades no Brasil. Estudos Avançados, São Paulo, v. 25, n. 71, p. 87–100, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ea/a/VtVtPqztSnSNCGkCCmdQzHH. Acesso em: 14 set. 2025.

SOUZA, C. Coordenação federativa no Brasil: a experiência do Programa Nacional de Transporte Urbano. Revista Sociologia & Política, n. 26, p. 103–117, 2006.

U-SPACE. U-space Blueprint 2.0: European Framework for UAS Traffic Management. Cologne: European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2022.

VIANNA, M.; YOUNG, C. In search of lost time: quantifying congestion costs in the Federal District of Brazil. CESLA: International Latin American Studies Review, v. 20, p. 9–28, 2017.

YOVCHEVA, Z.; GILDEN, D.; SCHRÖDER, M. Urban Air Mobility in practice: planning challenges and policy recommendations. Transportation Research Procedia, v. 62, p. 79–87, 2022.

Emilia Stenzel (e.stenzel@me.com)
UnB, Faculdade de Ciências da Informação, PPGINF, (Campus Univ. Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF, Brasil.
Li Weigang (weigang@unb.br)
UnB, Instituto de Ciencias Exatas, PPGI, (ICC, Ala Sul, Piso Superior, Sala A1-145)

DESAFIOS DA MOBILIDADE EM CIDADES HISTÓRICAS: APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE CAMINHABILIDADE DE CENTROS URBANOS HISTÓRICOS (ICCH) EM CONGONHAS (MG)

Daniela Antunes Lessa[1], **Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos**[2], **Mateus Gonçalves da Silva**[1]
[1]Universidade Federal de Ouro Preto, [2]Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
A preservação do patrimônio histórico-cultural colonial impõe desafios significativos à mobilidade e acessibilidade urbana em cidades como Congonhas (MG). Este estudo teve como objetivo avaliar a caminhabilidade da região central e do eixo histórico, identificando as principais limitações e potencialidades do espaço urbano para a mobilidade a pé em contexto patrimonial, além de subsidiar estratégias que promovam a inclusão social e a qualificação dos espaços públicos. A qualidade do ambiente para deslocamentos a pé foi considerada elemento fundamental para a mobilidade sustentável e a saúde pública. Para tanto, aplicou-se o Índice de Caminhabilidade em Contextos Históricos (ICCH), metodologia específica para áreas patrimoniais, com foco na experiência dos pedestres. Os resultados indicaram baixo desempenho geral, evidenciando limitações típicas de cidades coloniais, especialmente para pessoas com mobilidade reduzida. Esses achados ressaltam a necessidade de estratégias urbanas que priorizem a caminhabilidade, promovendo inclusão e qualificação dos espaços públicos em contextos históricos complexos.

1. FUNDAMENTOS E DESAFIOS DA CAMINHABILIDADE EM CENTROS HISTÓRICOS

A caminhabilidade expressa a qualidade dos espaços urbanos para o deslocamento a pé, sendo influenciada por aspectos como infraestrutura, conforto, segurança e condições sociais dos indivíduos (Vegi et al., 2020). Mais do que calçadas, ela depende de ambientes que acolham o pedestre, com pavimentação adequada, sinalização acessível e espaços seguros — elementos essenciais para cidades inclusivas e sustentáveis (Jacobs, 2000; Santos, 2023). Cidades como Copenhague e Helsinque são referências por investirem em bairros compactos e acessíveis, reduzindo a dependência do automóvel (WRI Brasil, 2019). Caminhar não é apenas um modo de transporte, mas também uma experiência cultural e afetiva. Como destaca Solnit (2016), o ato de caminhar constrói caminhos, narrativas e vínculos com o território. Para que essa vivência seja plena, o espaço urbano deve oferecer infraestrutura segura, estímulos visuais, áreas verdes, mobiliário e oportunidades de interação social (Speck, 2016). Exemplos como Amsterdã, que limita a velocidade nas áreas centrais, e Hamburgo, com sua Rede Verde que conecta parques e espaços públicos, ilustram como o planejamento voltado à mobilidade ativa amplia a sustentabilidade, a saúde e a qualidade de vida (WRI Brasil, 2019).

A caminhabilidade tem sido cada vez mais reconhecida como estratégia central para promover a mobilidade urbana sustentável e orientar intervenções no espaço público. Diversos índices foram desenvolvidos desde os anos 1990 para mensurar suas dimensões, como o Índice de Caminhabilidade (IC) de Bradshaw e o Global Walkability Index (Krambeck, 2006), além de ferramentas mais recentes como o Walkability Index de Toronto (Glazier et al., 2012) e o de Sydney (Mayne et al., 2013). No Brasil, estudos semelhantes foram aplicados em Blumenau, Salvador e São Paulo (Siebert e Lorenzini, 1998; Giannotti et al., 2017), além de abordagens específicas para calçadas (Nanya, 2016), acessibilidade de idosos (Andrade; Linke, 2017) e o iCam 2.0 no Rio de Janeiro (ITDP Brasil, 2018). A Nova Agenda Urbana e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 11, reforçam a importância da mobilidade ativa como base para cidades seguras, inclusivas e resilientes (ONU, 2024). Nos centros históricos, essa tarefa é ainda mais complexa, pois é necessário conciliar a preservação do patrimônio cultural com a oferta de espaços acessíveis e seguros para todos — incluindo crianças, idosos e pessoas com deficiência (Santos, 2023; Silva, 2023; Santos, 2025).

Diante desse cenário, torna-se indispensável utilizar metodologias sensíveis às especificidades dos contextos patrimoniais. O Índice de Caminhabilidade para Centros Históricos (ICCH), proposto por Matos et al. (2021), é uma ferramenta criada com esse propósito. Sua aplicação em cidades como Ouro Preto, São João del-Rei, Mariana e Tiradentes tem orientado políticas públicas voltadas à qualificação dos espaços urbanos (Oliveira et al., 2022; Gonçalves, 2023; Oliveira et al., 2024). Em Ouro Preto, os resultados do ICCH foram incorporados à revisão do Plano Diretor de 2022, consolidando diretrizes para a mobilidade ativa em áreas protegidas. Este artigo aplica o ICCH à cidade de Congonhas (MG), Patrimônio Cultural da Humanidade, para avaliar as condições de caminhabilidade em seu centro histórico. O objetivo é identificar limitações e potencialidades da mobilidade a pé, subsidiando estratégias que conciliem preservação cultural, inclusão social e sustentabilidade urbana. Fundada no final do século XVII, Congonhas destaca-se pela presença do Santuário do Senhor Bom Jesus de Matozinhos e pela convivência entre patrimônio histórico e dinâmica urbana, o que torna o município

um caso exemplar para a reflexão sobre os desafios contemporâneos da caminhabilidade em contextos históricos (Prefeitura de Congonhas, 2025).

2. METODOLOGIA

Para avaliar a caminhabilidade do centro histórico de Congonhas (MG), foi aplicado o método proposto por Matos *et al*. (2021), composto por 15 parâmetros organizados em cinco categorias (Quadro 1) e uma escala de avaliação que varia de 1 (condição mais crítica) a 4 (cenário ideal). A análise foi realizada em 27 de agosto de 2024 em segmentos de até 150 metros, combinando o estudo em campo com ferramentas de geoprocessamento (QGIS, *Google Earth*, *Google Street View*) para registro e sistematização das informações. As notas atribuídas a cada parâmetro são consolidadas por meio de média aritmética, tanto por categoria quanto no resultado final, conforme descrito na Tabela 1.

Quadro 1: Categorias e os respectivos parâmetros do ICCH.

Categoria	Calçada	Ambiente	Segurança	Uso do solo	Conectividade
Parâmetros	Largura efetiva do passeio Pavimentação da calçada Acessibilidade na calçada	Inclinação longitudinal Proteção contra intempéries Limpeza	Travessias Tipologia da rua Iluminação	Uso misto do solo Atratividade visual Assentos Sinalização orientativa	Acesso ao transporte coletivo Infraestrutura cicloviária

Fonte: Matos *et al.* (2021).

Tabela 1: Intervalos de classificação das notas do ICCH.

Classificação	Péssimo	Ruim	Bom	Ótimo
Intervalo	$1{,}00 \leq x < 1{,}75$	$1{,}75 \leq x < 2{,}50$	$2{,}50 \leq x < 3{,}25$	$3{,}25 \leq x < 4{,}00$

Fonte: Santos (2023).

A área de estudo foi subdividida em 144 segmentos de análise, abrangendo trechos de calçadas na Avenida Júlia Kubitschek, Avenida Marechal Floriano Peixoto, Rua Bom Jesus e no entorno do conjunto patrimonial da Praça do Santuário e da Alameda Cidade de Matozinhos de Portugal (Figura 1). Cada unidade corresponde a um segmento de calçada entre cruzamentos, incluindo também as fachadas das quadras adjacentes, conforme definição proposta por Matos *et al*. (2021).

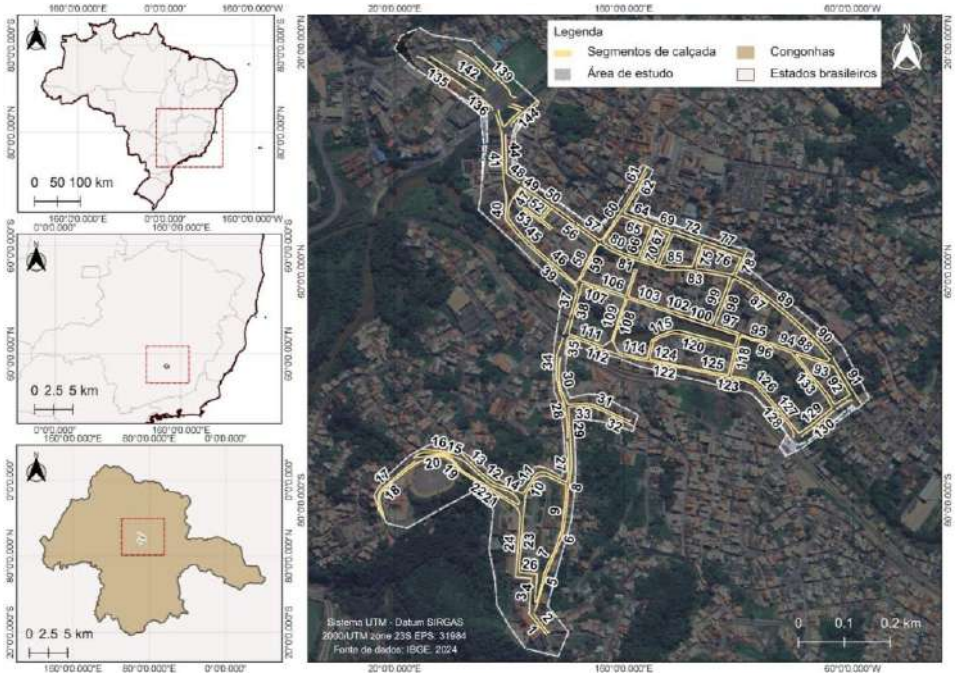


Figura 1: Mapa de localização dos segmentos analisados.
Fonte: Elaboração própria.

3. RESULTADOS

A aplicação do ICCH em Congonhas revelou deficiências na infraestrutura para pedestres, como calçadas estreitas, pavimentação precária, ausência de abrigo e travessias inseguras. Apesar disso, o diagnóstico indicou oportunidades de melhorias e orientou diretrizes preliminares para qualificar os espaços públicos e ampliar a segurança, com base em boas práticas nacionais. A média geral foi 2,31, considerada ruim, destacando desafios, sobretudo na acessibilidade, com falta de pisos táteis e rebaixamentos. Na sequência, a análise detalha os resultados por categoria, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Avaliação dos Parâmetros de Caminhabilidade em Congonhas, segundo o ICCH.

Categorias	Parâmetros	Nota da Categoria	Estatísticas			
			Média	Moda	% Moda	Mediana
Calçada	Largura da calçada	1,8	2,1	2,0	64%	2,0
	Pavimentação da calçada		2,2	1,0	43%	2,0
	Acessibilidade na calçada		1,2	1,0	78%	1,0
Ambiente	Inclinação longitudinal	2,5	2,7	4,0	46%	3,0
	Proteção contra intempéries		1,3	1,0	87%	1,0
	Limpeza		3,7	4,0	68%	4,0
Segurança	Travessias	1,6	1,5	1,0	56%	1,0
	Tipologia da rua		1,9	1,0	46%	2,0
	Iluminação		1,4	1,0	69%	1,0
Atratividade	Uso misto do solo	1,6	2,2	1,0	36%	2,0
	Atratividade visual		2,0	1,0	38%	2,0
	Sinalização orientativa		1,1	1,0	94%	1,0
	Assentos		1,2	1,0	92%	1,0
Conectividade	Acesso ao transporte coletivo	4,0	4,0	4,0	99%	4,0
	Infraestrutura cicloviária		4,0	4,0	99%	4,0

Fonte: Elaboração própria.

Na categoria Calçada, a média geral foi 1,8, indicando condições ruins para circulação segura em Congonhas. A largura apresentou média de 2,1, suficiente apenas para fluxos reduzidos, o que compromete a segurança de pessoas idosas, com deficiência e crianças em trechos mais movimentados. A pavimentação teve média de 2,2, mas a moda 1,0 em 43% dos casos revela muitos trechos com pisos danificados e escorregadios, elevando o risco de quedas. A acessibilidade foi o parâmetro mais crítico, com média de 1,2 e 78% dos trechos sem itens básicos, como rebaixos e pisos táteis. Diante disso, recomenda-se largura mínima de 1,20 metros (ABNT, 2020) e pavimentos em bom estado, aliados a soluções que conciliem preservação e acessibilidade, como demonstram experiências no centro de Salvador.



Figura 2: Praça do Santuário (seg. 23).
Fonte: Acervo dos autores (2024).



Figura 3: Pavimentação (Salvador/BA).
Fonte: Acervo dos autores (2024).

Na categoria Ambiente, a média foi 2,5, indicando condições medianas com pontos críticos. A inclinação longitudinal apresentou média de 2,7, evidenciando desníveis que dificultam a mobilidade de idosos, pessoas com deficiência e cadeirantes, exigindo rampas e corrimãos. A proteção contra intempéries teve desempenho baixo (média 1,3), refletindo a quase ausência de cobertura ou arborização, o que prejudica o conforto térmico, embora soluções discretas possam ser adotadas em áreas tombadas. A limpeza destacou-se positivamente (média 3,7), contribuindo para o bem-estar. Já a categoria Segurança teve desempenho péssimo (média 1,6), com 56% das travessias sem sinalização adequada, ruas com tráfego intenso e pouca proteção, e iluminação insuficiente em 69% dos locais, comprometendo a segurança, especialmente de grupos vulneráveis. Recomenda-se limitar declividades a 5%, ampliar cobertura para conforto climático, garantir travessias

seguras, controle de velocidade e iluminação eficiente que respeite o patrimônio histórico, priorizando espaços compartilhados e zonas de pedestres para promover segurança e convivência urbana.

A categoria Atratividade obteve média geral de 1,6 (péssimo), indicando a falta de elementos que tornem o espaço urbano mais convidativo, seguro e funcional. O uso misto do solo, com média de 2,2, é baixo, resultando em ambientes pouco dinâmicos e menos seguros, devido à predominância de funções isoladas que reduzem a circulação contínua de pessoas. A atratividade visual, média 2,0, revela espaços sem identidade ou paisagismo, prejudicando a experiência do pedestre e a sensação de segurança. A sinalização orientativa, com a menor média (1,1), quase inexistente, limita a autonomia de pedestres, especialmente idosos e pessoas com mobilidade reduzida. Além disso, a média de 1,2 para assentos mostra ausência de mobiliário urbano, dificultando o conforto e a permanência no espaço público. Recomenda-se incentivar o uso misto do solo, qualificar fachadas e paisagens, implantar sinalização acessível e instalar assentos regulares, promovendo espaços urbanos ativos, diversos e acolhedores, essenciais para segurança e convivência social.

Por fim, a categoria Conectividade obteve média 4,0 (ótimo), sendo a única com avaliação ideal. Contudo, a distribuição dos pontos de embarque e desembarque de ônibus (PEDs) é desigual, evidenciando a necessidade de integração entre as escalas micro e macro no planejamento urbano. Esse bom desempenho, apesar das fragilidades em Atratividade e Segurança, representa uma oportunidade para melhorar a mobilidade por meio da redistribuição dos PEDs, criação de estações intermodais e expansão de rotas cicláveis, tornando os deslocamentos mais eficientes e sustentáveis. Speck (2016) destaca que o transporte público eficiente depende da localização adequada das paradas, acesso claro, alta frequência e conforto, além de abrigos, informações acessíveis e integração tarifária. Para a mobilidade ativa, redes cicloviárias devem ser contínuas, seguras e conectadas aos principais destinos, eliminando conflitos com veículos motorizados. Assim, apesar dos bons resultados na área avaliada, é fundamental superar limitações na escala urbana maior, consolidando uma rede integrada que torne a mobilidade em Congonhas mais funcional, segura e acessível.

4. CONCLUSÕES

A mobilidade urbana, alinhada aos princípios da Nova Agenda Urbana e do ODS 11, é fundamental para cidades mais inclusivas e sustentáveis, sendo a caminhabilidade um elemento-chave nesse processo por promover acessibilidade, equidade e interação social. Em Congonhas, cidade de relevância histórica, desafios como ruas estreitas, topografia acentuada e conservação patrimonial exigem soluções específicas, sendo o Índice de Caminhabilidade para Centros Históricos (ICCH) uma ferramenta essencial para diagnosticar e orientar melhorias na mobilidade ativa. A aplicação do ICCH revelou fragilidades na infraestrutura de calçadas, segurança viária e atratividade urbana, com calçadas estreitas, pavimentação precária, ausência de elementos de acessibilidade, iluminação deficiente e travessias inseguras, comprometendo especialmente a mobilidade de pessoas com restrições físicas. Apesar dos avanços na conectividade local, como o acesso ao transporte coletivo e à infraestrutura cicloviária, problemas como a má distribuição dos pontos de ônibus e a presença de áreas sujeitas a inundação limitam a efetividade desse sistema. Assim, tornar Congonhas uma cidade mais caminhável exige ações integradas que articulem mobilidade, acessibilidade, segurança e preservação, fortalecendo o desenvolvimento urbano sustentável e garantindo o direito de todos ao espaço urbano.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo fomento à pesquisa, aos programas de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes da UFMG e em Engenharia Ambiental da UFOP. Além das contribuições do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da UFOP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2020) NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Associação Brasileiras de Normas Técnicas, Rio de Janeiro; ABNT.

Andrade, V.; C. C. Linke (2017) *Cidades de pedestres: A caminhabilidade no Brasil e no mundo.* Rio de Janeiro: Babilonia Cultura Editorial.

Giannotti, M. A.; M. H. Andrade; M. K. Harkot e P. F. Santoro (2017) *Gênero e andar a pé: a qualidade do ambiente construído incentiva igualmente mulheres e homens a caminhar?* In: Cidades de pedestres: a caminhabilidade no Brasil e no mundo. Rio de Janeiro: Babilonia Cultura Editorial.

Glazier, R. H.; J. T. Weyman; M. I. Creatore; P. Gozdyra; R. Moineddin; F. I. Matheson; J. R. Dunn e G. L Booth. (2012)

Development and validation of an urban walkability index for Toronto, Canada. Toronto Community Health Profiles Partnership, Canada, p. 1-21.

ITDP Brasil (2018) *Índice de Caminhabilidade Versão 2.0 – Ferramenta*. Disponível em: https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2019/05/Caminhabilidade_Volume-3_Ferramenta-ALTA.pdf (acesso em 15/06/2025).

Jacobs, J. (2000) *Morte e vida de grandes cidades*. São Paulo: Martins Fontes.

Krambeck, H. V. (2006) *The global walkability index*. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts.

Matos, B. A.; A. L. R. S. Santos e M. G. Silva (2021) Caminhabilidade nas cidades históricas: um estudo para o centro urbano histórico de Glaura, em Ouro Preto (MG). *In: Congresso Rio de Transportes*, 18, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, RJ: RDT.

Mayne, D. J.; G. G. Morgan; A. Willmore; N. Rose; B. Jalaludin; H. Bambrick e A. Bauman. (2013) An objective index of walkability for research and planning in the Sydney Metropolitan Region of New South Wales, Australia: an ecological study. *International Journal of Health Geographics*. Australia. 12 (1), 61.

Nanya, L. M. (2016) *Desenvolvimento de um instrumento para auditoria da caminhabilidade em áreas escolares*. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 150 f.

ONU - Organização das Nações Unidas (2024) *The 17 Goals: Sustainable Development Goals*. Disponível em: https://sdgs.un.org/goals (acesso em 16/06/2025).

Prefeitura de Congonhas (2025) Patrimônio histórico. Disponível em: https://www.congonhas.mg.gov.br/index.php/patrimonio-historico/. (acesso em 16/06/2025).

Santos, A. L. R. S. (2023) *Adaptação do Índice de Caminhabilidade de Centros Urbanos Históricos (ICCH) sob a ótica das crianças*. Monografia (graduação). Bacharelado em Engenharia Urbana, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto (Minas Gerais). Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/83767 (acesso em 16/06/2025).

Santos, A. L. R. S. (2025) *Geodesign para o planejamento da caminhabilidade de pessoas idosas em Ouro Preto (Minas Gerais)*. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte (Minas Gerais). Disponível em: https://hdl.handle.net/1843/83767 (acesso em 16/06/2025).

Siebert, C. e L. Lorenzini (1998). *Caminhabilidade: Uma proposta de Aferição Científica*. Dynamis. Blumenau: Editora da FURB, vol. 6, n. 23, abril/junho, p. 89-106.

Solnit, R. (2016) *A história do caminhar*. Tradução Maria do Carmo Zanini. São Paulo: Martins Fontes. 510p.

Speck, J. (2016) *Cidade caminhável.* Tradução Anita Dimarco, Anita Natividade. 1ª ed. São Paulo: Perspectiva. 272p.

Vegi, A. S. F.; E. I. Fernandes Filho; M. C. Pessoa; K. L. Ramos e A. Q. Ribeiro (2020) Caminhabilidade e envelhecimento saudável: uma proposta de análise para cidades brasileiras de pequeno e médio porte. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 36. São Paulo.

WRI Brasil (2019) *5 exemplos de caminhabilidade*. In: Caccia, L. (2019) Programa de Cidades. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/5-exemplos-de-caminhabilidade (acesso em 16/06/2025).

Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos (analuizarss.ufmg@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha – Belo Horizonte, MG, Brasil
Daniela Antunes Lessa (daniela.lessa@aluno.ufop.edu.br)
Mateus Gonçalves da Silva (mateus.goncalves@aluno.ufop.edu.br)
Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro – Ouro Preto, MG, Brasil

DISPARIDADES NA CAMINHABILIDADE DA POPULAÇÃO IDOSA DE SÃO PAULO, SP

Jefferson Ramon Lima Magalhães, Licinio da Silva Portugal, Laura Silvia Bahiense da Silva Leite
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
A caminhabilidade é um elemento-chave para a criação de cidades amigáveis às pessoas idosas, sobretudo em contextos de rápido envelhecimento populacional e fortemente orientados ao automóvel, como ocorre nas cidades brasileiras. Este artigo analisa disparidades na caminhabilidade da população idosa de 343 zonas origem-destino (OD) do município de São Paulo, SP. Os resultados obtidos revelam alta caminhabilidade na região Central e adjacências nas regiões Oeste e Leste e baixa caminhabilidade nas periferias das regiões Norte, Sul e Leste. Os padrões espaciais indicam que zonas OD de alta caminhabilidade podem ter altos ou baixos percentuais de pessoas idosas. Por fim, altos percentuais de pessoas idosas estão associados positivamente à presença de praças e parques públicos com assentos, faixas de pedestres e iluminação pública e associados negativamente ao número de lojas a varejo. Os resultados obtidos fornecem subsídios para a promoção da caminhabilidade de pessoas idosas no município de São Paulo, SP.

1. INTRODUÇÃO

A caminhabilidade é um atributo que define o quão convidativos espaços públicos, bairros e cidades podem ser para experiências positivas de circulação a pé (Bradshaw, 1993, Talen e Koschinsky, 2013). Ambientes caminháveis de alta qualidade promovem a indução de maiores níveis de atividade física, a criação de novas alternativas de transporte sustentável e a coesão social de comunidades (Forsyth, 2015). Tais benefícios devem ser garantidos a todas as pessoas, sobretudo a grupos populacionais vulneráveis.

Experiências de países com envelhecimento populacional avançado, principalmente na Europa, mostram que políticas de promoção da caminhabilidade estão entre as estratégias adotadas para a criação de cidades favoráveis ao envelhecimento ativo (Johnson *et al.*, 2017). No Brasil, a iniciativa Estratégia Brasil Amigo da Pessoa Idosa (EBAPI) constitui um marco importante para a inserção da caminhabilidade nas discussões sobre o envelhecimento populacional (Brasil, 2018). Isto é crucial para a criação de ambientes urbanos livres de barreiras à acessibilidade e à mobilidade de pessoas idosas, conferindo-lhes qualidade de vida e inclusão social.

O rápido envelhecimento populacional brasileiro motiva o estudo da caminhabilidade de pessoas idosas, porém os resultados são limitados a cidades das regiões Sul e Sudeste. Todavia, a acessibilidade de pessoas idosas a elementos de microcaminhabilidade, associados a atributos do ambiente do pedestre como segurança, conforto e atratividade, é uma lacuna de literatura importante. Evidências nacionais mostram que fatores de conforto, como presença de calçadas, fatores de segurança, como iluminação pública, faixas de pedestres e segurança para caminhar durante o dia, e fatores de atratividade, como proximidade a praças e parques (Paiva Neto *et al*., 2021) e comércio e serviços (Magalhães *et al*., 2024), estão associados à caminhabilidade da população idosa. Visando preencher a lacuna identificada, este artigo apresenta uma análise espacial da caminhabilidade de pessoas idosas em São Paulo, SP (~2,2 milhões ou 17,7% da população 60+ anos) (IBGE, 2022).

2. MÉTODOS

2.1. Environmental Index Modificado (EI')

O índice de caminhabilidade de pessoas idosas *Environmental Index* (EI) (Van Cauwenberg *et al*., 2013) foi escolhido para analisar a caminhabilidade das 343 zonas OD de São Paulo, SP, a partir de componentes relacionados a atributos do ambiente do pedestre. Entretanto, para capturar melhor a variabilidade do ambiente construído, EI sofreu modificações quanto às formas de mensuração de algumas variáveis e de cálculo da caminhabilidade. Assim, EI modificado (ou apenas EI') é dado pela Eq. 1:

$$\begin{aligned} EI' = {} & \text{escore-Z (edifícios acessíveis)} + \text{escore-Z (praças e parques públicos com assentos)} + \\ & \text{escore-Z (número de lojas)} + \text{escore-Z (faixas de pedestres)} + \text{escore-Z (paradas/estações} \\ & \text{de transporte público)} + \text{escore-Z (iluminação pública)} - \text{escore-Z (criminalidade)} \end{aligned} \quad (1)$$

Para calcular EI' a nível de zona OD, *shapefiles* com as geolocalizações de edifícios com selo de acessibilidade arquitetônica, pontos de ônibus, estações de trem e metrô e postes de iluminação pública foram obtidos do repositório digital GeoSampa (Prefeitura de São Paulo, 2023). Os totais de faixas de pedestres foram obtidos

a partir de dados geolocalizados no *OpenStreetMap* (OpenStreetMap Contributors, 2023). Quanto à criminalidade, os totais de roubos e homicídios em São Paulo, SP, em 2023, foram obtidos no *site* da Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública de São Paulo (SSP/SP, 2023). Os totais de praças e parques públicos com assentos foram identificados através de análises de imagens do *Google Street View* (Google Maps, 2023). Os totais de comércio a varejo por distrito foram obtidos no *site* SP Negócios (SP Negócios, 2022), os quais foram desagregados para o nível de zona OD a partir de ponderação baseada na população. O *software* QGIS 3.34.4 (QGIS Development Team, 2024) foi utilizado na criação de *shapefiles* para parte dos componentes de EI'.

2.2. População idosa do município de São Paulo, SP

Os percentuais de pessoas com 60 anos ou mais das 343 zonas OD da capital paulista foram obtidos da Pesquisa Origem-Destino 2023 da Região Metropolitana de São Paulo (Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2025), que foram importados para um *shapefile* criado no QGIS 3.34.4 (QGIS Development Team, 2024).

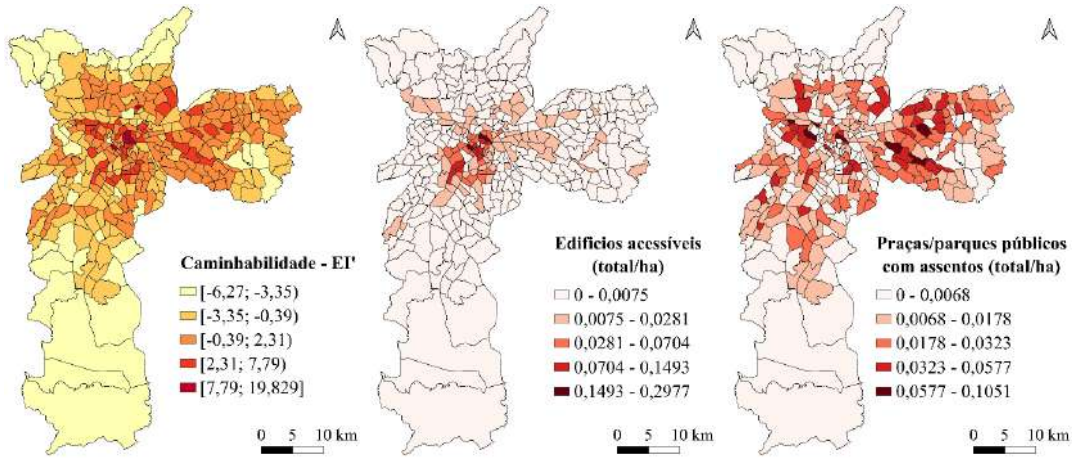
2.3. Procedimento de análise

A análise espacial da relação entre as distribuições de caminhabilidade (EI') e da população idosa de 343 zonas OD de São Paulo, SP, é feita em três etapas, conforme o estudo de Magalhães *et al*. (2024). Inicialmente, as distribuições espaciais de EI' e da população idosa são determinadas a partir das estimativas de EI' e dos dados dos percentuais de pessoas idosas por zona OD. Em seguida, indicadores locais bivariados de associações espaciais (BiLISA) (Anselin, 1995) são aplicados para identificar quatro padrões espaciais: (i) *clusters* alto percentual de pessoas idosas-alto EI'; (ii) *clusters* baixo percentual de pessoas idosas-baixo EI'; (iii) *outliers* baixo percentual de pessoas idosas-alto EI'; e (iv) *outliers* alto percentual de pessoas idosas-baixo EI'. Finalmente, o acesso de pessoas idosas a elementos do ambiente construído é analisado por meio de um modelo de regressão espacial. Para isto, a dependência espacial é incluída por meio de uma matriz espacial com pesos de primeira ordem e contiguidade da rainha. A escolha do modelo de regressão espacial (*e.g*., modelo de defasagem espacial, modelo de erro espacial) baseia-se no teste de multiplicadores de Lagrange (Breusch e Pagan, 1980). Os *softwares* QGIS 3.34.4 (QGIS Development Team, 2024) e GeoDa (Anselin *et al*., 2006) foram utilizados no cálculo de EI' e nas análises espaciais (BiLISA e regressão espacial), respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Distribuições espaciais de caminhabilidade e da população idosa

A Figura 1 apresenta as distribuições espaciais de EI' e respectivos componentes e da população idosa de São Paulo, SP. EI' variou entre -6,27, em Vista Alegre (Brasilândia), e 19,83, na Praça João Mendes (Sé). Entre as zonas OD povoadas, os percentuais de pessoas idosas variaram entre 9,16% (Parque Morro Doce, Anhanguera) e 31,6% (Alto de Pinheiros, distrito homônimo). Em geral, as zonas OD mais caminháveis estão situadas nas regiões Central e Oeste, e o inverso ocorre sobretudo nas periferias das regiões Norte e Sul. Além disso, a concentração dos componentes de EI' tende a decrescer de maneira não-uniforme com o aumento da distância ao Centro Histórico, sendo os extremos Sul, Norte e Leste as áreas mais desprovidas.



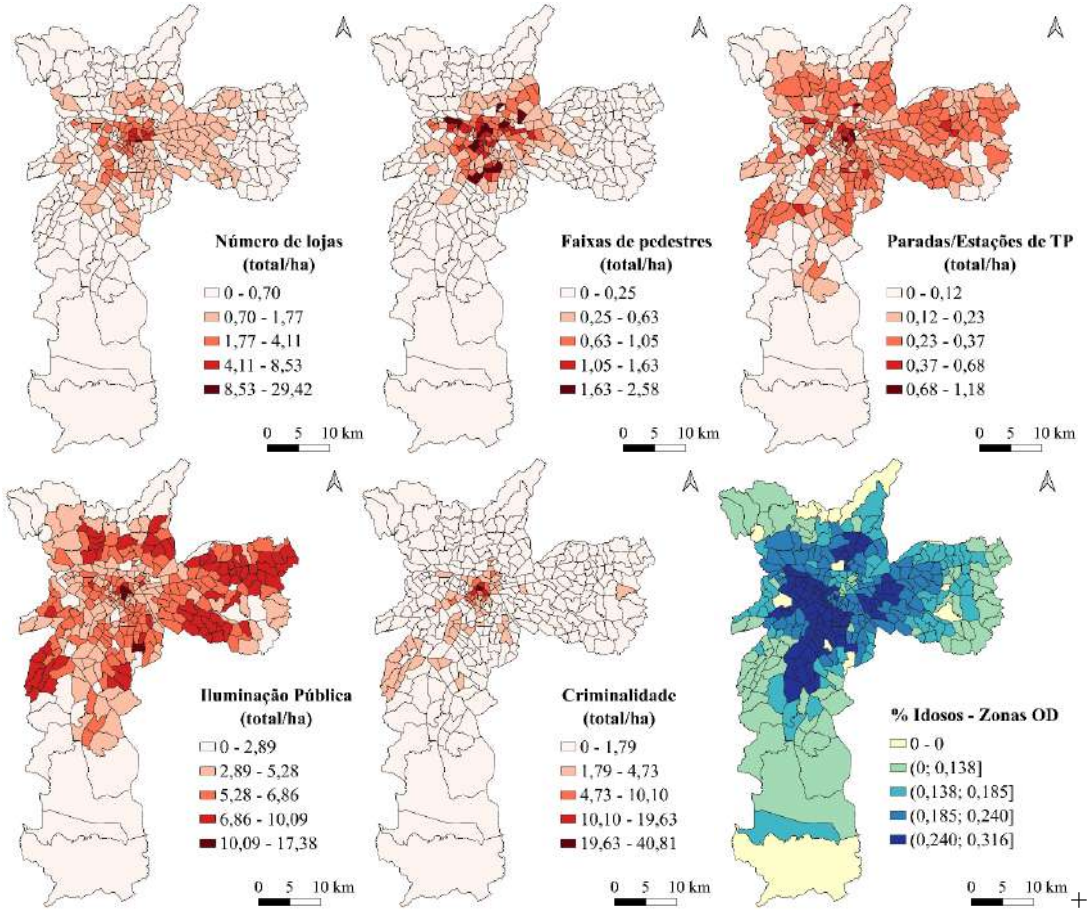


Figura 1: Distribuições espaciais de EI' e respectivos componentes e da população idosa

3.2. Padrões espaciais – População idosa x Caminhabilidade

A Figura 2 apresenta os padrões espaciais identificados por meio do BiLISA. *Clusters* alto-alto são formados por zonas OD de média a alta renda nas porções sudoeste e sul da região Central e partes das regiões Oeste e Leste, enquanto *clusters* baixo-baixo englobam zonas OD de baixa renda (incluindo favelas) das regiões Norte, Sul e Leste e de baixa a média renda da região Oeste, e áreas inabitadas nas regiões Norte e Sul. Por sua vez, *outliers* baixo-alto englobam parte do Centro Histórico e zonas OD adjacentes na região Leste e *outliers* alto-baixo estão dispersos nas regiões Norte e Sul. Maiores correlações entre os percentuais de pessoas idosas e EI' ($p<0,001$) foram identificados na região central e em zonas OD periféricas das regiões Norte e Sul.

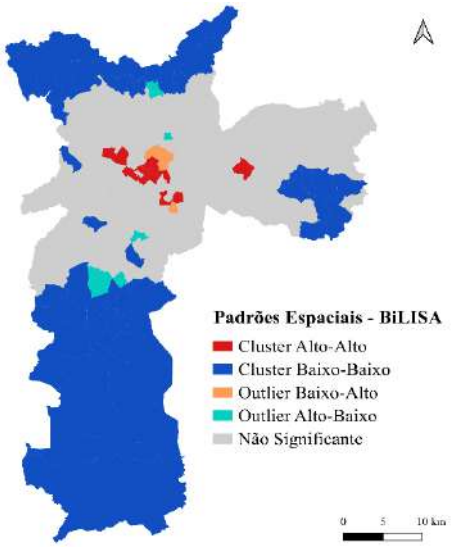


Figura 2: Padrões espaciais de população idosa e caminhabilidade

3.3. Acessibilidade a elementos do ambiente construído

A Tabela 1 apresenta as medidas de ajuste e o diagnóstico para dependência espacial do modelo de regressão linear múltipla (OLS) que relaciona os percentuais de pessoas idosas e EI'. Dado que, ao nível de significância de 0,05, LM (Lag), LM (Error) e Robust LM (Lag) são significativos e Robust LM (Error) não é significativo, o modelo de defasagem espacial foi escolhido para lidar com a autocorrelação espacial na distribuição da população idosa [I_1=0,403, pseudovalor-p<0,001].

Tabela 1: Qualidade do ajuste da regressão linear múltipla e diagnóstico para dependência espacial

Qualidade do ajuste		**Diagnóstico para dependência espacial**			
	Valor (Sig.)	**Teste**	**Valor (Sig.)**	**Teste**	**Valor (Sig.)**
R^2 ajustado	0,274	LM (Lag)	12,847(***)	LM (Error)	152,069(***)
Estatística F	19,519(***)	Robust LM (Lag)	197,324(***)	Robust LM (Error)	0,486
AIC	-964,368			Moran Global dos resíduos	0,403(***)

Notas: * p < 0,05; *** p < 0,001; AIC = Critério de Informação de Akaike.

A Tabela 2 apresenta os resultados do ajuste do modelo de defasagem espacial. Zonas OD com maiores percentuais de pessoas idosas estão associadas positivamente às quantidades de praças e parques públicos com assentos [β_2=0,007, p<0,05], faixas de pedestres [β_4=0,014, p<0,001] e postes de iluminação pública [β_5=0,014, p<0,001] e associadas negativamente à quantidade de lojas a varejo [β_3=-0,007, p<0,05]. As medidas de qualidade do ajuste indicam que a defasagem espacial melhorou o modelo inicial, com aumento de R^2 e reduções de AIC e da autocorrelação espacial [I=-0,036, pseudovalor-p>0,05] para próximo de zero.

Tabela 2: Resultados do ajuste do modelo de defasagem espacial

Variável	**Coeficiente**	**valor-p**	**Qualidade do ajuste**	
Constante	0,053	0,000	Pseudo-R^2 ajustado	0,616
Edifícios acessíveis	-0,001	0,747	AIC	-1125,155
Praças e parques públicos com assentos	**0,007**	**0,004**	Moran Global dos resíduos	-0,036
Número de lojas	**-0,007**	**0,018**		
Faixas de pedestres	**0,015**	**0,000**		
Paradas/estações de transporte público	-0,001	0,776		
Iluminação pública	**0,013**	**0,000**		
Criminalidade	-0,004	0,236		
Wy Global	0,711	0,000		

Nota: AIC = Critério de Informação de Akaike.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise espacial de disparidades na caminhabilidade da população idosa no município de São Paulo, SP. Os resultados obtidos revelam que a distribuição da caminhabilidade reforça contrastes entre áreas de média a alta renda muito caminháveis nas regiões Central e Oeste e áreas periféricas de baixa renda pouco caminháveis nas regiões Norte, Sul e Leste. Contudo, ambientes caminháveis de alta qualidade podem ser encontradas em zonas OD com altas ou baixas concentrações de pessoas idosas.

Os resultados obtidos mostram a importância de considerar elementos de microcaminhabilidade ao analisar disparidades na caminhabilidade entre a população idosa. Para São Paulo, SP, zonas OD com altos percentuais de pessoas idosas destacam-se por quantidades acima da média de postes de iluminação pública, faixas de pedestres e praças e parques públicos com assentos, ao passo que zonas OD com baixos percentuais de pessoas idosas destacam-se por quantidades acima da média de lojas a varejo. Isto reforça, em grande parte, resultados de um estudo longitudinal em Florianópolis, SC (Paiva Neto *et al*., 2021). Porém, a associação negativa com o comércio varejista diverge de um estudo no Rio de Janeiro, RJ (Magalhães *et al*., 2024), o que pode ser explicado pela forte concentração de comércio varejista no Centro Histórico e no Brás (*outlier* baixo-alto).

Este estudo possui limitações. A indisponibilidade de dados georreferenciados para o comércio varejista impossibilitou a operacionalização de EI' para avaliar a caminhabilidade de segmentos de calçada, o que foi parcialmente contornado por meio de estimativas agregadas a nível de zona OD. Além disso, o uso de valores ponderados pela população de cada zona OD para determinar o número de lojas a varejo pode ter levado à ocorrência do Problema de Unidade de Área Modificável nas estimativas dos parâmetros de regressão espacial. Entretanto, destaca-se a capacidade de EI' de capturar a variabilidade do ambiente construído da área de estudo.

Recomendações para futuros estudos consistem no refinamento do procedimento apresentado para permitir a análise conjunta da macrocaminhabilidade (*i.e.*, forma urbana) e a microcaminhabilidade (*i.e.*, elementos do ambiente do pedestre na escala da rua) na ocorrência de desigualdades na caminhabilidade de pessoas idosas. Todavia, a indisponibilidade de dados georreferenciados relacionados à caminhada, comuns a muitos municípios brasileiros, pode aumentar os esforços para a aplicação de EI' em outros contextos.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

Anselin, L. (1995) Local Indicators of Spatial Association LISA. *Geographical Analysis*, v. 27, p. 93-115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

Anselin, L.; Syabri, I. e Kho, Y. (2006) GeoDa: An introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, v. 38, n. 1, p. 5-22. DOI: 10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x

Bradshaw, C. (1993) Creating -- And Using -- A Rating System For Neighborhood Walkability Towards An Agenda For "Local Heroes". In Proceedings of 14th International Pedestrian Conference (Boulder, CO, Estados Unidos).

Brasil (2018) *Estratégia Brasil Amigo da Pessoa Idosa*. Ministério do Desenvolvimento Social, Brasília, DF.

Breusch, T. S. e Pagan, A. R. (1980) The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics. *The Review of Economic Studies*, v. 47, n. 1, p. 239–253. DOI: 10.2307/2297111

Companhia do Metropolitano de São Paulo (2025) *Pesquisa Origem e Destino 2023*. Governo do Estado de São Paulo, São Paulo, SP. Disponível em: <https://www.metro.sp.gov.br/pt_BR/pesquisa-od/>. Acesso em: 21 mai. 2025

Forsyth, A. (2015) What is a walkable place? The walkability debate in urban design. *Urban Design International*, v. 20, n. 4, p. 274-292. DOI: 10.1057/udi.2015.22.

Google Maps (2023) *Praças e parques de São Paulo, SP*. Disponível em: <https://www.google.com/maps>. Acesso em: 15 dez. 2023

IBGE (2022) *Censo Demográfico 2022 - População por Idade e Sexo - Resultados do Universo*. Rio de Janeiro.

Johnson, R., Shaw, J., Berding, J., Gather, M. e Rebstock, M. (2017) European national government approaches to older people's transport system needs. *Transport Policy*, v. 59, 17–27. DOI:10.1016/j.tranpol.2017.06.005

Magalhães, J. R. L.; Portugal, L. S. e Leite, L. S. B. S. (2024) Caminhabilidade e envelhecimento populacional no município do Rio de Janeiro, RJ. In Anais do XXXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Florianópolis, SC). Rio de Janeiro: ANPET.

OpenStreetMap Contributors (2023). *Crossings*. Disponível em: <openstreetmap.org>. Acesso em: 26 nov. 2023

Paiva Neto, F. T.; Arins, G. C. B.; d'Orsi, E. e Rech, C. R. (2021) Are changes in walking for transportation in Brazilian older adults associated with attributes of the neighborhood environment? *Journal of Aging and Physical Activity*, v. 29, n. 4, p. 686–694. DOI:10.1123/japa.2020-0120

Prefeitura de São Paulo (2023) *GeoSampa - Mapa Digital da Cidade de São Paulo*. São Paulo. Disponível em: <https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em 26 nov. 2023

QGIS Development Team (2024) *QGIS Geographic Information System*. Open-Source Geospatial Foundation. Disponível em: <qgis.org>. Acesso em: 06 jun. 2025

SP Negócios (2022) *Comércio - Distritos da cidade de São Paulo*. Disponível em: <https://www.negocios.prefeitura.sp.gov.br/dados/distrito>. Prefeitura de São Paulo, São Paulo, SP. Acesso em: 26 nov. 2023

SSP/SP – Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública de São Paulo (2023). *Painel Estatístico*. São Paulo, SP. Disponível em: <https://www.ssp.sp.gov.br/estatistica/painel-estatistico>. Acesso em: 26 nov. 2023

Talen, E. e Koschinsky, J. (2013) The walkable neighborhood: A literature review. *International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning*, v. 1, n. 1, p. 42-63. DOI:10.24102/ijslup.v1i1.211

Van Cauwenberg, J.; Clarys, P.; De Bourdeaudhuij, I.; Van Holle, V.; Verté, D.; De Witte, N.; De Donder, L.; Buffel, T.; Dury, S. e Deforche, B. (2013). Older adults' transportation walking: a cross-sectional study on the cumulative influence of physical environmental factors. *International Journal of Health Geographics*, v. 12, n. 37. DOI: 10.1186/1476-072X-12-37

Jefferson Ramon Lima Magalhães (jefferson.magalhaes@pet.coppe.ufrj.br)
Licinio da Silva Portugal (licinio@pet.coppe.ufrj.br)
Programa de Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, Sala 106 - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Laura Silvia Bahiense da Silva Leite (laura@cos.ufrj.br)
Programa de Engenharia de Sistemas de Computação, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, Sala 319 - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

EFEITO BARREIRA DE RODOVIA URBANA NOS PADRÕES DE VIAGEM DE COMUNIDADES LINDEIRAS: O CASO DO CONTORNO NORTE DE MARINGÁ-PR

Gabriela Biato Lolis, Jan Lincoln Lugli, Marinna Carneiro Cunningham, Igor José Botelho Valques, Thiago Botion Neri
Universidade Estadual de Maringá

RESUMO
A separação de comunidades, fruto da fragmentação provocada por rodovias urbanas, constitui um desafio crítico para o pleno desenvolvimento das cidades. Investigar mecanismos que promovam a reconexão desses territórios e restaurem a coesão social e espacial demanda soluções de planejamento integradas e inovadoras. O artigo realiza um estudo sobre o impacto do efeito barreira na mobilidade urbana, com enfoque no Contorno Norte em Maringá. A metodologia adotada abrange a análise de dados secundários da Pesquisa Origem e Destino do Plano de Mobilidade, aliada a aplicação de técnicas estatísticas e análises gráficas. O objetivo principal é identificar os potenciais impactos de rodovias urbanas como barreiras à mobilidade e acessibilidade local, levando em consideração aspectos socioeconômicos, a configuração da malha urbana e o uso do solo. Os resultados evidenciam diferenças significativas, sobretudo em uma das Regiões de Tráfego (RT) estudadas, as quais podem ser atribuídas ao efeito barreira provocado pelo Contorno Norte.

1. INTRODUÇÃO

Rodovias desempenham um papel crucial na sociedade, facilitando o transporte de pessoas e mercadorias, conectando comunidades e impulsionando o crescimento econômico (Silva Junior; Ferreira, 2008). Por trás dessa infraestrutura de transporte, no entanto, há um fenômeno conhecido como o "efeito barreira". Esse fenômeno descreve os impactos negativos que rodovias podem causar sobre o meio ambiente, as comunidades locais e a qualidade de vida da população lindeira (Heran, 2011).

Para Mouette e Waisman (2004), os impactos do efeito barreira podem ser classificados em três níveis: primários; secundários; e terciários. Impactos primários afetam as consequências diretas à mobilidade e acessibilidade, como a insegurança causada, o risco de acidentes e o aumento da distância a ser percorrida. Os secundários estão relacionados aos efeitos na acessibilidade dos lugares de interesse dessa viagem, por exemplo, alterações de rota e alterações nos estabelecimentos de interesse. Já os terciários fazem referência a alterações na estrutura urbana.

Segundo Anciaes e Bradbury (2022), o efeito barreira de rodovias pode afetar a segurança e o bem-estar das pessoas de diversas maneiras. O impacto em comunidades locais é direto. Rodovias podem dividir bairros, isolando pessoas e dificultando o acesso a serviços essenciais, como escolas e hospitais, podendo afetar o tempo e modo de locomoção da população. O aumento do tráfego rodoviário também está associado à poluição do ar e ruído, afetando negativamente a qualidade de vida das pessoas que vivem nas proximidades (Heran, 2011).

Nesse sentido, o presente estudo possui como objetivo central analisar os impactos que o Contorno Norte, trecho urbano da BR-376, causa nos padrões de viagem da região, bem como seus desdobramentos sociais e espaciais. A partir de um estudo de caso, pretende-se compreender como as rodovias afetam a mobilidade de comunidades próximas a essas infraestruturas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias que visem mitigar os impactos do efeito barreira e promover uma mobilidade mais equitativa e segura em áreas urbanas.

2. METODOLOGIA

O estudo adota uma profundidade exploratória e descritiva, de natureza predominantemente qualitativa e complementada por análises quantitativas. Nesse sentido, a seleção de um estudo de caso permite aprofundar o entendimento das interações entre infraestrutura viária, mobilidade urbana e questões socioeconômicas. O caso investigado corresponde ao Contorno Norte de Maringá (PR), trecho urbano da BR-376. A rodovia, utilizada tanto para tráfego de passagem quanto para deslocamentos internos, tem servido historicamente como indutor de crescimento urbano.

A concepção do Contorno se deu a partir do Plano de Diretrizes Viárias em 1979 e oficialmente inaugurado no ano de 2014, com extensão total de 17,6 km. A Figura 1 evidencia, em vermelho, as rodovias que cruzam

a cidade de Maringá e, em amarelo, o Contorno Norte.

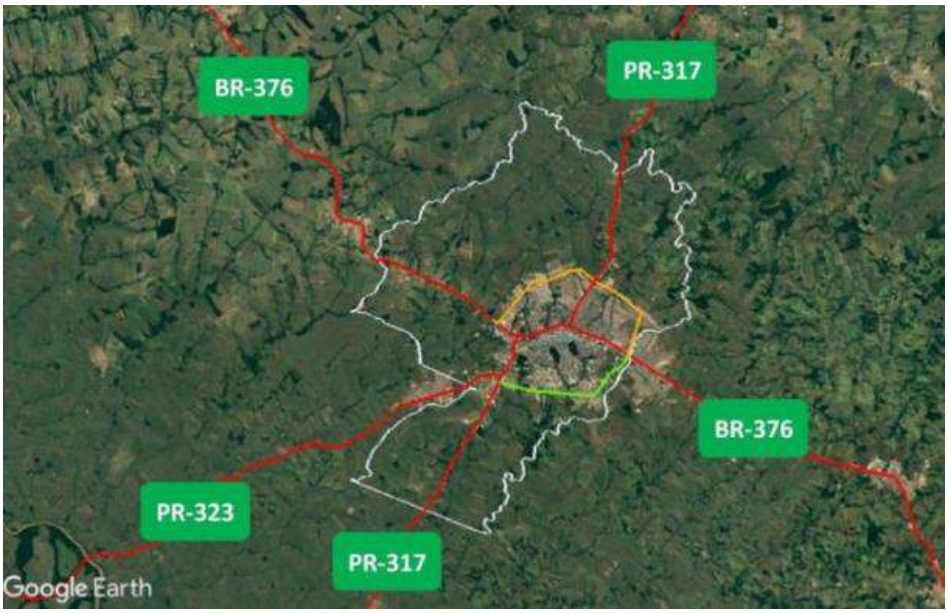


Figura 1: Rodovias interligadas pelo Contorno Norte

Para delimitar a área de pesquisa, foram consideradas seis Regiões de Tráfego (RT) da base PlanMob: quatro imediatamente cortadas pela rodovia – RT 14, RT 15, RT 16 e RT 17 (zonas de interesse) – e duas adjacentes – RT 6 e RT 7 – utilizadas como referência para comparação. As Regiões de Tráfego são apresentadas na Figura 2.

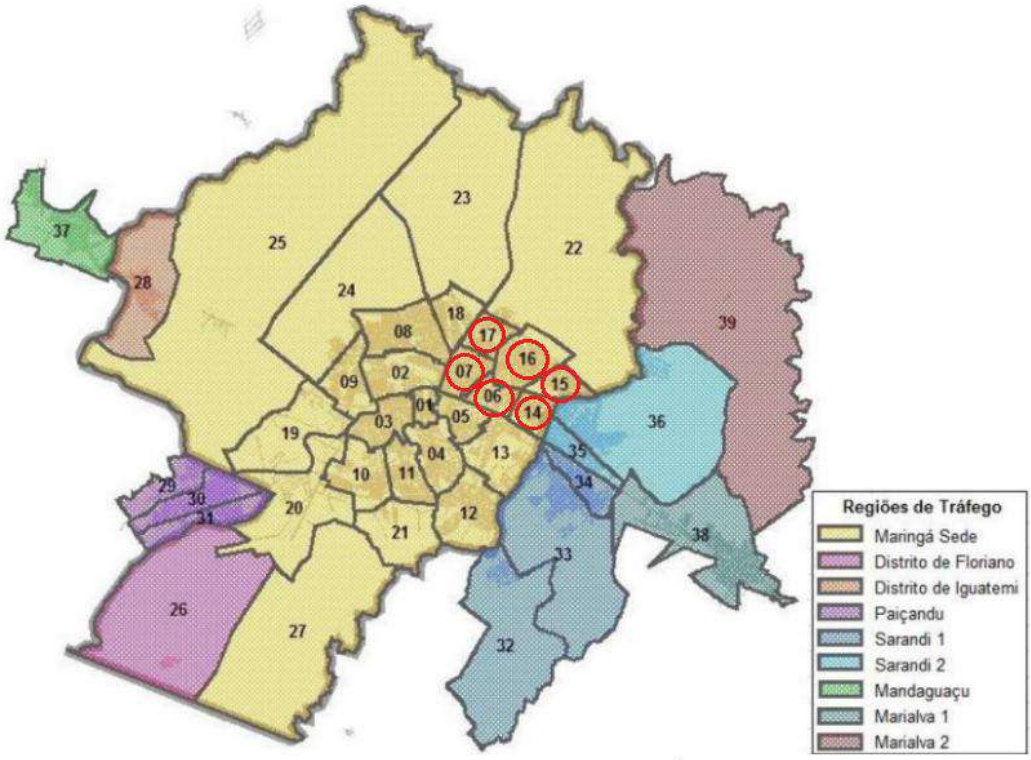


Figura 2: Regiões de Tráfego

2.1 Coleta de dados

Os dados utilizados são obtidos a partir do Plano de Mobilidade de Maringá (PlanMob, 2021). A fonte principal foi a Pesquisa Origem-Destino, a qual fornece estatísticas sobre características sociodemográficas e padrões

de deslocamento da população. As variáveis extraídas incluem: renda média domiciliar, modal utilizado (motorizado, não motorizado), frequência, motivo das viagens (trabalho, estudo, serviços), tempos médios de deslocamento e taxa de motorização por domicílio.

2.2 Processamento e análise dos dados

A análise quantitativa envolveu o processamento dos dados estatísticos da Pesquisa Origem-Destino para cada variável, em cada RT. Em seguida, foram executadas comparações simples para verificar relações entre renda média e taxa de motorização, bem como diferenças significativas de tempos médios de viagem entre as regiões. Paralelamente, uma abordagem qualitativa foi aplicada na interpretação dos resultados, tendo como referência estudos prévios sobre efeito barreira em infraestrutura urbana. Essa triangulação metodológica permitiu a compreensão não apenas da magnitude dos efeitos medidos, mas também de seus desdobramentos sociais e espaciais.

3. RESULTADOS

A análise dos resultados inicia-se com a caracterização da amostra: das 8732 entrevistas válidas (ponderadas por fator de expansão para representar 795.763 habitantes), 64,52 % (112.364) pertencem às Regiões de Tráfego (RT) de interesse (14–17) e 35,48 % (61.787) às RT 6–7, de comparação. No perfil socioeconômico, observou-se que 47,13 % dos moradores das RT 14–17 ganham até dois salários-mínimos, 41,26 % entre dois e quatro, 11,16 % entre quatro e dez, e apenas 0,45 % acima de dez salários-mínimos, não houve registro na faixa acima de vinte salários-mínimos. Em especial a RT 15 concentra 61,24 % até dois salários-mínimos e 38,76 % entre dois e quatro, sem representatividade nas faixas superiores; já a RT 14 possui 26,11 % entre quatro e dez e 1,79 % entre dez e vinte salários-mínimos, reflexo de sua localização majoritariamente interna ao anel viário. A distribuição de renda é evidenciada na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição de renda por RT

Região de Tráfego	Até 2 Salários Mínimo	2 a 4 Salários Mínimo	4 a 10 Salários Mínimo	10 a 20 Salários Mínimo	Acima de 20 Salários Mínimo
14	34,02%	38,08%	26,11%	1,79%	0,00%
15	61,24%	38,76%	0,00%	0,00%	0,00%
16	49,17%	42,62%	8,21%	0,00%	0,00%
17	47,04%	45,35%	7,60%	0,00%	0,00%
Todas as regiões de interesse	47,13%	41,26%	11,16%	0,45%	0,00%

Ao categorizar os modos de deslocamento, os automóveis (condutor ou passageiro, táxi e aplicativos) somam 40,84 % nas RT 14–17, seguidos por ônibus (27,08 %), deslocamentos a pé (17,70 %), motos (9,34 %) e bicicletas (5,04 %). A RT 15 destaca-se pelo uso de ônibus em 35,64 % das viagens e o menor índice de automóveis (19,69 %), contrastando com a RT 14 (autos = 51,00 %, ônibus = 22,01 %). Em comparação, as RT 6–7 apresentam 35,70 % de autos e 24,77 % de ônibus, sugerindo que o efeito barreira, aliado à maior distância ao centro, pode impulsionar o uso de modos motorizados nas regiões cortadas pelo Contorno Norte, conforme evidenciado na Tabela 2.

Tabela 2: Deslocamentos por modo

Região de Tráfego	Moto	Autos	Bicicleta	A pé	Ônibus
14	5,86%	51,00%	5,33%	15,80%	22,01%
15	10,28%	19,69%	5,35%	29,04%	35,64%
16	10,89%	40,99%	5,84%	15,45%	26,84%
17	9,81%	47,30%	2,26%	14,27%	26,35%
Todas as regiões de interesse	9,34%	40,84%	5,04%	17,70%	27,08%
Regiões de comparação (6 e 7)	7,71%	35,70%	9,01%	22,81%	24,77%

Na análise dos motivos de viagem, 81% dos deslocamentos para compras e lazer nas RT 14–17 são motorizados, enquanto nas RT 6–7 esse percentual cai para 52 %, indicando maior oferta de serviços próximos nessas regiões de comparação. Para trabalho e saúde, quase 100 % das viagens utilizam meios motorizados em ambas as zonas, ao passo que os deslocamentos escolares apresentam forte participação de modos não motorizados (28,5% a pé), reforçando a influência da proximidade de escolas nos bairros estudados.

Quanto ao tempo médio de viagem, usuários de ônibus nas RT 14–17 gastam em média 42,3 min (DP = 12,7), com pico de 49,5 min na RT 15, enquanto o automóvel registra 23,8 min (DP = 9,4) e a motocicleta 21,4 min. Em contraste, nas RT 6–7, o ônibus possui média de 35,1 min e o automóvel de 19,6 min, o que evidencia trajetos mais longos para a população afetada pelo Contorno Norte. O tempo médio de viagem por modal, em regiões de interesse, é apresentado no Figura 3.

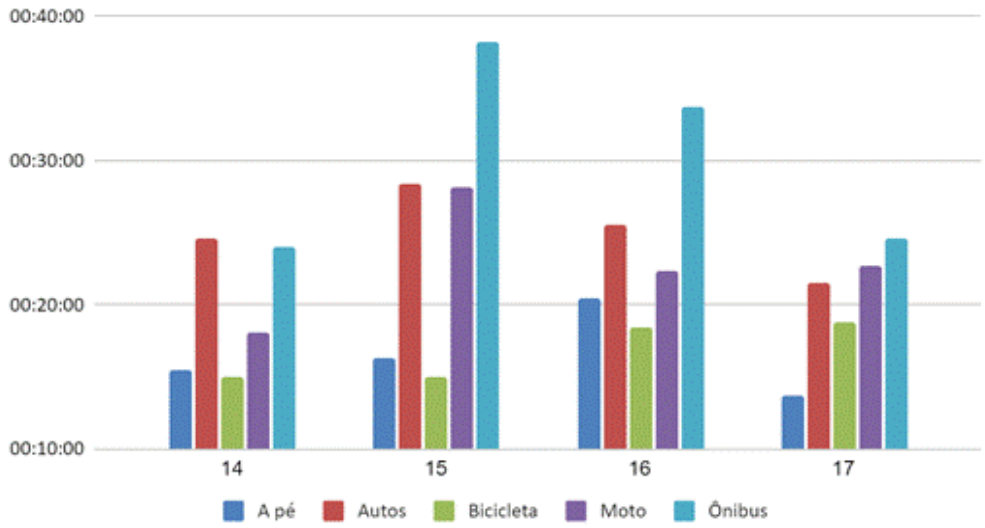


Figura 3: Relação entre o modo de transporte e o tempo de viagem das regiões de interesse

Considerando as regiões de comparação (RT 6–7), há variações nos tempos médios de deslocamento, com ênfase na utilização de motocicleta, como evidenciado no Figura 4.

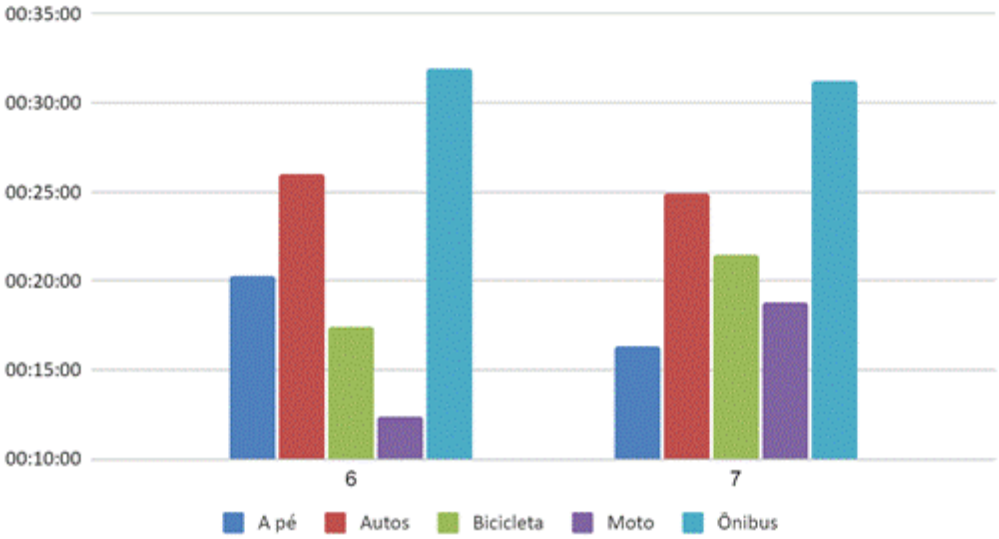


Figura 4: Relação entre o modo de transporte e o tempo de viagem das regiões de comparação

Por fim, a revisão das travessias rodoviárias demonstra que antes da implantação haviam seis pontos de travessia em cada RT 14 e RT 15. Atualmente, a RT 14 não possui nenhuma travessia própria, obrigando

desvio de até 4,8 km. Já a RT 15 manteve apenas três travessias, reduzindo em 50 % sua conectividade inicial. Esse déficit espacial eleva em até 15 min o tempo de deslocamento apenas para encontrar um ponto de travessia, afetando especialmente usuários de transporte público e não motorizado.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo são consistentes com a presença do efeito barreira associado ao Contorno Norte, sobretudo nas RT 14–17, e de forma mais acentuada na RT 15. Três evidências se articulam: déficit de conectividade – a RT 14 perdeu todos os pontos próprios de travessia e a RT 15 teve redução de seis para três, impondo desvios de até 4,8 km e acréscimos de até 15 min para alcançar uma travessia; pior desempenho do transporte coletivo – o tempo médio de viagem de ônibus nas RT 14–17 é maior que nas RT 6–7, com pico de 49,5 min na RT 15 ante 35,1 min nas RT 6–7; e perfil socioeconômico mais vulnerável na borda lindeira, com maior dependência de modos coletivos. Em conjunto, esses elementos sugerem que o Contorno contribui para ampliar custos generalizados de viagem (tempo, incerteza, distância) e, por consequência, agravar desigualdades de acesso para populações de menor renda.

Ao mesmo tempo, é fundamental evitar inferências causais exclusivas. Parte das diferenças observadas entre as RT 14–17 e as RT 6–7 pode decorrer de fatores de confusão não controlados nesta análise, tais como renda domiciliar, taxa de motorização e características do ambiente construído (densidade, diversidade de usos e desenho urbano). Esses atributos, presentes em diferentes graus nas áreas de comparação e também observados na RT 15, podem favorecer viagens a pé e por bicicleta e explicar, em parte, participações modais distintas sem que isso decorra apenas do corte físico imposto pela rodovia.

Do ponto de vista metodológico, a natureza seccional dos dados e a ausência de um contrafactual temporal (pré/pós-implantação) limitam a capacidade de atribuir causalidade. Pesquisas futuras devem empregar análises multivariadas (modelos de escolha modal controlando renda, motorização e métricas de forma urbana); métricas de conectividade de travessias; e desenhos quase-experimentais (pré/pós-implantação). Essas abordagens poderão isolar o efeito da barreira frente a determinantes socioespaciais.

Como implicação prática, recomenda-se priorizar intervenções que reduzam a penalidade de travessia, aliadas a melhorias de confiabilidade e requalificação de oferta do transporte coletivo nas RT lindeiras, além de políticas de proximidade que encurtem viagens essenciais. Tais medidas atuam tanto sobre o mecanismo físico da barreira quanto sobre seus efeitos distributivos, promovendo acesso mais equitativo e melhor desempenho sistêmico.

FINANCIAMENTO

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da Bolsa de Mestrado – GM (processo nº 130512/2025-7) concedida a Jan Lincoln Lugli.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anciaes, P. E Bradbury, A. (2022) Community severance in urban Africa. *The Urban Book Series: Transport and Mobility Futures in Urban Africa*. Cham: Springer. p. 111–127.

Héran, F. (2011) La ville morcelée: effets de coupure en milieu urbain. *Economica.* Disponível em: https://hal.univ-lille.fr/hal-03762960/document.

Mouette, D. e Waisman, J. (2004) Proposta de uma metodologia de avaliação do efeito barreira. *Revista dos Transportes Públicos* - ANTP, n. 104.

Plano de Mobilidade Urbana De Maringá. (2021) *Relatório 1.2*. Maringá.

Silva Júnior, S. B. e Ferreira, M. A. G. (2008) Rodovias em áreas urbanizadas e seus impactos na percepção dos pedestres. *Sociedade & Natureza*, v. 20, n. 2, p. 199–214. DOI: 10.1590/S1982-45132008000200013.

Gabriela Biato Lolis (biatololis@gmail.com)
Jan Lincoln Lugli (pg406344@uem.br)
Marinna Carneiro Cunningham (pg406347@uem.br)
Igor José Botelho Valques (ijbvalques@uem.br)
Thiago Botion Neri (tbneri2@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Av. Colombo 5790, Zona 7, Maringá/PR, Brasil.

EFICIÊNCIA DE ALTERNATIVA EM CIDADES BRASILEIRAS: COMO OS PADRÕES DE COLAPSO POR ALAGAMENTO DIFEREM DE BLOQUEIOS ALEATÓRIOS

Andre Borgato Morelli, Gabriel Brunhara Alizon, André Luiz Cunha
Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

RESUMO
Este estudo analisa a vulnerabilidade de redes viárias urbanas brasileiras a eventos de alagamento, comparando seus impactos com processos de degradação aleatória em 457 cidades de médio porte (50 mil a 300 mil habitantes). Utilizando dados do OpenStreetMaps e o *Topographic Wetness Index* (TWI), foram calculadas matrizes de Eficiência de Alternativa para dois cenários: remoção aleatória de 10 % das arestas e remoção das arestas mais vulneráveis a alagamentos. Os resultados revelam que a degradação aleatória produz distribuição com pico intermediário, enquanto a degradação pelo TWI gera distribuições concentradas nos extremos eficiência próxima a zero (isolamento) ou um (rota preservada). Esse comportamento indica que alagamentos concentram danos em regiões específicas, isolando nós críticos, enquanto falhas aleatórias dispersam impactos. Os achados contradizem estudos recentes que sugerem menor impacto médio dos alagamentos, demonstrando que análises baseadas em médias mascaram vulnerabilidades críticas e orientam ações emergenciais focadas na preservação de rotas frente a alagamentos.

1. INTRODUÇÃO

O avanço das mudanças climáticas tem intensificado a frequência e a severidade de eventos extremos, especialmente em áreas urbanas densamente ocupadas(Miller e Hutchins, 2017). Alagamentos recorrentes não apenas interrompem o tráfego e afetam a mobilidade urbana, mas também aceleram a degradação da infraestrutura viária, aumentando os custos de manutenção e diminuindo a vida útil dos pavimentos (Qiao *et al.*, 2015). Diante desse cenário, a literatura tem se empenhado em compreender as vulnerabilidades em sistemas de transporte a eventos de alagamentos, particularmente por meio do desenvolvimento de indicadores (Martins *et al.*, 2019; Morelli e Cunha, 2021; Sarlas *et al.*, 2020) e de estudos de caso específicos (Appert e Laurent, 2013; Kasmalkar *et al.*, 2020; Morelli e Cunha, 2024). No entanto, análises comparativas em larga escala – que envolvam múltiplas cidades com diferentes características morfológicas e territoriais – ainda são limitadas. Estudos recentes, como o de Morelli (2020), focado em cidades brasileiras com mais de 100 mil habitantes, e de Boeing e Ha (2024), que analisam áreas urbanas globais, representam avanços importantes, mas ainda enfrentam limitações metodológicas.

Uma das principais lacunas nesses estudos de ampla abrangência é o uso predominante de estatísticas agregadas, como médias, que podem ocultar padrões críticos e distorcer a real distribuição dos impactos. Por exemplo, Boeing e Ha (2024) sugerem que, em média, alagamento são menos danosos que falhas aleatórias. Em contraste, resultados obtidos por Morelli e Cunha (2024) demonstraram que, no caso de São Carlos-SP, os alagamentos geraram impactos consideravelmente mais severos que o caso aleatório, com isolamento de porções significativas da malha urbana, evidenciando que a média esconde dinâmicas locais relevantes.

Neste contexto, o presente artigo propõe uma abordagem baseada na análise da distribuição dos impactos sobre a conectividade viária, por meio do cálculo de matrizes de Eficiência de Alternativa em 457 cidades brasileiras com população entre 50 mil a 300 mil habitantes. A inovação reside na comparação sistemática entre dois mecanismos de degradação – falhas aleatórias e alagamentos simulados via *Topographic Wetness Index* (TWI) – e na adoção de estratégias de amostragem de nós para a simulação de rotas que superam limitações do uso exclusivo de centroides. Ao destacar a natureza distinta dos impactos causados por alagamentos, o estudo busca revelar vulnerabilidades ocultas que podem comprometer a eficácia de políticas públicas e estratégias de resposta emergencial. As matrizes geradas são disponibilizadas em formato aberto, ampliando o potencial de reutilização por planejadores e pesquisadores.

2. MÉTODO

O intuito deste trabalho é explorar como dois diferentes mecanismos de degradação de uma rede impactam na vulnerabilidade de rotas de um sistema de transportes. O objetivo é investigar a natureza e a distribuição dos impactos causados por eventos de alagamento em comparação a falhas aleatórias, utilizando como métrica a Eficiência de Alternativa. Para isso, foi construído um banco de dados com 457 cidades brasileiras de médio porte (população entre 50 mil e 300 mil habitantes), a partir das redes extraídas do OpenStreetMap com o OSMnx (Boeing, 2017) e da malha censitária de 2022 do IBGE (IBGE, 2022).O processo de análise envolve

três etapas principais: (i) cálculo da matriz de custos de viagem; (ii) degradação de rede; e (iii) cálculo das matrizes de Eficiência Alternativa.

2.1. Custos de viagem

A métrica de custo de viagem adotada neste estudo é a distância em rede entre zonas de tráfego, definidas pelos setores censitários das cidades. A forma como essa distância é medida tem impacto direto nos resultados de vulnerabilidade. Embora seja comum utilizar os centroides das zonas como pontos de origem e destino, essa prática pode concentrar excessivamente a importância em certos trechos da rede e ignorar viagens intrazonais (Morelli e Cunha, 2021).

Para mitigar essas limitações, este trabalho adota uma abordagem baseada na amostragem de múltiplos pontos internos por zona. A distância entre duas zonas A e B é definida como a média das distâncias das rotas entre os k pontos amostrados de A e os k da zona B (k^2 rotas). Essa abordagem aumenta a representatividade espacial e reduz o viés associado à localização dos centróides. Foram amostrados $k = 3$ pontos por setor censitário para banco de dados completo, equilibrando precisão e custo computacional. Além disso, foram testados $k = 1$, $k = 5$ e a abordagem todos-para-todos (todos os nós das zonas são amostrados) como proposto em Morelli e Cunha (2021) em uma amostra de 20 cidades, como análise de sensibilidade da escolha do k.

2.2. Degradação de rede

As simulações de falhas na rede consideram dois tipos de degradação comumente associados a eventos extremos ou perda de infraestrutura que causam bloqueios de vias: (i) remoção aleatória de arestas e (ii) remoção direcionada com base no risco de alagamentos (Boeing e Ha, 2024; Morelli e Cunha, 2021; Sarlas *et al.*, 2020). A **remoção aleatória** consiste na exclusão de uma fração fixa de arestas da rede, selecionadas ao acaso. Já remover as arestas mais suscetíveis a alagamentos requer cuidado especial. Na literatura, trabalhos que lidam com alagamentos geralmente utilizam dados históricos de alagamentos para detectar essas arestas (Borowska-Stefańska *et al.*, 2019; Kasmalkar *et al.*, 2020; Morelli e Cunha, 2021), contudo bancos de dados completos com ocorrências de alagamentos e cota máxima atingida são raros em cidades brasileiras, principalmente as pequenas e médias. Boeing e Ha (2024) contornaram o problema da disponibilidade de dados definindo que pontos mais baixos da cidade possuem maior tendência a alagar, contudo essa simplificação deixa de capturar nuances do fenômeno de alagamento, como a área de captação e a inclinação do terreno.

Para contornar esse problema, nossa abordagem para a remoção por probabilidade de alagamento considera a propensão física das vias a acumular água, identificada pelo *Topographic Wetness Index* (TWI) proposto por Beven e Kirkby (1979). Essa métrica, também utilizada para fins de degradação por Morelli e Cunha (2024), combina a área de captação de água com a declividade do terreno, permitindo identificar pontos mais suscetíveis a alagamentos mesmo na ausência de dados históricos — um problema comum em cidades de menor porte. A degradação é então simulada removendo-se as arestas com maior TWI, representando uma situação crítica de alagamento urbano.

2.3. Cálculo da matriz de Eficiência de Alternativa

A Eficiência de Alternativa ($\eta = d_{antes}/d_{depois}$) quantifica a resiliência de uma rota entre duas zonas, sendo $\eta = 1$ quando a rota não é atingida ou possui uma alternativa de igual comprimento, e $\eta \to 0$ quando a conexão é perdida ou severamente degradada (Morelli e Cunha, 2021). Para cada cidade e cenário de falha, são calculadas matrizes completas de eficiência, comparando as distâncias antes e depois da degradação. Essas matrizes resultantes são disponibilizadas publicamente, com linhas e colunas indexadas pelos códigos dos setores censitários (IBGE), facilitando sua reutilização por pesquisadores e planejadores urbanos através do link na plataforma Zenodo: https://doi.org/10.5281/zenodo.17094636. Nesta análise exploratória inicial, as matrizes são tratadas como coleções de rotas individuais, permitindo investigar a distribuição estatística das eficiências em cada cenário — abordagem fundamental para identificar padrões extremos muitas vezes ocultos por médias agregadas.

3. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta os histogramas da Eficiência de Alternativa de rotas nas 457 cidades analisadas, segmentadas por região do país. Observa-se que a região Centro-Oeste concentra uma maior proporção de rotas com alta eficiência, tanto em cenários de degradação aleatória quanto por alagamento. Esse desempenho

superior está associado à morfologia das redes viárias da região, caracterizadas por malhas mais regulares — um traçado facilitado pela topografia predominantemente plana —, o que favorece a redundância e resiliência do sistema (Boeing e Ha, 2024; Morelli, 2020). Em contraste, as regiões Sudeste e Sul, especialmente em áreas influenciadas pela Serra do Mar, apresentam redes mais irregulares e sinuosas, com maior presença de gargalos estruturais. Esses fatores contribuem para a maior ocorrência de rotas com baixa eficiência observada nessas regiões.

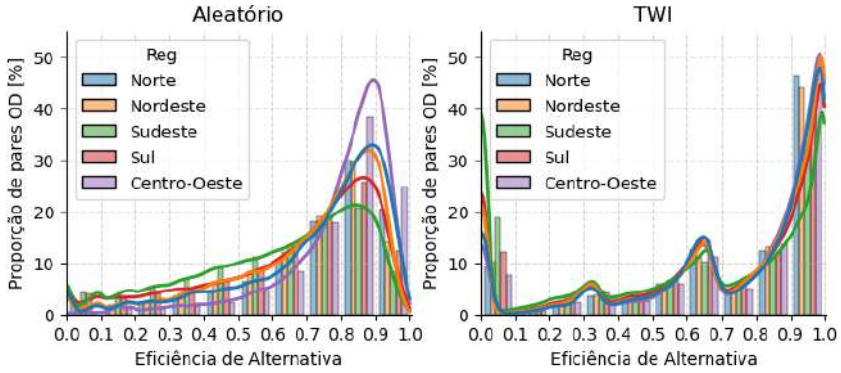


Figura 1: Histogramas de eficiência de alternativa em rotas de cidades entre 50 mil e 300 mil habitantes

O achado interessante, ressaltado pelas Figuras 2 (a) e (b), é a diferença marcante na natureza dos dois mecanismos de degradação. Enquanto a falha aleatória gera uma distribuição unimodal com pico intermediário de eficiência, a degradação induzida por alagamentos – simulada com base no TWI – apresenta uma distribuição claramente multimodal, com picos em torno de 0, 1/3, 2/3 e 1. Essa característica está associada à forma como os alagamentos comprometem as rotas. Como são amostrados três pontos por zona, os picos representam os casos em que nenhum, um, dois ou todos os pontos ficam ilhados. No caso aleatório esses picos não são observados porque as rotas tendem a ser preservadas com desvio ($0 < \eta < 1$). Isso reforça a hipótese de que eventos de alagamento têm natureza altamente concentrada e afetam a rede de forma abrupta, ao passo que falhas aleatórias distribuem o impacto de maneira mais difusa, resultando em perdas de eficiência mais graduais e menos extremas. Isso deriva da natureza do processo de alagamento, em que uma via próxima a uma via alagada tem maior probabilidade de também ser alagada, o que concentra a degradação de alagamentos a regiões geográficas específicas e impõe grandes perdas locais de eficiência.

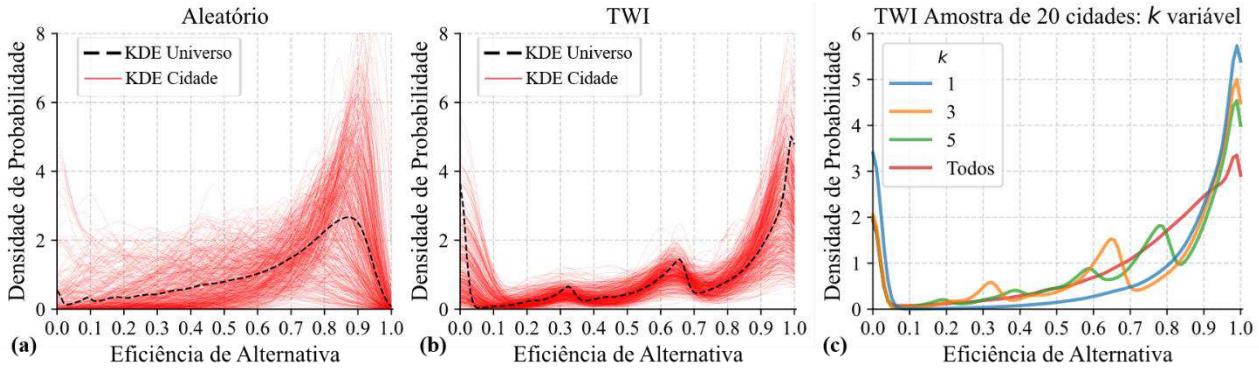


Figura 2: Densidade de probabilidade de eficiência de Alternativa para cada cidade do banco de dados (em vermelho) e curva geral (tracejada em preto) para o caso aleatório (a) e para o caso do TWI (b) e as curvas de densidade de probabilidade para uma amostra de 20 cidades para análise de sensibilidade de k (c).

A **Figura 2** (c) explora o efeito da estratégia de amostragem sobre os resultados. Para isso, foram comparadas curvas de densidade de probabilidade em 20 cidades com diferentes valores de k (1, 3, 5) e a abordagem todos-para-todos. Essa análise foi limitada a vinte cidades devido ao custo computacional de calcular rotas para maiores valores de k. Observa-se que a amostragem com apenas um ponto por zona – $k = 1$, equivalente ao uso de centroides – tende a superestimar tanto rotas com eficiência máxima quanto com eficiência nula, tornando os resultados excessivamente dependentes da posição dos centroides. A abordagem todos-para-todos, embora computacionalmente mais exigente, gera uma distribuição mais suave e realista, especialmente nas

faixas extremas. Esses achados reforçam a importância de ir além da abordagem tradicional em análises de vulnerabilidade, evitando simplificações que podem comprometer a análise.

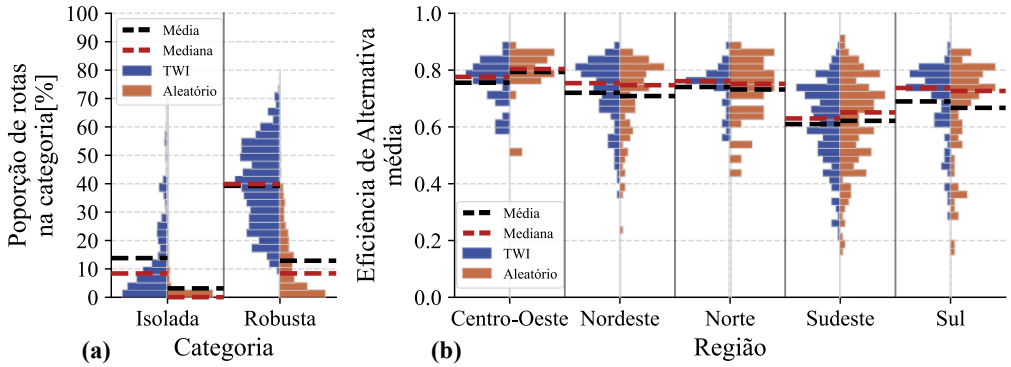


Figura 3: Distribuição da proporção de rotas nas categorias *Isolada* ($\boldsymbol{\eta < 0,10}$) e *Robusta* ($\boldsymbol{\eta > 0,90}$) (a) e distribuição das médias de eficiência de alternativa nas cidades do banco de dados utilizado (b).

Por fim, a Figura 3 sintetiza os principais contrastes entre os dois tipos de degradação. A Figura 3(a) mostra que as degradações pelo TWI tendem a gerar proporções mais elevadas de rotas extremamente frágeis/isoladas (eficiência < 0,10) e extremamente robustas (eficiência > 0,90) em comparação com as falhas aleatórias, confirmando o padrão já observado nas distribuições da Figura 2. Já a Figura 3 (b) revela que, mesmo com essa diferença marcante de comportamento, a eficiência média das rotas por cidade tende a ser relativamente similar entre os dois cenários. Esse padrão esconde uma característica importante do problema: alagamentos são capazes de isolar completamente partes da rede em muitas cidades, um efeito raramente observado nas falhas aleatórias. Isso demonstra que análises baseadas apenas em médias podem ser insuficientes para capturar a severidade real dos impactos, especialmente em contextos de emergência urbana, mascarando dinâmicas importantes e causando, como no caso do trabalho de Boeing e Ha (2024), a impressão de que degradações aleatórias causam maiores perdas médias de eficiência do que alagamentos.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho realizou uma análise exploratória com o objetivo de compreender como a distribuição da eficiência das rotas em redes viárias urbanas varia frente a diferentes tipos de degradação – especificamente, risco de alagamentos e falhas aleatórias. Para isso, foram calculadas matrizes de Eficiência de Alternativa para 457 cidades brasileiras de médio porte, seguidas de uma análise das distribuições resultantes.

Os resultados mostram que a forma como se calcula o custo de viagem – em particular, o número de pontos amostrados por zona – influencia significativamente os padrões de vulnerabilidade observados. Isso evidencia que a prática comum no planejamento de transportes, baseada em rotas entre centroides, pode mascarar ou distorcer vulnerabilidades reais do sistema. Além disso, verificou-se que a degradação causada por alagamentos apresenta um comportamento distinto, com predominância de casos extremos: rotas totalmente preservadas ou completamente comprometidas. Essa característica reforça a importância de considerar distribuições completas – e não apenas médias – para orientar estratégias de resposta emergencial. Isso porque nas situações de alagamento, a abordagem razoável de mitigação é garantir a existência de rotas mínimas, mesmo que com desvios substanciais, para evitar o isolamento de regiões vulneráveis, enquanto nas situações cotidianas de bloqueios aleatórios o isolamento de regiões não tende a ser um problema, com parâmetros mais tradicionais como distância percorrida e velocidade média no trajeto influenciando mais na vulnerabilidade do sistema.

Como contribuição adicional, o estudo disponibiliza abertamente as matrizes de Eficiência de Alternativa geradas, tanto para cenários aleatórios quanto para alagamentos. Além dos casos expostos neste trabalho (degradação de 10% das arestas de cada rede), também são disponibilizadas matrizes para os casos de degradação de 1% e 5% das arestas. As matrizes são indexadas a partir dos códigos IBGE dos setores censitários do censo de 2022, estrutura que facilita o uso dos dados por técnicos e gestores públicos

interessados em avaliar padrões locais de vulnerabilidade, sem exigir expertise especializada em modelagem de redes.

Agradecimentos
Os autores agradecem as agências de fomento pelo apoio e concessões de bolsas de pesquisa: Iniciação Científica (USP/PUB), doutorado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; e Produtividade em Pesquisa do CNPq processo 311964/2022-2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Appert, M., e Laurent, C. (2013) Measuring urban road network vulnerability using graph theory: the case of Montpellier's road network theory: the case of Montpellier's road network. *La mise en carte des risques naturels*, 1–22.

Beven, K. J., e Kirkby, M. J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*. doi:10.1080/02626667909491834

Boeing, G. (2017) OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, *65*, 126–139. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004

Boeing, G., e Ha, J. (2024) Resilient by design: Simulating street network disruptions across every urban area in the world. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *182*, 104016. doi:10.1016/j.tra.2024.104016

Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., e Wiśniewski, S. (2019) The Measurement of Mobility-Based Accessibility—The Impact of Floods on Trips of Various Length and Motivation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(12), 534. doi:10.3390/ijgi8120534

IBGE. (2022) Censo Demográfico 2022. Censo 2022, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Obtido de https://censo2022.ibge.gov.br/

Kasmalkar, I. G., Serafin, K. A., Miao, Y., Bick, I. A., Ortolano, L., Ouyang, D., e Suckale, J. (2020) When floods hit the road: Resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond. *Science Advances*, *6*(32), eaba2423. doi:10.1126/sciadv.aba2423

Martins, M. C. da M., Rodrigues da Silva, A. N., e Pinto, N. (2019) An indicator-based methodology for assessing resilience in urban mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *77*, 352–363. doi:10.1016/j.trd.2019.01.004

Miller, J. D., e Hutchins, M. (2017) The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *12*, 345–362. doi:10.1016/j.ejrh.2017.06.006

Morelli, Andre Borgato. (2020, janeiro 30) *Análise exploratória de resiliência em redes viárias urbanas* (Mestrado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos. Obtido de https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-13012020-153303/

Morelli, André Borgato, e Cunha, A. L. (2021) Measuring urban road network vulnerability to extreme events: An application for urban floods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *93*, 102770. doi:10.1016/j.trd.2021.102770

Morelli, Andre Borgato, e Cunha, A. L. (2024) Vulnerabilidade a alagamentos: Como a predominância de trajetos longos diminui a eficiência de rotas alternativas. *38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Apresentado em ANPET, Florianópolis - SC.

Qiao, Y., Dawson, A. R., Parry, T., e Flintsch, G. W. (2015) Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *41*, 492–503. doi:10.1016/j.trd.2015.09.019

Sarlas, G., Páez, A., e Axhausen, K. W. (2020) Betweenness-accessibility: Estimating impacts of accessibility on networks. *Journal of Transport Geography*, *84*, 102680. doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102680

Andre Borgato Morelli (andrebmorelli@gmail.com)
Gabriel Brunhara Alizon (gabrielbrunhara@usp.br)
André Luiz Cunha (alcunha@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento Engenharia de Transportes.

ESTUDO SOBRE A BARREIRA CAUSADA PELA RODOVIA DOS INCONFIDENTES NA MOBILIDADE DOS PEDESTRES

Hellen Carolina Teixeira Gomes [1], Rômulo Evangelista Gomes [2], Bárbara Abreu Matos [3]
[1] Universidade Federal de Minas Gerais, [2] Puc Minas, [3] Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO
Este estudo teve como objetivo avaliar os impactos da Rodovia dos Inconfidentes (BR-356) sobre a mobilidade pedonal nos bairros Nossa Senhora do Carmo, Novo Horizonte, Jardim Itacolomi e Lagoa, situados no município de Ouro Preto (MG). A metodologia consistiu na análise da evolução do processo de urbanização local, com base em dados do MapBiomas, no recorte temporal de 1990 a 2024, aliada à aplicação de um questionário adaptado do "*Street Mobility Project Toolkit*", desenvolvido pela *University College London*. O instrumento permitiu compreender a percepção dos pedestres quanto aos desafios enfrentados em seus deslocamentos diários na área de influência da rodovia. Os resultados mostram que a rodovia representa uma barreira física, dificultando a mobilidade segura e eficiente dos pedestres. Verificou-se, ainda, que o crescimento urbano desordenado contribuiu para o agravamento dos conflitos entre pedestres e veículos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O processo acelerado de urbanização no Brasil, intensificado a partir da segunda metade do século XX, provocou transformações profundas na organização social, econômica e territorial do país, consolidando o espaço urbano como o principal centro das atividades produtivas, das relações sociais e da vida cotidiana da maioria da população, conforme teoria de Lefebvre (2008). No contexto desse crescimento, o governo de Juscelino Kubitschek (1956–1961), por meio do Plano de Metas, desempenhou papel decisivo ao priorizar a expansão da malha rodoviária e a integração nacional via transporte terrestre, influenciando diretamente a forma e a lógica do desenvolvimento urbano brasileiro (Brito, 2006).

Contudo, esse avanço urbano não ocorreu de maneira equitativa. A capacidade limitada do Estado em prover infraestrutura e serviços urbanos adequados à totalidade da população, especialmente aos segmentos mais vulneráveis, resultou em um padrão de urbanização excludente. A priorização de políticas voltadas ao transporte individual motorizado — como a construção de avenidas, túneis e vias expressas — reforçou desigualdades socioespaciais, agravando os conflitos pelo uso do solo urbano e comprometendo a qualidade da mobilidade cotidiana (Maricato, 2003; Cardoso, 2007).

Nesse cenário, a crescente dependência dos automóveis nas cidades intensificou a vulnerabilidade de pedestres, que enfrentam, além da escassez de infraestrutura adequada para deslocamentos a pé, os riscos ampliados decorrentes do tráfego intenso. Em áreas densamente urbanizadas e em trechos de rodovias que atravessam a malha urbana, como ocorre com frequência no território brasileiro, a circulação de pessoas é fortemente limitada por barreiras físicas e simbólicas, o que compromete a mobilidade, o acesso a serviços e a integração entre bairros (Barroso *et al*., 2019; Matos, 2022).

Esse quadro se manifesta de forma contundente na Rodovia dos Inconfidentes (BR-356), especialmente no trecho entre os quilômetros 98 e 99, no município de Ouro Preto (MG), onde a via atravessa bairros como Nossa Senhora do Carmo, Novo Horizonte, Jardim Itacolomi e Lagoa. A coexistência entre o fluxo rodoviário intenso e a dinâmica urbana local evidencia os desafios impostos à mobilidade pedonal, impactando diretamente a segurança e o bem-estar dos moradores. Nesse contexto, torna-se imprescindível compreender como essa infraestrutura interfere na mobilidade cotidiana da população residente, particularmente daqueles que dependem da locomoção a pé para acessar serviços básicos, escolas, comércios e espaços de convivência, sendo este o objetivo principal do presente trabalho.

2. METODOLOGIA

A área de estudo corresponde ao trecho entre os quilômetros 98 e 99 da BR-356, no município de Ouro Preto (MG), onde a Rodovia dos Inconfidentes cruza os bairros Nossa Senhora do Carmo, Novo Horizonte, Jardim Itacolomi e Lagoa (Figura 1). Classificada como rodovia diagonal, a BR-356 é um importante eixo de ligação entre Belo Horizonte e o norte fluminense, com papel estratégico para o escoamento da produção mineral, circulação de trabalhadores e deslocamentos educacionais, especialmente para instituições como a

UFOP e o IFMG. Esse segmento urbano da rodovia concentra fluxos significativos de veículos pesados e pedestres, coexistindo com áreas residenciais em expansão e uso misto do solo. Contudo, essa relevância funcional contrasta com os desafios à mobilidade segura, sendo um ponto crítico para sinistros de trânsito, especialmente atropelamentos.



Figura 1: Localização do trecho de estudo (KM 98-99) da BR-356. Fonte: Elaboração própria.

Considerando esse contexto, realizou-se inicialmente uma análise multitemporal da cobertura vegetal na área de estudo, com base nos dados do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas). Esse projeto emprega imagens de satélite *Landsa*t, com resolução espacial de 30 metros, processadas na plataforma de computação em nuvem *Google Earth Engine* por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, como o *Random Forest*, os quais permitem a classificação de diferentes categorias de uso e cobertura do solo. A seleção dos índices utilizados fundamenta-se em sua comprovada eficácia na detecção de variações na densidade da vegetação e na identificação de áreas ambientalmente degradadas (Mapbiomas). O processamento e a análise dos dados foram conduzidos no software QGIS, o que possibilitou a elaboração de mapas temáticos e a análise espacial das alterações na cobertura vegetal ao longo do tempo, permitindo a correlação com o processo de urbanização observado na área em estudo

Como complemento à análise espacial, foi conduzida uma pesquisa de campo mediante a aplicação de um questionário estruturado, adaptado do "*Street Mobility Project Toolkit*", desenvolvido pela *University College London* (Mindell et al., 2017). O instrumento teve como objetivo investigar os impactos do efeito barreira causado por rodovias sobre a população residente em suas proximidades, buscando compreender de que modo essa infraestrutura influencia atitudes, percepções e comportamentos cotidianos. Para adequação ao contexto brasileiro, o questionário foi traduzido e adaptado à realidade sociocultural local, sendo organizado em três blocos temáticos: perfil dos respondentes, aspectos sociais e de bem-estar, e mobilidade na região. A pesquisa foi direcionada a residentes e pedestres dos bairros contemplados no estudo, e a definição da amostragem baseou-se nos dados populacionais do IBGE (2022) e da plataforma PROMOSAT-OP (2024), resultando em 192 entrevistas, com margem de erro de 5% e nível de confiança de 85%.

A coleta dos dados foi realizada presencialmente durante o mês de agosto de 2024, em pontos estratégicos de maior circulação de pedestres, no período compreendido entre 10h e 19h. As respostas foram registradas por meio de formulário eletrônico (*Google Forms*), assegurando o anonimato e o consentimento livre e esclarecido dos participantes. A análise dos dados foi conduzida com o auxílio do software *Microsoft Excel*,

permitindo a aplicação de estatística descritiva e a elaboração de gráficos, tabelas e cruzamentos entre variáveis sociais e padrões de mobilidade observados na área de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução da mancha urbana - MapBiomas

A partir da análise espacial realizada com o uso da ferramenta de georreferenciamento QGIS e dos dados fornecidos pela plataforma MapBiomas, foi possível mapear a evolução da mancha urbana na área de estudo no intervalo compreendido entre 1990 e 2024. O processamento e a interpretação desses dados permitiram identificar padrões significativos de crescimento e transformação espacial nos bairros analisados (Figura 2).

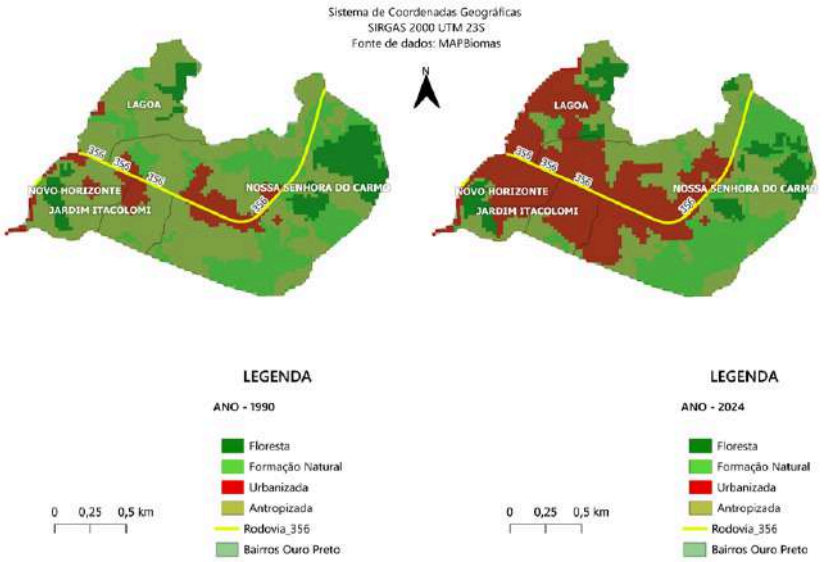


Figura 2: Comparativo da mancha urbana entre os anos de 1990 e 2024.

Em 1990, a ocupação urbana era bastante limitada, concentrando-se nos bairros Nossa Senhora do Carmo e Jardim Itacolomi. À época, o bairro Novo Horizonte apresentava apenas uma pequena porção edificada, enquanto o bairro Lagoa mantinha-se quase inalterado, com predominância de áreas naturais e baixa intervenção antrópica. A configuração urbana era fragmentada, sem a presença de uma mancha contínua ao longo da rodovia. Em contraste, o cenário de 2024 revela uma transformação substancial na estrutura urbana. Os bairros Jardim Itacolomi e Novo Horizonte encontram-se densamente ocupados, com esgotamento da capacidade de expansão territorial. O bairro Lagoa, anteriormente caracterizado por baixa urbanização, tornou-se a principal fronteira de crescimento, impulsionado pela valorização fundiária e pela disponibilidade de terrenos livres. O bairro Nossa Senhora do Carmo, por sua vez, manteve trajetória de expansão contínua, especialmente ao longo da rodovia, em direção ao município de Mariana, favorecido pela instalação de comércios e empreendimentos diversos.

A comparação entre os dois momentos evidencia um processo de urbanização acelerado e concentrado nas margens da BR-356, consolidando a área como uma zona estratégica de expansão urbana. Esse crescimento linear intensificou a mobilidade local, ampliando o fluxo de veículos e pedestres. No entanto, a infraestrutura viária não acompanhou o ritmo da ocupação, resultando em conflitos entre modais e no chamado “efeito barreira”, que compromete a conectividade entre os bairros e agrava os conflitos entre modais motorizados e não motorizados. Tal cenário reforça a necessidade de articulação entre o planejamento urbano e a infraestrutura de transporte para mitigar os impactos da urbanização desordenada sobre a mobilidade e a qualidade de vida.

3.2 Percepção dos pedestres – Questionário (Toolkit)

O primeiro bloco do questionário, com 194 respostas válidas, permitiu traçar o perfil sociodemográfico dos moradores dos bairros analisados, revelando predominância de jovens entre 21 e 30 anos (54,1%) e maioria do sexo masculino (62,9%). A escolaridade mais frequente foi o ensino médio completo (38,5%) e 68,2%

dos participantes declararam trabalhar em tempo integral, evidenciando alta demanda por deslocamentos diários. Os bairros Nossa Senhora do Carmo e Novo Horizonte concentraram a maior parte dos respondentes (33,5% cada), seguidos por Jardim Itacolomi e Lagoa.

Quanto ao tempo de residência, 46,2% afirmaram viver na região há mais de 20 anos, o que indica enraizamento comunitário, ao passo que 27,2% residem há menos de um ano, refletindo a contínua atratividade da área. Observou-se também que 47,7% dos domicílios possuem ao menos um automóvel, revelando certa dependência do transporte individual. Em conjunto, os dados mostram uma configuração urbana marcada pela convivência entre antigos e novos moradores, distintos padrões de mobilidade e centralidade da rodovia BR-356, que, embora estruturante, atua como fator de fragmentação espacial.

A pesquisa revela uma baixa frequência de interações sociais entre os moradores, com a maioria (96 pessoas) raramente ou nunca vendo seus vizinhos pessoalmente, e um padrão semelhante em comunicações virtuais. Essa limitação nas conexões sociais pode impactar o senso de comunidade e o bem-estar dos residentes. Em contraste, a autopercepção de saúde e bem-estar é majoritariamente positiva, com 94 pessoas relatando sentir-se "muito bem" e 69 "bem", resultados que podem estar correlacionados à faixa etária da amostra. Contudo, a percepção geral dos moradores sobre o ambiente é multifacetada e marcada por incertezas quanto à segurança, confiança e apoio comunitário, com a infraestrutura, a presença da rodovia e a escassez de espaços de socialização sendo fatores cruciais que afetam a sensação de pertencimento e interação.

Tabela 1: Seção saúde e bem estar

Como você se sente em relação à sua área local, que fica em qualquer lugar a uma caminhada de 20min ou a cerca de 1km de sua casa?	Sim	Talvez	Não
Me sinto parte?	112	27	55
Vandalismo é um problema?	60	65	69
Me sinto solitário morando aqui?	49	52	93
A maioria das pessoas é confiável?	90	58	46
Andar sozinho à noite?	81	49	64
A maioria das pessoas são amigáveis?	85	75	34
As pessoas vão tirar vantagem de você?	32	96	66
A área é mantida limpa?	69	95	30
Se estivesse com problemas, teria ajudas de outras pessoas?	59	101	34

A análise do terceiro bloco do questionário, centrado na temática das viagens e da mobilidade, evidenciou obstáculos relacionados à caminhabilidade enfrentados pelos moradores nas margens e travessias da rodovia BR-356 (Tabela 1). Vale ressaltar que os bairros Nossa Senhora do Carmo, Novo Horizonte e Jardim Itacolomi estão localizados na margem oposta da rodovia em relação aos comércios, pontos de ônibus, escolas, hospitais e serviços essenciais, o que exige travessias frequentes por parte dos moradores e agrava os desafios de mobilidade urbana. Dito isso, os dados revelam um ambiente urbano hostil para pedestres, caracterizado por velocidades excessivas dos veículos, volume elevado de tráfego, ausência de infraestrutura segura para travessia e uma percepção constante de insegurança. Esses elementos, combinados, não apenas dificultam os deslocamentos a pé, como também expõem os usuários mais vulneráveis a riscos cotidianos.

Tabela 2: Seção viagens e mobilidade

Com que frequência esses fatores afetam sua capacidade de caminhar?	Sempre	Frequente	Às vezes	Nunca
Velocidade de tráfego	140	46	5	3
Quantidade de tráfego	103	82	6	2
Falta de pontos de passagem	129	58	6	1
Tempo de travessia	105	69	19	1
Má iluminação, calçadas ou caminhos	73	85	29	7
Medo do crime	72	68	42	12

Dentre os fatores apontados, a velocidade excessiva do tráfego destacou-se como o principal entrave à circulação segura de pedestres: 71,8% dos entrevistados relataram que esse fator "sempre" afeta sua mobilidade, enquanto 23,6% indicaram que o impacto ocorre com frequência. O elevado volume de veículos também foi apontado como uma barreira significativa para a travessia, sendo citado como um problema constante por 52,8% dos respondentes. A ausência de pontos de travessia seguros agrava essa situação, com 66,2% dos participantes afirmando que esse é um problema recorrente, intensificado pelo tempo insuficiente disponibilizado para a travessia (53,8%). Adicionalmente, aspectos como a má iluminação pública, calçadas em condições precárias e o medo de violência foram relatados por 81% dos entrevistados como fatores que prejudicam a caminhabilidade na região. O conjunto desses dados revela um ambiente urbano excludente, onde o pedestre é sistematicamente desprivilegiado e exposto a riscos, tanto no âmbito da segurança viária quanto no da segurança pública.

A percepção da população local reforça a condição de vulnerabilidade: 92,8% dos participantes classificaram o tráfego como pesado e 87,7% consideraram a velocidade dos veículos excessiva. Como resultado, 73,8% relataram esperar três minutos ou mais para atravessar a rodovia, e 83,6% afirmaram que evitam fazê-lo sempre que possível. Ainda assim, mais da metade dos respondentes (54,9%) realiza a travessia a pé diariamente, sobretudo para acessar serviços básicos como saúde, educação e transporte coletivo. As manifestações espontâneas colhidas nos campos abertos do questionário evidenciaram a insatisfação generalizada dos moradores, que demandam intervenções pontuais e estruturais, como a instalação de passarelas, faixas de pedestres, semáforos, redutores de velocidade e reforço na fiscalização. Dessa forma, os dados demonstram que a BR-356 configura uma barreira urbana que não apenas compromete a mobilidade cotidiana, mas também acentua desigualdades no acesso aos direitos urbanos mais elementares.

4. CONCLUSÃO

A presença da Rodovia dos Inconfidentes (BR-356) no tecido urbano de Ouro Preto evidencia os impactos da priorização histórica do transporte motorizado nas cidades brasileiras. A análise realizada demonstrou que a expansão viária, associada à urbanização desordenada e à ausência de infraestrutura adequada para travessias, intensifica o chamado "efeito barreira", restringindo a mobilidade dos pedestres e expondo-os a riscos constantes. A partir da combinação de dados do MapBiomas sobre a evolução urbana e da aplicação de questionário adaptado do "*Street Mobility Project Toolkit*", o estudo confirmou que a BR-356 compromete a conectividade entre os bairros e limita o acesso seguro a serviços essenciais. Esses resultados reforçam a urgência de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana mais equitativa, que promovam o redesenho do espaço viário com foco na segurança, acessibilidade e bem-estar da população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barroso, G. T.; A. C. S. Bertho e A. C. Veiga (2019) A letalidade dos acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 36, p. 1–22.

Brito, F. (2006) O deslocamento da população urbana para as metrópoles. *Estudos Avançados*, n. 57, USP, maio–ago.

Cardoso, L. (2007) *Transporte público, acessibilidade urbana e desigualdades socioespaciais na Região Metropolitana de Belo Horizonte*.. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

Lefebvre, H. (2008) *A sociedade urbana* (1ª ed.). Belo Horizonte: UFMG-Humanitas.

MapBiomas. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/ (acesso em 25/06/2025)

Maricato, E. (2003) Metrópole, legislação e desigualdade. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 17, n. 48, p. 151–167.

Matos, B. A. (2022) *Mobilidade pedonal e o efeito barreira das rodovias urbanas: as contradições e os conflitos no Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo, em Belo Horizonte (MG)*. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

Mindell, J; Jones, P; Vaughan, L; Haklay, M; Scholes, S; Anciaes, P; Dhanani, A; Stockton, J; (2017) *Street Mobility Project: Toolkit. (Street Mobility Project Toolkit)*. UCL Street Mobility Project: London.

Hellen Carolina Teixeira Gomes (hellenctgomes0301@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil
*Rômulo Evangelista Gomes (*romuloegomes8@gmail.com*)*
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, MG, Brasil
Bárbara Abreu Matos (barbara.matos@ufop.edu.br*)*
Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil

EXPANSÃO DO MONOTRILHO NA RMSP: ANÁLISE COMPARATIVA DE VIAGENS ENTRE AS PESQUISAS ORIGEM-DESTINO DE 2017 E 2023

Lucas Neri Bastos Costa, Danielle Andrade Angelo
Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo analisa os impactos da expansão do monotrilho na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) a partir da comparação entre os dados da Pesquisa Origem-Destino (OD) de 2017 e 2023 e seus resultados. A pesquisa busca entender as transformações nos padrões de deslocamento e na integração modal decorrentes da ampliação da Linha 15-Prata. A partir de uma abordagem quantitativa e descritiva baseada em microdados do Metrô, a análise contempla os setores censitários diretamente impactados pela expansão. Os resultados pretendem contribuir para o debate sobre a eficiência e planejamento de redes no transporte público, especialmente em regiões periféricas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) passou por mudanças na mobilidade, com a expansão da rede metroferroviária e a adoção do monotrilho para integrar as periferias. Segundo Villaça (2001), a metrópole é marcada por desigualdades socioespaciais, o que exige conectar essas áreas ao transporte estruturador. A Linha 15-Prata, inaugurada em 2014 como o primeiro monotrilho de grande escala do país, foi projetada para ampliar rapidamente a rede com menor impacto urbano e aliviar a sobrecarga nos ônibus e rodovias (Metrô, 2024). A expansão dessa linha e a construção da Linha 17-Ouro refletem estratégias de diversificação modal. Para Rolnik (2015), tais projetos também reestruturam o espaço urbano, indo além de sua função técnica.

Entender os efeitos dessas expansões requer instrumentos que capturem mudanças nos padrões de deslocamento. A pesquisa Origem-Destino (OD), realizada periodicamente pela Companhia do Metrô de São Paulo, é fonte para diagnosticar a mobilidade metropolitana, permitindo análises comparativas entre períodos e áreas. Coletando dados sobre motivos de viagem, modos de transporte, tempo de deslocamento e perfil socioeconômico dos usuários, a OD é fundamental para o planejamento urbano e de transportes. Este estudo analisa comparativamente os dados das ODs de 2017 e 2023, focando nos impactos territoriais e modais da expansão do monotrilho, buscando identificar mudanças nos fluxos e em sua integração com outros modos. A abordagem quantitativa usa microdados do Metrô, considerando setores censitários abrangidos pelas estações em operação e previstas.

1.1. Contextualização

O monotrilho é um sistema de transporte sobre trilhos que se destaca por operar em via elevada e por utilizar uma única viga como base para a circulação dos trens. Internacionalmente, o monotrilho tem sido empregado como solução eficiente em áreas urbanas densas, onde a construção subterrânea ou a expansão de corredores viários são inviáveis ou excessivamente onerosas, como no Japão (Kikuchi e Onaka, 1988). Entre as vantagens do monotrilho destacam-se a menor interferência no trânsito de superfície, a redução do tempo de implantação e de custos de construção e operação quando comparado ao metrô subterrâneo e a operação silenciosa (Timan, 2015). No entanto, há também limitações, como a menor capacidade de transporte quando comparado a linhas tradicionais de metrô e os desafios de expansão para grandes volumes de passageiros.

Apesar das expectativas, a implantação da Linha 15 enfrentou uma série de atrasos, interrupções e questionamentos sobre sua viabilidade operacional. Mesmo assim, ao longo dos anos, a linha expandiu-se, como mostra o mapa de situação atual na Figura 1, aumentando significativamente sua demanda de passageiros. O crescimento observado entre as ODs de 2017 e 2023 demonstra a relevância crescente do monotrilho na matriz de transportes da RMSP, ainda que seu papel seja frequentemente subdimensionado nos relatórios oficiais. Este cenário ressalta a necessidade de aprofundar a análise sobre o monotrilho, compreendendo não apenas seu impacto numérico, mas também seu papel qualitativo na transformação da mobilidade urbana e na oferta de alternativas de deslocamento para as populações periféricas.

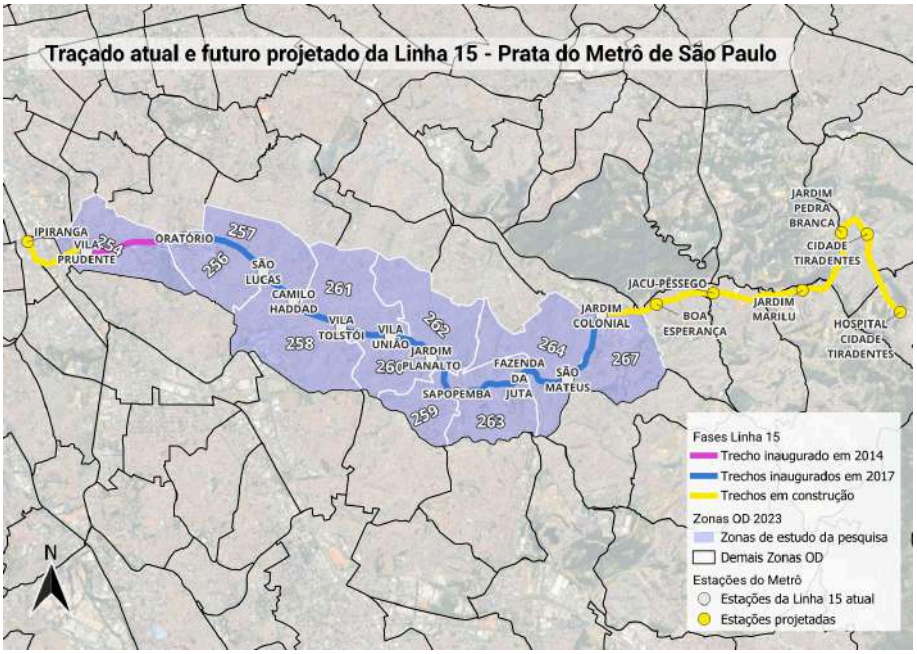


Figura 1: Mapa de situação atual e futura da Linha 15 - Prata

2. METODOLOGIA

Este estudo utiliza uma abordagem quantitativa e descritiva, fundamentada na análise dos microdados disponibilizados pelo Metrô referentes às ODs de 2017 e 2023. O recorte territorial abrange os setores censitários próximos às estações em operação no momento do lançamento da OD de 2023, em fevereiro de 2025. Para examinar a expansão do monotrilho na RMSP entre os dois períodos, nesta pesquisa adota-se uma abordagem comparativa, considerando a variação no número de viagens, as conexões intermodais e a evolução da infraestrutura, incluindo a ampliação do número de estações em operação na Linha 15.

Para cada resposta obtida, a OD adota fatores de expansão, que, segundo Stopher (2012), caracterizam-se por valores adotados para indicar quantos membros de uma população são representados por uma observação ou resposta, com o objetivo de estimar a estatística dessa população através de uma amostra com a maior precisão possível. Por meio do fator de expansão de cada viagem, foi possível obter quantas viagens possuíam origem e destino em cada zona da pesquisa, com foco nas 11 zonas que estão na área de influência das estações atuais da Linha 15-Prata (representadas em azul na Figura 1), além de verificar quantas viagens foram realizadas utilizando o monotrilho como um dos modos de transporte.

2.1. Justificativa

Mesmo que o monotrilho represente uma alternativa no sistema de transporte metropolitano, observa-se, nos relatórios oficiais da Pesquisa OD (Metrô, 2025), que ele é tratado de forma agrupada com outras linhas de metrô, não evidenciando sua especificidade e impacto nos relatórios. Durante o intervalo entre as edições da pesquisa realizada pelo Metrô, foram inauguradas 9 novas estações, sendo a última a estação Jardim Colonial, inaugurada no final de 2021 (São Paulo (estado), 2021), fato que não é plenamente captado pela pesquisa OD de 2017, cujo recorte contempla informações até maio de 2018. Como consequência, houve um aumento expressivo no volume de passageiros transportados pelo monotrilho (de 8 mil usuários diários na OD 2017 para 105 mil na OD 2023), demonstrando uma mudança significativa no padrão de mobilidade urbana que precisa ser devidamente considerada nas análises de planejamento metropolitano. As novas estações ampliaram a capilaridade da rede metroferroviária, conectando áreas periféricas ao centro expandido da cidade e reduzindo significativamente os tempos de deslocamento. Além disso, observaram-se mudanças no uso e valorização do solo nos entornos das estações, impulsionando transformações urbanas relevantes. Como destaca Tavares (2024), “no Brasil, a infraestrutura é concebida para (re) estruturar setores e, quando implantada, (des)estrutura lugares”. A Linha 15 melhora a mobilidade e reconfigura o espaço urbano, reforçando a articulação entre transporte e planejamento territorial.

3. RESULTADOS

Com as inaugurações das estações entre Oratório e Jardim Colonial ocorridas após a coleta de dados da Pesquisa de 2017, os dados de viagens na configuração atual da Linha 15-Prata do Metrô foram obtidos apenas para a pesquisa mais recente, publicada em fevereiro de 2025. Considerando as 11 zonas de estudo que estão próximas às estações atuais da Linha 15 como origem e filtrando apenas as viagens que foram realizadas sobre trilhos - ou seja, com utilização de metrô, trem ou monotrilho -, verifica-se que as zonas que mais atraíram viagens são zonas centrais como República e Sé e da região oeste como Pinheiros e Oscar Freire, além de zonas dentro do traçado do monotrilho e próximas a ele, como Sítio Carrãozinho e Rodolfo Pirani (Figura 2). Porém, quando são consideradas todas as viagens geradas pelas zonas de estudo, a grande maioria delas é feita para as zonas da região do monotrilho ou próximas (Figura 3).

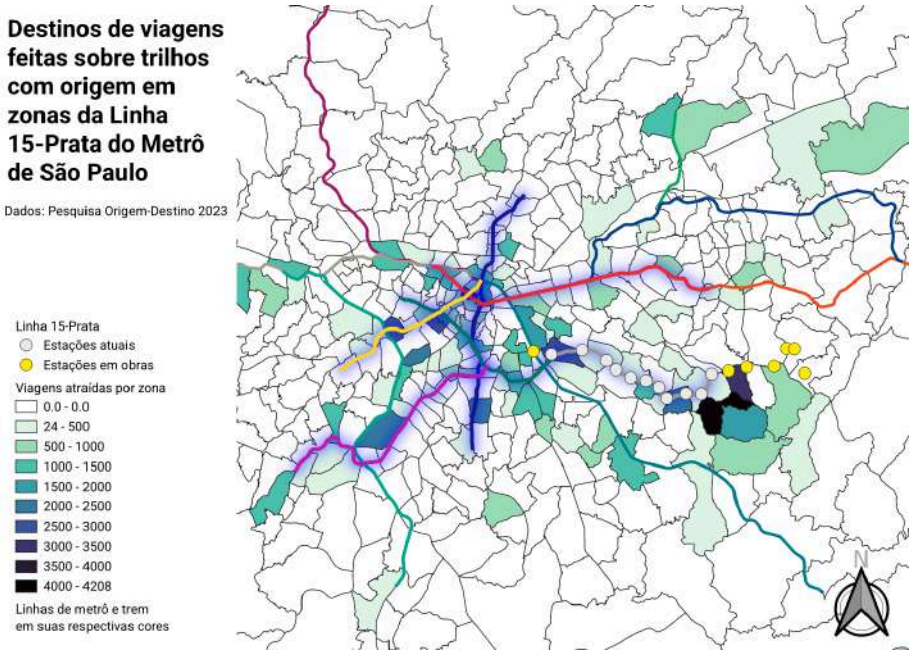


Figura 2: Viagens atraídas por zona OD com origem nas zonas estudadas e utilização de transporte sobre trilhos

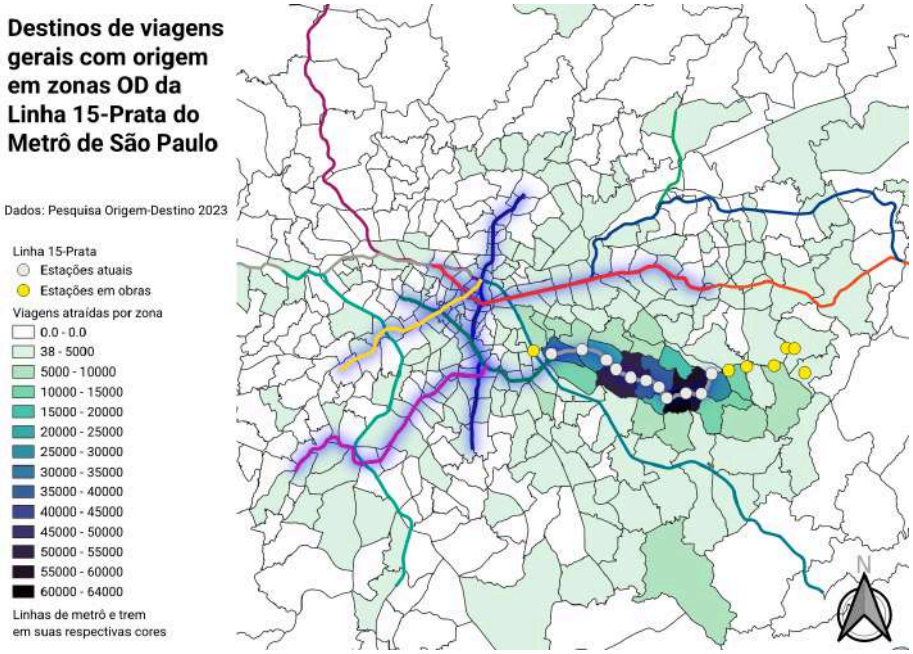


Figura 3: Viagens atraídas por zona OD com origem nas zonas estudadas, sem filtro de modo principal utilizado

Seguindo a tendência geral da RMSP nesta última OD (Metrô, 2025), as zonas na área de influência das estações da Linha 15 tiveram redução de quase 9% no número total de viagens no período entre pesquisas, conforme apontado pela Tabela 1. Por outro lado, das 11 zonas estudadas, quatro tiveram aumento no número de viagens. Essas zonas contêm as estações Oratório, São Lucas, Vila União, São Mateus e Jardim Colonial.

Tabela 1: Variação de viagens geradas e atraídas nas zonas estudadas entre Pesquisas OD

Zonas	Nome da Zona	Viagens geradas OD 2017	Viagens geradas OD 2023	Variação	Viagens atraídas OD 2017	Viagens atraídas OD 2023	Variação
254	Orfanato	105170	100999	-3,97%	105744	103063	-2,54%
256	Linhas Corrente	43340	48212	11,24%	42531	48380	13,75%
257	Vila Ema	60173	52044	-13,51%	60096	51588	-14,16%
258	Parque São Lucas	94559	81737	-13,56%	94003	82076	-12,69%
259	Vila Cardoso Franco	48732	35897	-26,34%	48580	35513	-26,90%
260	Parque Santa Madalena	56969	63786	11,97%	56645	64171	13,29%
261	Jardim Colorado	84470	83977	-0,58%	84449	84614	0,20%
262	Teotônio Vilela	114372	73661	-35,60%	114352	73694	-35,56%
263	Fazenda da Juta	116249	95605	-17,76%	115682	94571	-18,25%
264	São Mateus	108178	116332	7,54%	109373	115475	5,58%
267	Cidade Satélite	54660	56819	3,95%	54844	57842	5,47%
Total		**886874**	**809069**	**-8,77%**	**886300**	**810986**	**-8,50%**

A operação da Linha 15 nos trechos entre Oratório e São Mateus, inaugurado entre 2018 e 2019, e entre São Mateus e Jardim Colonial, aberto desde 2021, aumentou a quantidade de viagens realizadas com o monotrilho como principal modo de transporte, como apresentado na Tabela 2. Essas viagens, no entanto, não correspondem a todas as viagens realizadas na Linha 15, já que a metodologia utilizada considera o modo principal de viagem, que é indicado hierarquicamente pelo Metrô. A tabela a seguir apresenta os modos na ordem hierárquica da pesquisa.

Tabela 2: Variação de modo principal de transporte nas zonas estudadas entre Pesquisas OD

Modo principal	Geradas OD 17	Geradas OD 23	Variação	Atraídas OD 17	Atraídas OD 23	Variação
Metrô	67255	68966	2,54%	70115	68772	-1,92%
Trem	4843	3598	-25,70%	3111	3598	15,64%
Monotrilho	**653**	**25292**	**3772,17%**	**653**	**19013**	**2810,87%**
Ônibus do município de São Paulo	226242	153122	-32,32%	223035	157152	-29,54%
Ônibus de outros municípios	1636	0	-100,00%	1636	0	-100,00%
Ônibus metropolitano	7489	5449	-27,23%	7435	5356	-27,97%
Transporte Fretado	2761	1592	-42,32%	3091	1883	-39,08%
Transporte Escolar	37342	47751	27,88%	37574	48087	27,98%
Dirigindo Automóvel	152443	154172	1,13%	152997	155077	1,36%
Passageiro de Automóvel	77899	50687	-34,93%	77610	51525	-33,61%
Táxi não Convencional/aplicativo	1499	16106	974,56%	2326	15524	567,31%
Dirigindo Moto	14175	20487	44,53%	14238	20487	43,90%
Passageiro de Moto	1431	1251	-12,58%	2054	2262	10,15%

Modo principal	Geradas OD 17	Geradas OD 23	Variação	Atraídas OD 17	Atraídas OD 23	Variação
Bicicleta	5214	7206	38,22%	5214	7206	38,22%
A Pé	278179	252812	-9,12%	277726	254465	-8,38%
Outros	7815	578	-92,60%	7484	578	-92,28%

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos na última OD indicam que a expansão do monotrilho da Linha 15-Prata modificou o perfil de mobilidade da população das zonas próximas às estações dessa linha, com um aumento no número de viagens com monotrilho como modo principal acima de 30 vezes do número obtido pela pesquisa em 2017. A construção de mais estações torna viável a premissa do Metrô de conectar regiões populosas da Zona Leste ao centro da cidade, dado que destinos de viagens feitas com transportes sobre trilhos têm sido zonas fora da Linha 15 e centrais em sua maioria. Por outro lado, zonas que farão parte da Linha 15 futuramente, como a Sítio Carrãozinho, já possuem um número considerável de viagens feitas em monotrilho partindo das zonas atuais, e podem ter maior quantidade de viagens após a inauguração das estações em obras mais a leste. Entretanto, o perfil de mobilidade geral das zonas estudadas não foi alterado. Algumas razões para isso podem ser a quantidade de viagens realizadas por automóveis (27% das viagens com origem nas zonas), reforçando a lógica do transporte individual; a redução no número de viagens totais, seguindo a tendência da RMSP como um todo; e a redução no número de viagens de ônibus, que não foi totalmente absorvida pela expansão do monotrilho.

Cabe ressaltar que a abordagem de modo principal do Metrô é hierárquica e leva em consideração apenas qual modo de transporte foi utilizado, independente de ser por uma estação ou pela viagem inteira, o que pode variar os resultados obtidos pela pesquisa amostral. Como a pesquisa também possui as coordenadas de transferência entre os modos de transporte utilizados por um respondente, em estudos futuros pode ser verificada a distância percorrida por modo de transporte a partir dessas informações. Por fim, com a consolidação da Linha 15, de suas obras e, posteriormente, após novos dados, poder-se-á atualizar o estudo com o acesso a novas estações, como a estação Ipiranga, da Linha 10-Turquesa e sua integração, e as estações novas da Zona Leste. Além disso, pode-se realizar estudos similares em linhas que tiveram expansão recente, como as Linhas 4-Amarela e 5-Lilás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Kikuchi, S. e A. Onaka (1988) Monorail development and application in Japan. Journal of advanced transportation, v. 22, n. 1, p. 17-38.

Metrô. (2024) Linha 15-Prata. Disponível em: www.metro.sp.gov.br/pt_BR/obras/linha-15-prata/ (acesso em 09/07/2025).

Metrô. (2025) Pesquisa Origem-Destino 2023 – Relatório Síntese. Disponível em: transparencia.metrosp.com.br/dataset/pesquisa-origem-e-destino-2023-relatório-síntese (acesso em 14/06/2025)

Rolnik, R. (2015) Guerra dos lugares: a colonização da terra e da moradia na era das finanças. São Paulo: Boitempo.

Stopher, P. (2012) Collecting, Managing, and Assessing Data Using Sample Surveys, p. 418-430. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511977893.019

São Paulo (estado) (2021) Governo de SP entrega Estação Jardim Colonial da Linha 15-Prata do Metrô. Disponível em www.sp.gov.br/sp/canais-comunicacao/noticias/governo-de-sp-entrega-estacao-jardim-colonial-da-linha-15-prata-do-metro-2/ (acesso em 12/07/2025).

Tavares, J. C. (2024) Trajetórias da infraestrutura no Brasil. Concepções, operacionalizações e marcos conceituais em perspectiva. Cadernos Metrópole, 26(60), 443-464.

Timan, P. E. (2025) Why Monorail Systems Provide a Great Solution for Metropolitan Areas. Urban Rail Transit, v. 1, n. 1, p. 13–25.

Villaça, F. (2001) Espaço intra-urbano no Brasil. São Paulo: Studio Nobel, Fapesp, Lincoln Institute.

Lucas Neri Bastos Costa (eulucasneri@gmail.com)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes.
Danielle Andrade Angelo (danielle.angelo@usp.br)
Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Ciência Política.

HUB DE MOBILIDADE EM ÁREA INDUSTRIAL: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO INDUSTRIAL DE GRAVATAÍ

Katyuza Torres Costa Jorge, Helena Beatriz Bettella Cybis, Ana Margarita Larrañaga Uriarte, Raul Júlio Campelo Motta
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este estudo avaliou a viabilidade da implantação de um hub de mobilidade nas proximidades do Loteamento Distrito Industrial, em Gravataí (RS), com o objetivo de compreender quais seriam os principais benefícios, barreiras e recomendações para viabilizar essa proposta. A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, por meio de entrevistas com representantes das empresas, cujos dados foram analisados com o auxílio do software NVivo. As informações foram organizadas em três categorias: barreiras, benefícios e recomendações. As principais barreiras foram a cultura organizacional desfavorável e a insegurança. Os benefícios destacados incluem a integração modal e a ampliação do acesso à mão de obra. As recomendações enfatizam a importância de promover a mobilidade ativa e o envolvimento das empresas. Conclui-se que, apesar dos desafios, o Hub de Mobilidade pode contribuir para o desenvolvimento regional, desde que sejam adotadas estratégias para superar os entraves.

1. INTRODUÇÃO

Os hubs de mobilidade (HM) são uma solução relativamente nova no campo da mobilidade urbana (Blad *et al.*, 2022) (Arnold *et al.*, 2023) Os HM ganharam popularidade recentemente em muitas cidades (Liao *et al.*, 2024) pois facilitam a transferência confortável entre diferentes meios de transporte (Stadnichuk *et al.*, 2024), incluindo tanto o transporte público quanto as opções de mobilidade privada compartilhada (Blad *et al.*, 2022), abrangendo modelos mais modernos, como veículos elétricos e e-bikes (Liao *et al.*, 2024).

A produção científica sobre HM também vem crescendo nos últimos anos. A revisão da literatura conduzida por Blank e Larrañaga (2024) analisou publicações entre 2019 e 2023 nas bases Scopus e Science Direct, identificando 28 artigos, todos publicados a partir de 2021. Do total, 82% concentram-se na Europa, com destaque para a Holanda. Os temas mais recorrentes incluem o perfil dos usuários, fatores que influenciam o uso dos HM, bem como tipologias e critérios de localização. Apesar do interesse internacional crescente, existe uma escassa produção voltada à realidade latino-americana. Por outro lado, a maior parte das pesquisas foca em contextos urbanos centrais e viagens por motivos diversos, havendo pouca atenção a áreas industriais. Embora os estudos existentes contribuam para o avanço da pesquisa sobre o tema, seus resultados não podem ser simplesmente transferidos entre diferentes contextos. Os HM devem atender a múltiplas necessidades de transporte. Quando implementados sem considerar as especificidades locais, podem ser subutilizadas resultando em desperdício de recursos. Em especial, áreas industriais apresentam demandas de mobilidade específicas, voltadas principalmente aos deslocamentos para o trabalho, em horários não convencionais, como turnos noturnos e escalas variáveis. Em vários casos, essas demandas são atendidas por transporte fretado, devido à baixa cobertura do transporte público regular.

Este estudo explora as percepções sobre a implantação de um HM nas proximidades do Loteamento Distrito Industrial (LDI), situado no município de Gravataí (RS). O objetivo é compreender, a partir da perspectiva das empresas, quais seriam os principais benefícios, barreiras e recomendações para viabilizar essa proposta. A criação de um HM pode contribuir para ampliar o acesso dos trabalhadores à região, atualmente caracterizada por poucos pontos de captação do transporte público coletivo. Essa limitação dificulta os processos de recrutamento e retenção de trabalhadores, afetando a eficiência operacional e a sustentabilidade das atividades produtivas locais. O estudo oferece duas contribuições principais. Primeiro, aborda a implantação de um HM em um contexto ainda pouco explorado na literatura, que se caracteriza por um grande volume de deslocamentos e pela sua importância para o desenvolvimento econômico da região. Segundo, incorpora a perspectiva dos agentes locais a um tema emergente do planejamento da mobilidade. Assim. fornece subsídios para orientar decisões e estudos futuros fundamentados em aspectos importantes no contexto de estudo e não de premissas genéricas.

2. MÉTODO

2.1. Descrição da Área de Estudo

Gravataí é um município localizado na Região Metropolitana de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, a cerca

de 30 km de Porto Alegre. Sua localização garante fácil acesso a importantes rodovias (BR-290, ERS-118, ERS-020 e ERS-030), favorecendo o desenvolvimento econômico, especialmente nos setores industrial e comercial. Segundo o IBGE (2022), Gravataí possui cerca de 265 mil habitantes, área de 469 km² e densidade demográfica de 566 hab/km². O LDI está localizado a sudoeste do município de Gravataí e possui aproximadamente 3,5 km² de extensão. É uma região voltada para o desenvolvimento de atividades industriais de médio e grande porte, com o objetivo de atrair investimentos e promover o crescimento econômico do município. Abriga uma série de empresas e indústrias dos segmentos metalúrgico, artefatos de concreto, fabricação de tecidos, logística, reciclagem, injeção plástica, mistura de asfalto e distribuidoras de pneus. A região se beneficia da infraestrutura e da proximidade com importantes rodovias, o que facilita o acesso a Porto Alegre e a outros centros urbanos e portos do estado.

O estudo foi elaborado na região mais urbanizada do LDI, atendida por 13 linhas de ônibus e 11 paradas de ônibus regulamentadas, porém apenas 8 dessas paradas estão em operação, que cobrem uma região limitada do município de Gravataí. O transporte particular e fretado é amplamente utilizado pelas empresas. Entre dezembro e fevereiro, a demanda por transporte público diminui devido às férias dos trainees e pequenos aprendizes, resultando na restrição de linhas e inatividade temporária de paradas. A proposta em consideração envolve a implantação de um HM (Parada 74) em uma via estruturadora por onde transitam 76 linhas de transporte coletivo, que atendem grande parte da população do município de Gravataí, bem como da Região Metropolitana. Este HM está situado a aproximadamente 1,8 km do LDI. O espaço seria estruturado com paradas de ônibus, bicicletários e estações de compartilhamento de bicicletas, funcionando como ponto estratégico de integração entre modais. A iniciativa busca facilitar a mobilidade de curta e média distância, especialmente nos trechos de primeira e última milha, interligando uma área de alta densidade de transporte coletivo ao LDI.

2.2. Procedimentos Metodológicos

O estudo seguiu uma abordagem qualitativa, a partir de entrevistas individuais, para explorar as percepções, benefícios, barreiras e recomendações atribuídos pelos participantes à implantação deste HM. O estudo foi estruturado em quatro etapas: (i) identificação do problema; (ii) elaboração do roteiro de entrevistas; (iii) coleta de dados, (iv) descrição, análise e interpretação dos resultados.

A primeira etapa envolveu a caracterização da área de estudo, das empresas ali localizadas e das condições de mobilidade. As entrevistas seguiram um roteiro semiestruturado, de modo a garantir a abordagem dos tópicos de interesse. O instrumento de pesquisa iniciou com a apresentação do conceito de HM e sua localização, seguida pelas perguntas. As perguntas buscaram compreender o funcionamento da empresa, as formas de acesso utilizadas pelos funcionários, as dificuldades enfrentadas, as percepções sobre a implantação do HM, seus benefícios e barreiras e recomendações para sua implementação. Considerando o total de 19 empresas instaladas na área em estudo no LDI, a amostra analisada representa aproximadamente 42% desse universo. Ela foi composta por oito representantes de empresas atuantes nos setores de manufatura, logística e fabricação de autopeças. A seleção das empresas levou em conta a representatividade setorial, o porte das empresas e sua relevância em relação aos objetivos da pesquisa. As entrevistas foram conduzidas presencialmente ou por videoconferência, gravadas com consentimento prévio dos participantes e, posteriormente, transcritas integralmente. Os respondentes foram indicados pelas respectivas empresas em razão de seu conhecimento sobre o funcionamento do sistema de transporte, tanto interno quanto externo, no âmbito organizacional. As entrevistas tiveram duração média de trinta minutos cada uma. O roteiro de perguntas foi padronizado e utilizado em todas as entrevistas. O questionário completo, assim como a apresentação do HM, sua localização, a abrangência das linhas de transporte coletivo do LDI e da Parada 74 está disponível em Apresentacao_HM_Pesquisa_Qualitativa_ANPET2025.pdf

A estrutura do roteiro de entrevistas e a análise dos dados foi fundamentada em duas abordagens complementares. A Teoria da Difusão da Inovação, proposta por Rogers (2003), a qual orientou a divisão das perguntas e da análise em três eixos principais: benefícios percebidos, barreiras e recomendações. Esta teoria descreve o processo pelo qual uma inovação é adotada por indivíduos ou organizações ao longo do tempo. Propõe que a adoção de inovações depende da forma como estes a percebem, busca entender as percepções, resistências, motivações e ritmo de adoção de algo novo. A segunda abordagem é a perspectiva dos Sistemas Sociotécnicos (Trist, 1981), a qual propõe que a adoção de uma inovação não depende somente da tecnologia,

mas também das condições sociais, organizacionais e institucionais que a viabilizam ou impedem. Essa abordagem foi utilizada para classificar os conteúdos dentro de cada eixo em quatro dimensões sociotécnicas: (i) Econômica, (ii)Social, (iii) Política/governança e (iv) Infraestrutura e Transporte. O embasamento e definição das dimensões foram baseados no estudo desenvolvido por Ruoso e Ribeiro (2023).

A partir dos relatos dos entrevistados, foi realizada uma análise de conteúdo (Bardin, 2016), com suporte do software NVivo. Os relatos foram codificados, sendo que cada código representa uma ideia ou menção recorrente realizada pelos entrevistados. Foram utilizadas métricas de frequência usuais na análise qualitativa, em especial a métrica de cobertura, que indica a proporção do conteúdo atribuído a um determinado código em relação ao total da pergunta associado a cada eixo. Com base nos valores de cobertura, foram elaborados gráficos de Pareto para identificar os elementos mais mencionados em cada eixo de análise, isto é, benefícios, barreiras e recomendações. Esses elementos foram posteriormente organizados nas quatro dimensões sociotécnicas previamente definidas. A frequência relativa de cada dimensão foi sintetizada em tabelas e gráficos, indicando quais dimensões foram mais abordadas pelos entrevistados em cada eixo. Por último, foi realizada uma análise das relações entre benefícios, barreiras e recomendações dentro de cada dimensão, resultando em um gráfico de inter-relações que mostra como os diferentes fatores interagem na adoção do HM.

Este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação e aplicação de seus resultados. A investigação foi realizada exclusivamente a partir da perspectiva das empresas situadas no LDI, sem contemplar diretamente as percepções dos trabalhadores ou de outros usuários potenciais do HM. Tal delimitação compromete a abrangência da análise no que tange aos impactos sociais e individuais da proposta, restringindo a compreensão de aspectos subjetivos e comportamentais que podem influenciar a aceitação e a utilização efetiva da infraestrutura. Pesquisas futuras deverão ampliar o escopo analítico, incorporando múltiplas perspectivas, incluindo as dos usuários finais e gestores públicos, com o objetivo de aprofundar o conhecimento acerca da viabilidade e dos impactos decorrentes da implantação do HM na área industrial.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

As quatro dimensões definidas neste estudo contemplam os seguintes aspectos. A dimensão Econômica considera o impacto financeiro da proposta e seu potencial para a geração de emprego. A dimensão Social aborda aspectos relacionados à qualidade de vida e à inclusão social. A dimensão de Infraestrutura e Transporte refere-se à disponibilidade e adequação da estrutura física existente, bem como à eficiência do sistema e à integração entre diferentes modos de transporte. Por fim, a dimensão Política e Governança contempla os mecanismos de gestão pública, a participação das empresas nos processos decisórios, e a capacidade pública e privada para planejamento e implementação de ações.

As análises das barreiras indicaram que, na visão dos entrevistados, a principal barreira está na dimensão Social, com 65% de cobertura, seguida da dimensão Política/Governança, com 21% de cobertura, e Infraestrutura e Transporte com cerca de 14%. A análise dos fatores (códigos) associados a barreiras evidenciou que o principal fator estaria relacionado à cultura organizacional, correspondendo a aproximadamente 36% das referências a barreiras. Esse dado sugere uma resistência institucional a mudanças. Na sequência, destacam-se as barreiras relacionadas à insegurança pública (22%) e ao baixo envolvimento das empresas (19%), indicando que o envolvimento das empresas constitui desafio significativo a ser superado para a aceitação e utilização do HM.

Os principais benefícios estão concentrados nas dimensões Econômica, com 51%, e Infraestrutura e Transporte, com 42%, indicando forte impacto positivo na redução de custos, no aumento da eficiência no acesso às empresas e na melhoria da mobilidade. A dimensão Social aparece com menor representatividade (7%), sugerindo que os efeitos diretos da implantação do HM ocorrerão mais nos aspectos produtivos, econômicos e logísticos do que nas melhorias sociais. O fator mais citado é a possibilidade de integração entre diferentes modos de transporte, com 15% da cobertura de relatos dos benefícios. Esse dado evidencia o potencial da articulação multimodal como elemento-chave para a eficiência na utilização do HM. Em seguida, destacam-se a maior eficiência na atração de mão de obra, com 14%, e a substituição total do serviço de fretamento, com 12%, reforçando os efeitos positivos esperados na logística empresarial e no acesso ao trabalho.

As recomendações permitem identificar as áreas prioritárias para intervenção, orientando a tomada de decisão e garantindo que as ações propostas estejam alinhadas às principais barreiras diagnosticadas. As principais propostas se concentram nas dimensões Infraestrutura e Transporte, com 48%, e Política/Governança, com 26%. As dimensões Social (19%) e Econômica (6%) aparecem com destaque moderado. A análise das recomendações revela que as ações prioritárias para a implantação do HM, se concentram em: viabilizar o uso de patinetes e bicicletas na mobilidade urbana (13%), buscar o envolvimento das empresas (14%) e desenvolver estratégias eficazes de divulgação (11%). Tais recomendações indicam a necessidade de promover a mobilidade ativa, fortalecer a articulação institucional e ampliar a comunicação com os usuários.

A Figura 1 apresenta a relação entre os benefícios, barreiras e recomendações para a implantação de um HM, organizados por dimensões, destacando como as recomendações podem mitigar barreiras e potencializar benefícios.

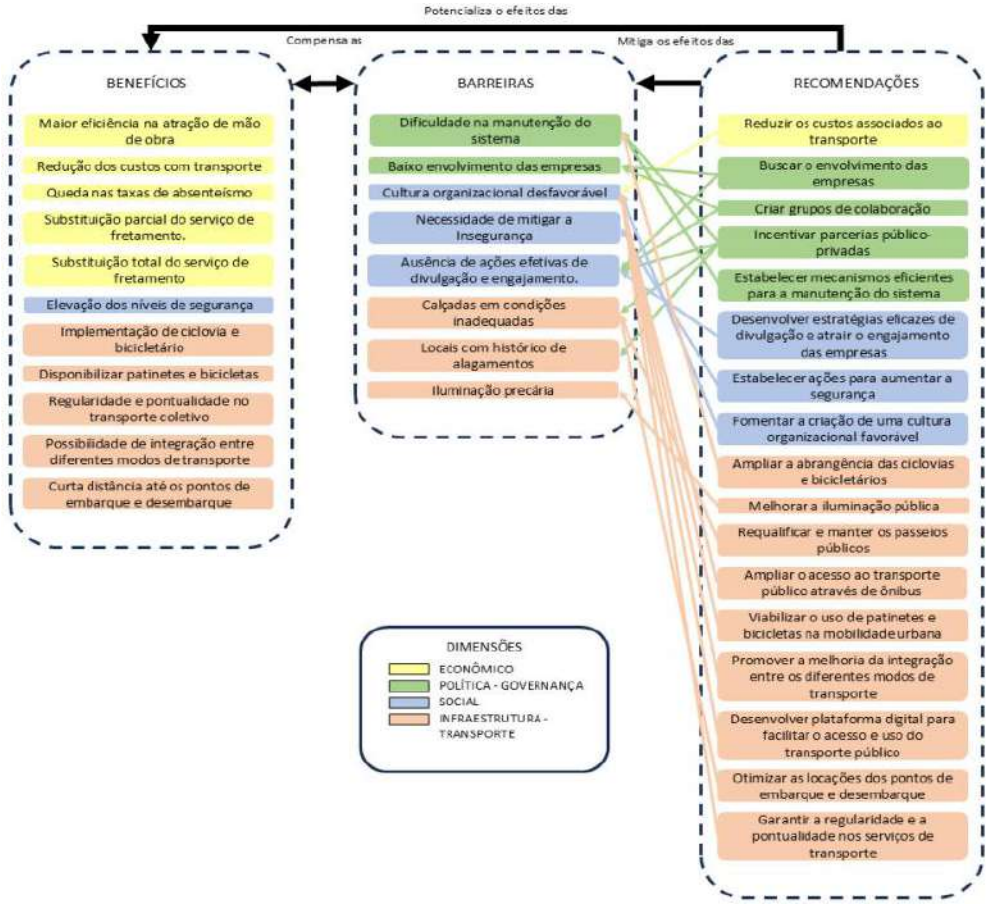


Figura 1: Relação – Benefícios x Barreiras x Benefícios

Os benefícios projetados para a implantação do HM incluem a redução de custos com transporte, o aumento da eficiência na atração de mão de obra, a diminuição das taxas de absenteísmo, a substituição parcial ou total do serviço de fretamento, a elevação dos níveis de segurança e a ampliação da integração entre modos de transporte. Tais benefícios refletem a potencial melhoria da mobilidade urbana e da qualidade de vida dos usuários. No entanto, esses benefícios são condicionados à superação de barreiras estruturais. Dentre elas, destacam-se: dificuldade na manutenção do sistema, baixo envolvimento das empresas, cultura organizacional desfavorável, ausência de ações efetivas de divulgação e engajamento, calçadas em condições inadequadas, histórico de alagamentos nos acessos e iluminação pública precária. Estas barreiras comprometem tanto a viabilidade operacional do HM quanto sua aceitação e utilização pela população.

Diante disso, as recomendações estratégicas apresentam-se como medidas de mitigação essenciais. Na dimensão da política-governança, destaca-se a necessidade de estabelecer parcerias público-privadas, mecanismos eficientes de manutenção e ações de engajamento empresarial. Na dimensão infraestrutura-

transporte, é fundamental garantir a regularidade e a pontualidade dos serviços, desenvolver plataformas digitais de acesso e promover a integração entre os diferentes modais. Em relação à infraestrutura, recomenda-se a requalificação de calçadas e espaços públicos, melhoria da iluminação urbana e ampliação das redes cicloviárias e bicicletário. Complementarmente, ações de comunicação e sensibilização devem ser promovidas para fomentar uma cultura organizacional favorável à mobilidade sustentável.

As relações entre os três eixos sugerem que a eficácia dos benefícios está associada à capacidade de mitigar as barreiras por meio das recomendações sugeridas. As recomendações, por sua vez, atuam de forma direcionada sobre as barreiras específicas e, simultaneamente, criam condições para a materialização dos benefícios planejados. Essa abordagem reforça a importância de um planejamento integrado e multissetorial para a implantação de HM, garantindo sua funcionalidade, sustentabilidade e impacto positivo.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo identificou os principais benefícios, barreiras e recomendações da implantação de um HM nas proximidades do Loteamento Distrito Industrial, no município de Gravataí (RS), por meio de uma abordagem qualitativa com base na percepção de representantes de empresas atuantes na área. A pesquisa foi realizada através de entrevistas individuais a partir de um roteiro semiestruturado. Os relatos foram analisados utilizando métricas de frequência de manifestações com base em análise de conteúdo. O conteúdo das entrevistas foi estratificado em quatro dimensões sociotécnicas: Econômica, Social, Infraestrutura e Transporte e Política/Governança.

Os resultados apontaram que as principais barreiras estão associadas a dimensão Social, como a cultura organizacional desfavorável, a insegurança pública e ao baixo envolvimento das empresas. Tais obstáculos evidenciam a necessidade de uma articulação entre os setores público e privado, bem como de estratégias que promovam mudanças culturais. Por outro lado, os benefícios se concentram principalmente nas dimensões Econômica e Infraestrutura e Transporte, incluindo fatores como a redução de custos operacionais, a substituição de sistemas de fretamento e a maior integração entre os diferentes modos. Esses aspectos indicam que a implantação de um HM tem potencial significativo para beneficiar a logística empresarial, facilitar o acesso ao trabalho e fortalecer a atratividade da região para novos investimentos. As recomendações extraídas do estudo reforçam a importância de ações coordenadas que envolvam a disponibilização de modos de transporte alternativos, como bicicletas e patinetes, além de estratégias de divulgação e otimizar o acesso aos pontos de embarque e desembarque. Tais iniciativas poderão favorecer a adesão dos funcionários e potencializar uma mobilidade eficiente e sustentável.

Conclui-se, portanto, que a implantação de um HM no LDI de Gravataí poderia trazer benefícios para funcionários e empresas desde que acompanhada de intervenções estratégicas que enfrentem os principais entraves identificados. A adoção de políticas integradas, com foco na inovação e na governança colaborativa, poderá não apenas melhorar a mobilidade urbana local, mas também contribuir para o desenvolvimento socioeconômico da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnold, T., Frost, M., Timmis, A., Dale, S., & Ison, S. (2022). *Mobility Hubs: Review and Future Research Direction. Transportation Research Record*, 2677(2), 858-868. https://doi.org/10.1177/03611981221108977 (Original work published 2023)

Bardin, Laurence. *Análise de Conteúdo.* São Paulo: Edições 70, 2016.

Blad, K., Homem de Almeida Correia, G., van Nes, R., & Anne Annema, J. (2022). *A methodology to determine suitable locations for regional shared mobility hubs. Case Studies on Transport Policy*, 10(3), 1904-1916. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.08.005

Blank, Cynthia; Uriarte, Ana Margarita. (2024). *Definições e tipologias dos hubs de mobilidade: Uma revisão sistemática da literatura.*

Liao, F, Dissanayake, D & Homem de Almeida Correia, G 2024, *Modelling the complementarity and flexibility between different shared modes available in smart electric mobility hubs (eHUBS), Transportation Research Part A*: *Policy and Practice*, vol. 190, 104279. https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104279

Rogers, Everett M. *Diffusion of Innovations*. 5. ed. New York: Free Press, 2003.

Ruoso, Ana Cristina; Ribeiro, José Luis Duarte. *An assessment of barriers and solutions for the deployment of electric vehicles in the Brazilian market. Transport Policy*, v. 127, p. 218-229, 2022.

https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.09.004
Stadnichuk, Vladimir; L. Merten; C. Larisch; G. Walther. (2024). *Optimization of mobility hub locations for a sustainable mobility system. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, [S.l.], v. 26, p. 101193, 2024. ISSN 2590-1982. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101193.
Trist, E. L. *Evolution of socio-technical systems: a conceptual framework and an action research program.* Toronto: Ontario Quality of Working Life Centre, 1981. (Volume no. 2, June 1981)

Katyuza Torres Costa Jorge (katyuzacosta@hotmail.com)
Helena Beatriz Bettella Cybis (helenabc@ufrgs.br)
Ana Margarita Larrañaga Uriarte (analarra@producao.ufrgs.br)
Raul Júlio Campelo Motta (rauljmotta@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Sistemas de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Rua Praça Argentina, 09, Centro Histórico, Porto Alegre, RS, Brasil.

IDENTIFICAÇÃO DE *HOTSPOTS* DE CRIMES E SINISTROS DE TRÂNSITO NO ENTORNO DE PONTOS DE ÔNIBUS

Lara Reis Rodrigues[1], Cira Souza Pitombo[1], André Luiz Barbosa Nunes da Cunha[1], Ana Paula Camargo Larocca[1], Antônio Clóvis Pinto "Coca" Ferraz[1]
[1]Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO
O objetivo do artigo é identificar *hotspots* de crimes e sinistros de trânsito no entorno de pontos de parada de ônibus, com estudo de caso no município de São Carlos, SP, Brasil. O método proposto consiste em três etapas: (i) preparação da base de dados, com definição da área de estudo, coleta e tratamento dos dados em ambiente SIG; (ii) análise exploratória, com definição da técnica de estatística multivariada – análise de cluster; e (iii) processo de clusterização, incluindo mapeamento. Os resultados identificaram três clusters, com o terceiro disposto na área mais central da cidade, configurando-se como os *hotspots* de crimes e sinistros de trânsito. Os demais clusters mostraram padrões decrescentes conforme a distância ao centro, acompanhando a redução nas ocorrências e na oferta de ônibus. Ambos os fenômenos apresentaram padrões espaciais semelhantes, evidenciando a necessidade de políticas públicas integradas entre segurança pública e segurança viária.

1. INTRODUÇÃO

As cidades contemporâneas são marcadas por desafios que envolvem simultaneamente questões de segurança pública e segurança viária. Apesar de tratarem de temas distintos, ambas as áreas compartilham o mesmo espaço urbano e podem apresentar sobreposições espaciais significativas. Estudos prévios abordaram, de forma isolada, a concentração de crimes em pontos de ônibus (Ceccato *et al*., 2015; Hart; Miethe, 2014) ou a relação entre tráfego urbano e sinistros de trânsito (Ma *et al*., 2021; Xu *et al*., 2024). No entanto, há escassez de trabalhos que integrem, de maneira conjunta, essas duas dimensões no contexto urbano.

A teoria da escolha racional, de Cornish e Clarke (1986), sustenta que o crime emerge de oportunidades geradas em escala microlocal, focadas em alvos vulneráveis. Nessa perspectiva, estudos apontam que os níveis de criminalidade costumam ser maiores em uma área específica das cidades – a área central, onde o fluxo de pessoas é maior –, seguindo um padrão decrescente em direção às periferias, à medida que o fluxo de pessoas diminui (Ceccato *et al*., 2015; Ceccato, 2018).

Ademais, pesquisas revelaram que áreas que possuem pontos de ônibus apresentam maior propensão a atividades criminosas quando comparadas a regiões sem tais estruturas (Hart; Miethe, 2014; Ceccato *et al*., 2015; Levine; Wachs, 1986; Loukaitou-Sideris, 1999; Newton; Bowers, 2007; Smith; Cornish, 2006; Tsai *et al*., 2011). Segundo Tsai *et al*. (2011), dentre os fatores que mais influenciam a ocorrência de crimes nos pontos de ônibus e em áreas próximas aos mesmos, destacam-se a maior frequência e o maior número de linhas de ônibus, grande movimentação de pessoas, a proximidade a locais que facilitam a fuga e a ausência de policiamento. Nesse contexto, pontos de ônibus são considerados intrinsecamente criminogênicos (Ceccato *et al*., 2015). Assim, estudos demonstraram que o crime tende a se concentrar em determinados "*hotspots*" (Sherman, 1995), associando-se à ideia de que um número limitado de pontos de ônibus da cidade tende a atrair um número excessivo de crimes (Loukaitou-Sideris, 1999).

Por outro lado, com dinâmica semelhante, pesquisas indicam que as áreas centrais das cidades, caracterizadas por maior densidade de tráfego, concentração de pedestres e intensa oferta de transporte público coletivo, estão associadas a taxas mais elevadas de sinistros de trânsito (Ma *et al*., 2021; Xu *et al*.; 2024; Qi *et al*., 2022; Zhang *et al*., 2020), contribuindo também com a severidade dos sinistros (Ma *et al*., 2021). Por sua vez, Xu *et al*. (2024) evidenciam que a presença de pontos de ônibus com alto volume de usuários contribui para o aumento da frequência estimada de sinistros de trânsito.

Dessa forma, o presente artigo parte da hipótese de que crimes e sinistros de trânsito compartilham padrões espaciais similares, concentrando-se em áreas centrais da cidade, com maior densidade populacional e oferta de transporte coletivo. O objetivo do estudo é identificar e caracterizar *hotspots* de crimes e de sinistros de trânsito no entorno de pontos de parada de ônibus, com estudo de caso no município de São Carlos (SP), contribuindo para uma abordagem integrada e inovadora entre segurança pública e planejamento viário.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa é quali-quantitativa e incorpora abordagens indutivas e dedutivas (Marconi; Lakatos,

2017), organizada em três etapas: (i) preparação da base de dados; (ii) análise exploratória da base de dados; e (iii) processo de clusterização. O estudo de caso foi realizado em São Carlos, SP, cidade de porte médio, com aproximadamente 254 mil habitantes (IBGE, 2022).

A base de dados sobre o transporte público foi fornecida pela Prefeitura Municipal (2022), composto por 1266 pontos de parada e por 83 linhas de ônibus. A Figura 1 ilustra o sistema de transporte público coletivo urbano por ônibus de São Carlos, utilizando tais dados. As ocorrências criminais foram obtidas do *dataset* "*SPSafe*" (Freitas *et al.* 2023), do ICMC-USP, com categorias que incluem feminicídio, furto e roubo de celulares e veículos, homicídio, latrocínio, entre outros, considerando o ano de 2022, sendo o mais recente com dados disponíveis. Os sinistros de trânsito foram extraídos do portal "Infosiga SP" (2024), considerando sinistros fatais e não fatais, como atropelamentos, capotamentos e colisões diversas para o ano de 2022, totalizando 1677 ocorrências de crimes e 1035 sinistros de trânsito. Nesse estudo, todas as categorias criminais foram agregadas em uma única contagem anual por localização, sem diferenciação tipológica. A quantificação espacial foi realizada por meio de *buffers* circulares ao redor dos pontos de ônibus. Procedimento idêntico foi adotado para os sinistros de trânsito, igualmente considerados de maneira agregada.

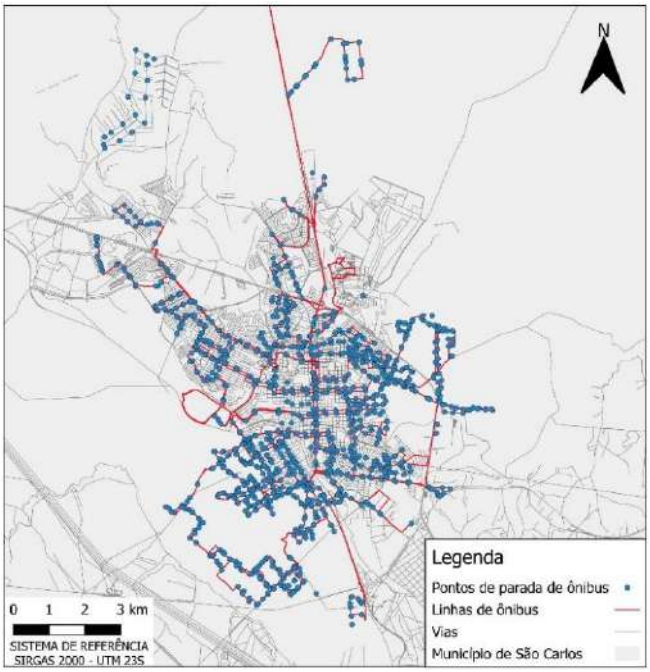


Figura 1: Mapa do sistema de transporte público coletivo urbano por ônibus de São Carlos, elaborado em SIG.
Fonte: Elaboração própria com dados da Prefeitura Municipal de São Carlos (2022) e IBGE (2022).

Todos os dados foram processados em ambiente SIG, com aplicação de *buffers* circulares de 100 a 800 metros, em intervalos de 100 metros, em torno dos pontos de ônibus. Para cada raio, foi contabilizada a quantidade de crimes, sinistros e linhas de ônibus disponíveis, totalizando 17 variáveis georreferenciadas – sendo 16 variáveis referentes às quantidades de crimes e de sinistros e 1 variável relativa ao número de linhas de ônibus que passam em cada ponto de parada. Posteriormente, foi iniciada uma análise exploratória visando investigar o impacto dos raios dos *buffers* sobre a distribuição e a variabilidade dos dados, o que foi realizado através da fragmentação da base de dados original, de 17 variáveis, em oito bases distintas, referentes aos tamanhos de raio de *buffers*.

O método de análise de cluster foi aplicado separadamente em oito subconjuntos (um para cada *buffer*), a fim de agrupar os pontos de ônibus com características semelhantes e identificar padrões, considerando-se a concentração de ocorrências de crimes e sinistros de trânsito e o número de linhas de ônibus. Considerada como um método de estatística multivariada, a análise de cluster agrupa os dados com base em determinadas características próprias, tendo como premissa maximizar a homogeneidade dentro dos grupos e maximizar a heterogeneidade entre os grupos (Kaufman; Russeeuw, 1990).

Tal abordagem se revelou útil para o objetivo do estudo, uma vez que viabiliza a identificação dos locais mais críticos (*hotspots*), em relação às variáveis mencionadas. Foi empregado o método *K-means*, um algoritmo não

supervisionado que encontra similaridades entre os dados, agrupando-os de acordo com o número de clusters, determinado pelo argumento *k* (Kaufman; Russeeuw, 1990; Bonam *et al*., 2023). Utilizou-se o algoritmo *K-means* através do cálculo da distância euclidianas. A escolha do *K-means* é justificada por sua robustez na análise de grandes volumes de dados georreferenciados (Bonam *et al*., 2023), como nesse caso.

Posteriormente, foi essencial analisar qual o número ótimo de clusters, tendo sido aplicados o "método do cotovelo" e o "método da silhueta". A aplicação dos dois métodos foi realizada nas oito bases de dados, separadamente. Verificou-se que o número ótimo *k* de clusters foi entre 2 e 3. Para realizar a clusterização das oito bases de dados, aplicou-se o algoritmo *k-means* do pacote *stats* da linguagem R, testando inicialmente k = 2 e, posteriormente, k = 3. Observou-se que k = 2 gerou uma segmentação mais generalista, enquanto k = 3 possibilitou uma divisão mais precisa e informativa, destacando diferenças estatísticas relevantes entre os grupos. Como as variáveis já estavam em escalas compatíveis, não foi necessária a normalização. A segmentação com k = 3 foi definida como a mais adequada por oferecer melhor interpretação e representatividade dos dados em todas as bases analisadas.

Para cada uma das bases de dados, foram gerados mapas interativos com o objetivo de visualizar espacialmente os clusters obtidos com o algoritmo *K-means* (k = 3). As coordenadas geográficas foram incorporadas às bases, permitindo associar cada ponto de ônibus ao respectivo cluster. Esse processo permitiu a visualização de padrões específicos entre os clusters na malha urbana.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de cluster resultou na formação de três agrupamentos em cada base, sendo selecionados os *buffers* de 200, 300, 400, 500 e 600 metros para apresentação dos resultados, com destaque para o raio de 400 metros, alinhado ao planejamento do transporte público coletivo urbano por ônibus (Vuchic, 1981). *Buffers* de 100 metros captaram apenas ocorrências locais, dificultando distinções, enquanto os de 700 e 800 metros geraram sobreposição excessiva, comprometendo a precisão dos agrupamentos. A escolha das cinco escalas foi sustentada pelos estudos de Vuchic (1981), que recomenda distâncias máximas entre paradas de transporte público coletivo urbano de 400 a 600 metros, e corroborada pelos gráficos de dispersão gerados, que evidenciaram a segmentação dos dados. A Figura 2 ilustra os padrões espaciais dos três clusters gerados a partir da base de dados com *buffer* de 400 metros, escolhida para representar os resultados neste artigo por ser a referência central do estudo. Ressalta-se que os mapas foram elaborados em software estatístico de linguagem R, aplicando a base cartográfica "*Carto Positron*", disponível no *Open Street Map* (OSM) (2024).

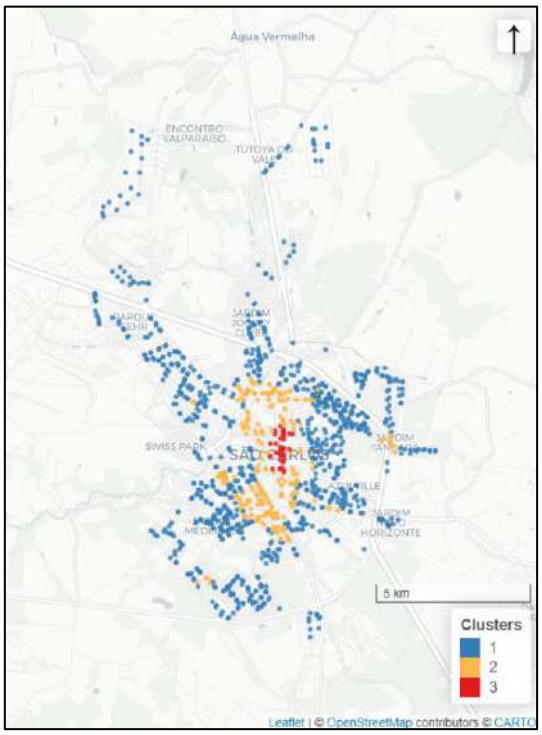


Figura 2: Mapa dos três padrões espaciais na base de dados com raio de *buffer* de 400 metros.
Fonte: Elaboração própria com mapa base *Carto Positron* OSM (2024).

Com base na Figura 2, foram identificados três padrões espaciais bem definidos. O cluster 1, representado em azul no mapa, concentrou a maioria dos pontos de ônibus, localizados predominantemente nas áreas periféricas de São Carlos, onde há baixa oferta de transporte público coletivo por ônibus e o menor número de crimes, sinistros de trânsito. O cluster 2, em amarelo, corresponde a zonas de transição com níveis intermediários entre a periferia e o centro, sugerindo áreas com vulnerabilidade moderada. Já o cluster 3, em vermelho, corresponde essencialmente ao núcleo central da cidade, concentrando os maiores índices dos três indicadores, representando os *hotspots* urbanos de crimes e sinistros de trânsito. Esse padrão reforça a hipótese inicial da pesquisa e evidencia que pontos de ônibus, por sua localização estratégica, são zonas críticas tanto para a segurança pública quanto para a segurança viária.

Em vista dos resultados obtidos, verificou-se maior incidência de crimes e sinistros de trânsito na área central de São Carlos, onde há maior oferta de transporte público coletivo por ônibus. Com o aumento da distância ao centro, ambos os fenômenos apresentaram declínio, indicando padrões espaciais semelhantes entre segurança pública e segurança viária. Tal relação reforça a importância de políticas públicas integradas, como as baseadas no conceito de "*Crime Prevention Through Environmental Design"* (CPTED), que utiliza elementos de design urbano – como iluminação e vigilância natural a partir de fachadas ativas – para reduzir crimes e aumentar a percepção de seguridade (Crowe, 2000; Casteel; Peek-Asa, 2000). Em segurança viária, estudos mostram que câmeras de fiscalização de velocidade podem reduzir entre 17% e 58% das colisões com feridos (Pilkington; Kinra, 2005), enquanto intervenções em infraestrutura, como ruas completas com faixas exclusivas para pedestres e ciclistas, resultaram em redução de até 88% nas lesões de pedestres (Campbell *et al*., 2004). Assim, a combinação de estratégias pode contribuir para ambientes urbanos mais seguros.

4. CONCLUSÕES

A pesquisa demonstrou que há sobreposição espacial significativa entre crimes e sinistros de trânsito no entorno de pontos de ônibus, especialmente em áreas centrais. Esse contexto indica que o fluxo intenso de pessoas e veículos nessas áreas cria condições propícias tanto para atividades criminosas como para conflitos no trânsito, o que pode ser explorado de forma mais aprofundada em futuras pesquisas através da inserção de outras variáveis nas análises de estatística multivariada, a fim de identificar outras possíveis relações na dinâmica urbana. Ademais, os métodos empregados podem ser aplicados em outras cidades, em diferentes contextos urbanos, apresentando uma abordagem robusta e eficaz para a identificação de padrões espaciais e *hotspots* de crimes e sinistros.

É importante destacar que a pesquisa tem como limitação a consideração dos dados somente do ano de 2022 para São Carlos. Reconhece-se, ainda, que padrões de configuração urbana predominantes na literatura internacional nem sempre capturam as especificidades morfológicas e socioeconômicas das cidades brasileiras, o que restringe a aplicabilidade direta dos resultados e impõe cautela quanto à sua generalização. No entanto, com os métodos e dados considerados, foi possível obter contribuições para o estado da arte e para a gestão pública, identificando que há uma relação entre duas esferas distintas, segurança pública e segurança viária, indicando a importância em propostas de políticas públicas integradas no planejamento urbano e de transportes das cidades.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil – Processo nº 2024/10673-7. A pesquisa também contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processos 304448/2023-0, 407056/2022-0, 305973/2023-1 e 311964/2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bonam, J.; L. R. Burra; G. S. V. N. S. Susheel; K. Narendra; M. Sandeep e G. Nagamani (2023) Crime Hotspot Detection using Optimized K-means Clustering and Machine Learning Techniques. *2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Coimbatore, India, p. 787-792. DOI: 10.1109/ICESC57686.2023.10193563

Campbell, B. J.; C. V. Zegeer; H. H. Huang e M. J. Cynecki (2004) *A Review of Pedestrian Safety Research in the United States and Abroad.* Federal Highway Administration (FHWA), Publication No. FHWA-RD-03-042.

Casteel, C. e C. Peek-Asa (2000) Effectiveness of CPTED in reducing robberies. *American Journal of Preventive Medicine*, v. 18, n. 4, p. 99-115. DOI: 10.1016/s0749-3797(00)00146-x

Ceccato, V.; O. Cats e Q. Wang (2015) The Geography of Pickpocketing at Bus Stops: An Analysis of Grid Cells. In: Ceccato, V., Newton, A. (eds). *Safety and security in transit environments: An interdisciplinary approach*. Crime Prevention and Security Management. Palgrave Macmillan, London. DOI: 10.1057/9781137457653_5

Ceccato, V. (2018) Crime in transit environments: lessons from Stockholm (Sweden) and São Paulo (Brazil) metro systems: **交通**环境犯罪：从瑞典斯德哥尔摩和巴西圣保罗地 铁系统的经验总结. *Landscape architecture*, v. 7. Disponível em: http://kth.diva-portal.org/smash/ get/diva2:1244421/FULLTEXT01.pdf

Cornish, D. B. e R. V. G. Clarke (1986) *The Reasoning Criminal: Rational Choice Perspectives on Offending*. Springer-Verlag, 246 p. Disponível em: https://books.google.com. br/books?id=dWwXjwEACAAJ

Crowe, T. D. (2000) *Crime prevention through environmental design: Applications of architectural design and space management concepts*. Oxford: Butterworth-Heinemann. Butterworth-Heinemann.

Freitas, J. B.; J. P. Clarindo e C. D. Aguiar (2023) SPSafe: um *dataset* sobre dados de criminalidade no estado de São Paulo. *Anais do V Dataset Showcase Workshop - DSW*, p. 48-57. DOI: 10.5753/dsw.2023.233945

Hart, T. C. e T. D. Miethe (2014) Street robbery ans public bus stops: a case study of activity nodes and situational risk. *Security Journal*, v. 27, n. 2, p. 180-193. DOI: 10.1057/sj.2014.5

IBGE (2022) *Panorama do Município de São Carlos.* Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, Disponível em: < https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>. Acesso em: 03/12/2024.

Infosiga (2024) *Estatística de sinistros de trânsito no estado de São Paulo*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: https://www.infosiga.sp.gov.br/#sinistros (acesso em 09/12/2024).

Kaufman, L. e P. J. Rousseeuw (1990) *Find Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. New York: Wiley, 368 p.

Levine, N. e M. Wachs (1986) Bus Crime in Los Angeles: Measuring the Incidence. *Transportation Research Part A: General*, v. 20, n. 4, p. 273-284. DOI: 10.1016/0191-2607(86)90086-5

Loukaitou-Sideris, A. (1999) Hot spots of bus stop crime: The importance of environmental attributes. *Journal of the American Planning association*, v. 65, n. 4, p. 395-411.

Ma, Q.; G. Huang e X. Tang (2021). GIS-based analysis of spatial–temporal correlations of urban traffic accidents. *European transport research review*, v. 13, n. 50, p. 1-11. DOI: 10.1186/s12544-021-00509-y

Marconi, M. A. e E. M. Lakatos (2017) *Fundamentos de metodologia científica* (8ª ed.). São Paulo: Atlas.

Newton, A. e K. Bowers (2007) The Geography of Bus Shelter Damage: The Influence of Crime, Neighbourhood Characteristics and Land-Use. *The Internet Journal of Criminology.* Disponível em: http://www.internetjournalofcriminology.com

OSM (2024) *Basemap Município de São Carlos*. Open Street Map. Disponível em: https://www.openstreetmap.org/search?query=S%C3%A3o%20Carlos%2C%20SP#map=14/-22.01083/-47.88434 (acesso em 03/12/2024).

Pilkington, P. e S. Kinra (2005) Effectiveness of speed cameras in preventing road traffic collisions and related casualties: systematic review. *BMJ*, v. 330, p. 331–334. DOI: 10.1136/bmj.38324.646574.AE

Prefeitura Municipal de São Carlos (2022) *Abrigo do ponto de ônibus*. São Carlos: Prefeitura Municipal de São Carlos. Disponível em: http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/transporte-transito/154077-abrigo-do-ponto-de-onibus.html (acesso em 03/12/2024).

Qi, M.; X. Hu; X. Li; X. Wang e X. Shi (2022) Analysis of road traffic injuries and casualties in China: a ten-year nationwide longitudinal study. *PeerJ*, v. 10, p. e14046. DOI: 10.7717/peerj.14046

Sherman, L. (1995) Hot spots of crime and criminal careers of places. In J. Eck & D. Weisburd (Eds.), *Crime and place*, p. 35-52. Monsey, NY: Willow Tree Press.

Smith, M. J. e D. B. Cornish (2006) S*ecure and Tranquil Travel: Preventing Crime and Disorder on Public Transport*. London: UCL Jill Dando Institute of Crime Science.

Tsai, L. C-F.; Y. Zhang e L. T. Hoover (2011) *Distribution of Street Robberies in Relation to Bus Stops in Houston*. Paper presented 68th Annual Meeting of the American Association of Criminology, Washington, DC.

Vuchic, V. R. (1981) *Urban Public Transportation – Systems and Technology*. New Jersey, Prentice Hall.

Xu, C.; J. Gao; F. Zuo e K. Ozbay (2024) Estimating Urban Traffic Safety and Analyzing Spatial Patterns through the Integration of City-Wide Near-Miss Data: A New York City Case Study. *Applied Sciences (2076-3417)*, v. 14, n. 14, p. 6378. DOI: 10.3390/app14146378

Zhang, Y.; H. Lu e W. Qu (2020) Geographical detection of traffic accidents spatial stratified heterogeneity and influence factors. *International journal of environmental research and public health*, v. 17, n. 2, p. 572. DOI: 10.3390/ijerph17020572

Lara Reis Rodrigues (larareisrodrigues@usp.br)
Cira Souza Pitombo (cirapitombo@usp.br)
André Luiz Barbosa Nunes da Cunha (alcunha@usp.br)
Ana Paula Camargo Larocca (larocca.ana@usp.br)
Antônio Clóvis Pinto "Coca" Ferraz (coca@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, São Carlos, SP, Brasil.

IMPACTOS DE UMA RODOVIA URBANA NOS PADRÕES DE MOBILIDADE E CONDIÇÕES SOCIOECONÔMICAS DE COMUNIDADES LINDEIRAS: O CASO DA BR-376, MARINGÁ-PR

Sarah Carolyne Munhoz Pereira Ishii, Marinna Carneiro Cunningham, Jan Lincoln Lugli, Thiago Botion Neri
Universidade Estadual de Maringá

RESUMO
No contexto urbano, infraestruturas de transporte frequentemente se comportam como barreiras à integração espacial e à mobilidade local. Entre os efeitos destacam-se o aumento de custos de deslocamento, insegurança viária, limitação de opções de travessia e comprometimento da acessibilidade. Este estudo tem como objetivo avaliar os impactos do efeito barreira imposto pela BR-376 sobre os padrões de viagem e o perfil socioeconômico dos moradores lindeiros em Maringá (PR). A partir de dados do Plano de Mobilidade, definiram-se duas áreas: a de estudo — com bairros lindeiros ao Contorno Norte cujo acesso às principais regiões exige a travessia da rodovia — e de controle — isenta dessa barreira. A análise abrangeu variáveis como renda familiar, modal de transporte, origens e destinos de viagens, gênero e frota veicular domiciliar. Os resultados indicam que a rodovia atua como barreira espacial, associando-se a diferenças no perfil sociodemográfico e à reconfiguração de origens das viagens.

1. INTRODUÇÃO

A acelerada urbanização brasileira, aliada à expansão de rodovias, têm intensificado conflitos entre o fluxo veicular e as dinâmicas das cidades. Rodovias urbanas — também chamadas de travessias urbanas — demandam vazões contínuas para a circulação de trânsito de passagem, em contraste com o ritmo irregular e multifacetado dos deslocamentos cotidianos. Esse atrito não apenas compromete a acessibilidade, mas também fragmenta o tecido social de comunidades que vivem ao longo dessas vias (Freire, 2003; Silva Júnior & Ferreira, 2008; Pontes, 2006).

Impactos primários — como o aumento de riscos de acidentes, a redução da acessibilidade para pedestres e ciclistas e a elevação nos tempos de viagem — são evidenciados por Mouette e Waisman (2004). Além disso, destacam-se efeitos secundários como: mudanças de itinerários, redução do número de viagens a pé e diminuição de interações sociais, que geram alterações tanto em padrões de mobilidade quanto no uso do solo urbano (Silva Júnior e Ferreira, 2008). Embora o conceito de efeito barreira seja reconhecido na literatura, poucos trabalhos exploram de forma integrada seus desdobramentos em cidades brasileiras de médio porte, o que limitaria a proposição de intervenções eficazes à mitigação do fenômeno.

Diante desse cenário, este trabalho concentra-se em investigar como a configuração física e operacional do Contorno Norte (BR-376), em Maringá-PR, influencia as escolhas modais e a distribuição de atividades diárias de moradores lindeiros. Para tanto, são cruzadas informações do Plano de Mobilidade Urbana (PlanMob) com indicadores socioeconômicos domiciliares em: uma área de controle, na qual não há necessidade de cruzamento da rodovia, e uma área de estudo, que exige travessia obrigatória.

Ao preencher lacunas empíricas sobre as travessias urbanas, este estudo visa contribuir para o avanço do debate em políticas de mobilidade inclusivas e orientar o planejamento de intervenções que estabeleçam a conectividade urbana, promovendo o desenvolvimento territorial equilibrado e a melhoria da qualidade de vida.

2. METODOLOGIA

Este trabalho configura-se como uma pesquisa predominantemente exploratória de natureza quantitativa, estruturada como estudo de caso, tendo como objeto de investigação o efeito barreira causado pela rodovia Contorno Norte (BR-376) no município de Maringá (PR).

2.1. Área de estudo

O estudo concentra-se no perímetro urbano de Maringá, cidade de médio porte com cerca de 420.000 habitantes, localizada na mesorregião Norte Central Paranaense (IBGE, 2022). A infraestrutura viária em foco é o Contorno Norte, trecho da BR-376 inaugurado em janeiro de 2014, com 17,6 km de extensão, que configura como potencial obstáculo à mobilidade de pedestres e ciclistas. O Contorno Norte é representado, pela linha vermelha, na Figura 1.



Figura 1: Contorno Norte de Maringá (PR)

2.2. Delimitação das zonas

Para efeito de comparação, definiram-se duas zonas de tráfego:

- Área de estudo: bairros lindeiros ao Contorno Norte cujo acesso às principais regiões urbanas exige a travessia da rodovia;
- Área de controle: bairros com padrões de deslocamento não impactados diretamente pela barreira rodoviária.

A seleção dos bairros considerou, inicialmente, a relação de domicílios cadastrados no Plano de Mobilidade Urbana de Maringá (Planmob), confirmando-se cada endereço via *Google Maps* para evitar inconsistências de digitação. Entre os bairros da área de estudo destacam-se: Jardim Guairacá, Parque Hortência II e Conj. Habitacional João de Barro; já na área de controle, figuram: Jardim Paris, Conj. Residencial Ney Braga e Parque Hortência I. A Figura 2 apresenta os bairros que englobam as áreas de estudo e controle.



Figura 2: Mapa de Maringá e bairros das áreas analisadas

2.3. Fonte de dados

Utilizou-se dados provenientes do banco de dados de Origem-Destino e Domicílios do Planmob Maringá

(2023). Essa base inclui três planilhas principais – "Dados Domicílios", "Moradores" e "Viagens" – contendo informações sobre as características socioeconômicas dos residentes e seus padrões de deslocamento. Adicionalmente, recorreu-se ao IBGE para atualização de dados demográficos municipais e ao software *Google Earth Pro* para apoio na análise espacial.

2.4. Coleta e tratamento dos dados

A extração e preparação dos dados ocorreram em etapas:

- Filtragem por bairro: nas planilhas "Dados Domicílios" e "Moradores", aplicou-se filtro para isolar registros correspondentes às zonas de estudo e controle.
- Validação geográfica: cada rua listada foi conferida no Google Maps, corrigindo inconsistências e alocando corretamente domicílios em seus bairros.
- Segmentação de bases: geraram-se quatro conjuntos de dados independentes – "Domicílios Estudo", "Domicílios Controle", "Moradores Estudo" e "Moradores Controle" – mantendo-se ainda a planilha "Viagens" completa para posterior cruzamento.
- Limpeza e padronização: tratou-se de dados ausentes, eliminando-se registros duplicados e padronizando categorias socioeconômicas (faixa de renda, número de veículos por domicílio, modos de transporte).
- Integração: com uso de códigos únicos de domicílio, relacionaram-se as planilhas de moradores e viagens, obtendo-se um banco unificado.

2.5 Análise de dados

A análise envolveu duas frentes complementares:

- Análise descritiva e comparativa: Os conjuntos "Viagens Estudo" e "Viagens Controle" foram preparados no Excel, onde se aplicou a função PROCV para incorporar às tabelas de viagem as variáveis socioeconômicas retiradas de "Dados Domicílios" (quantidade de moradores, renda mensal, número de carros e motos). Para cada zona e por bairro calcula-ram-se frequências absolutas e percentuais das variáveis categóricas (gênero, faixa etária, posse de veículos, origem, destino, modo de transporte) e medidas de posição (média, mediana) para as variáveis contínuas (produção de viagens, renda).
- Análise espacial: Foi realizada a conferência e georreferenciamento via Google Maps/Google Earth Pro para garantir a alocação correta dos domicílios nos bairros selecionados. Em seguida, no QGIS usaram-se os dados municipais para produzir mapas temáticos por bairro. Esses mapas ilustram visualmente os contrastes entre áreas externas ao Contorno Norte e áreas internas, onde a circulação tende a ocorrer sem a travessia da rodovia.
- Testes estatísticos: Para verificar se as diferenças observadas entre a área de estudo e a área de controle eram apenas aparentes ou estatisticamente significativas, aplicaram-se testes de independência qui-quadrado (χ^2) para todas as variáveis categóricas. Construíram-se tabelas de contingência 2 × c (2 áreas × número de categorias) e, para cada uma, calculou-se o valor de χ^2, o grau de liberdade e o respectivo p-valor. A hipótese nula considerou distribuições iguais entre as áreas; p-valores inferiores a 0,05 levaram à rejeição dessa hipótese.

3. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos.

3.1 Características Socioeconômicas

A distribuição etária evidenciou a predominância do grupo "menor de 19 anos" em ambas as áreas (15,2% na área de estudo e 10,9% na de controle). O teste χ^2 indicou que o padrão etário geral diferiu de forma estatisticamente significativa entre as zonas ($p = 0{,}0016$). A principal contribuição para essa diferença foi a faixa "60–64 anos", que representou 11,2% na área de controle e apenas 3,1% na área de estudo, sugerindo maior permanência de idosos em bairros centrais.

Quanto ao gênero, a distribuição foi de 40,8% feminino e 48,4% masculino na área de estudo, contra 48,3% e 47,9% na de controle. Apesar da diferença percentual aparentemente pequena, o teste qui-quadrado apresentou p = 0,0062, rejeitando a hipótese de igualdade. Essa significância decorre principalmente do maior percentual de respostas "sem informação" na área de estudo e pelo tamanho amostral (223 na área de estudo e 267 na de

controle). Na prática, ao excluir "sem informação", observa-se apenas leve predominância masculina na área de estudo, e a diferença não se mantém estatisticamente significativa.

A distribuição do tamanho dos domicílios também diferiu significativamente ($p = 0{,}0011$). Embora a média de moradores por casa seja três em ambas as áreas, a área de estudo concentrou mais domicílios com quatro ou cinco moradores (13,0% com cinco pessoas, contra 7,1% no controle), enquanto no controle predominam casas com dois e três moradores.

Na análise de renda mensal, 60,1% dos domicílios da área de estudo declararam renda de até 2 salários mínimos, frente a 55,1% na área de controle; rendas de 4–10 salários mínimos foram 10,3% na área de estudo e 7,5% na de controle. O teste χ^2 resultou em $p = 0{,}0498$, indicando diferença marginalmente significativa. Em termos práticos, os valores são próximos, mas a área de controle apresenta alguns domicílios em faixas de renda mais altas, o que explica a significância estatística.

A posse de carros e de motos apresentou diferenças percentuais — 44,8% dos domicílios da área de estudo não possuem carro, contra 36,0% no controle; 87,4% não possuem motos na área de estudo, contra 82,8% no controle — porém os testes estatísticos não encontraram diferença significativa ($p = 0{,}073$ para carros e $p = 0{,}165$ para motos). Assim, embora a área de estudo tenha menos veículos motorizados, essa disparidade pode resultar da variabilidade natural da amostra.

3.2 Padrões de Viagem

As origens das viagens concentraram-se em "Casa" (65,9% na área de estudo; 71,2% no controle), seguidas de "Trabalho" (15,7% vs. 12,7%) e "Escola" (10,3% vs. 3,4%). O teste de independência indicou diferença significativa entre as distribuições ($p = 0{,}0123$), atribuída ao maior número de viagens que se iniciam no trabalho e na escola na área de estudo.

Para os destinos das viagens, "Trabalho" foi o destino mais comum em ambas as áreas (38,1% na área de estudo e 41,2% na de controle), seguido de "Casa". O teste χ^2 não identificou diferença significativa ($p = 0{,}77$). Em relação ao modo de transporte, observaram-se variações — 26,9% das viagens da área de estudo foram a pé contra 21,3% no controle; 29,2% das viagens no controle utilizaram automóvel com condutor, frente a 22,9% na área de estudo — entretanto, a distribuição geral dos dez modos analisados não foi estatisticamente diferente ($p = 0{,}30$). De maneira similar, a razão entre viagens motorizadas e não motorizadas não diferiu de forma significativa ($p = 0{,}07$). Em resumo, as diferenças percentuais observadas nos modos de deslocamento podem ser atribuídas à variabilidade amostral, e não necessariamente ao efeito da rodovia.

3.3 Confronto com estudos correlatos

A literatura descreve mecanismos coerentes com os resultados observados neste estudo. Anciaes e Jones (2020) descrevem que vias com alto volume/velocidade atuam como barreiras físico-psicológicas à caminhabilidade, elevando esforço de travessia, risco percebido e exposição a ruído/poluição, com potenciais efeitos sobre acessibilidade local e interações sociais (Anciaes; Jones, 2020). Em cidades médias brasileiras, Jesus e Rodrigues da Silva (2022) mostram que uma parcela dos moradores percebe velocidade e volume de tráfego como barreiras à caminhada e que variáveis como distância à via, tempo de residência e laços de vizinhança influenciam essa percepção (Jesus; Rodrigues Da Silva, 2022).

Nesse sentido, os resultados apontam para um cenário em que o contorno não apenas reorganiza aspectos espaciais da rotina (e.g., pontos de partida das viagens), como também se associa a perfis sociodemográficos e domiciliares distintos (e.g., estrutura etária e residentes por domicílios), enquanto não foram encontradas evidências estatísticas de alteração na composição modal — ressalvada a natureza observacional dos dados e a diferença de escopo entre os estudos citados e este trabalho.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o efeito-barreira do Contorno Norte (BR-376) sobre padrões de viagem e características socioeconômicas de moradores lindeiros em Maringá. A incorporação de testes de independência qui-quadrado permitiu distinguir diferenças estatisticamente robustas daquelas compatíveis com variação amostral. Identificaram-se diferenças significativas na estrutura etária, no tamanho dos domicílios e na distribuição das

origens das viagens ($p < 0,05$), além de um contraste marginalmente significativo em renda ($p \approx 0,05$, de pequena magnitude). Em conjunto, os resultados sugerem que o contorno atua sobretudo reconfigurando quem mora e de onde a mobilidade cotidiana se origina nas áreas lindeiras — domicílios ligeiramente maiores, população mais jovem e maior proporção de viagens que não se iniciam em "casa".

Por outro lado, posse de automóveis e motocicletas, destinos e a distribuição geral de modos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$). Em termos práticos, isso indica que o efeito-barreira se manifesta menos como "mudança direta de modo" e mais como restrição espacial do cotidiano.

Ao mesmo tempo, é prudente evitar inferências causais exclusivas: o estudo baseia-se em um delineamento transversal e observacional, apoiado em dados secundários, no qual eventuais inconsistências e categorias com baixa frequência em alguns estratos podem afetar pressupostos do χ^2. Além disso, a análise foi realizada no nível agregado, sem modelos multivariados que controlem renda, motorização e atributos do ambiente construído — fatores que podem influenciar os padrões observados.

Pesquisas futuras devem empregar análises multivariadas controlando simultaneamente renda, motorização e métricas do ambiente construído, além de incorporar indicadores de acessibilidade porta a porta e de conectividade de travessias. Recomenda-se, ainda, delineamentos quase-experimentais (pré/pós-implantação) para reforçar a identificação causal, estratégias que, em conjunto, podem isolar melhor o efeito da barreira frente a determinantes socioespaciais.

Como implicação prática, recomenda-se priorizar intervenções que reduzam a penalidade de travessia — travessias seguras, calçadas contínuas e conexões cicláveis —, aliadas a políticas de proximidade que encurtem distâncias entre serviços e equipamentos de bairro (saúde, educação, comércio). Em síntese, a BR-376 opera menos "decidindo o modo" e mais deslocando oportunidades e origens. Políticas que encurtem distâncias funcionais e melhorem a conectividade tendem a mitigar os efeitos da rodovia sobre a vida cotidiana de moradores de bairros lindeiros.

FINANCIAMENTO
Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da Bolsa de Mestrado – GM (processo nº 130512/2025-7) concedida a Jan Lincoln Lugli.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anciaes, P. e Jones, P. (2020) A comprehensive approach for the appraisal of the barrier effect of roads on pedestrians. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 134, p. 227–250.

Freire, L. H. C. V. (2003) Análise de tratamentos adotados em travessias urbanas - Rodovias arteriais que atravessam pequenas e médias cidades no RS. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022) *Cidades e Estados: Maringá* (PR). Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/maringa.html.

Jesus, M. C. R. de e RODRIGUES DA SILVA, A. N. (2022) Barrier Effect in a Medium-Sized Brazilian City: An Exploratory Analysis Using Decision Trees and Random Forests. *Sustainability*, v. 14, n. 10.

Mouette, D. e Waisman, J. (2004) Proposta de uma metodologia de avaliação do efeito barreira. *Revista dos Transportes Públicos* – ANTP, v. 26, 2º Trimestre.

Pontes, T. A. (2006) Contribuições para Modelo de Gestão de Impactos Ambientais de Travessias Rodoviárias em Áreas Urbanas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.

Prefeitura de Maringá. (2022) *PlanMob Maringá*. Disponível em: https://www3.maringa.pr.gov.br/semob/planmob/consolidado.

Silva Júnior, S. B. da e Ferreira, M. A. G. (2008) Rodovias em áreas urbanizadas e seus impactos, na percepção dos pedestres. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

Sarah Carolyne Munhoz Pereira Ishii (ra107686@uem.br)
Marinna Carneiro Cunningham (pg406347@uem.br)
Jan Lincoln Lugli (pg406344@uem.br)
Thiago Botion Neri (tbneri2@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, Av. Colombo 5790, Zona 7, Maringá/PR, Brasil.

JOB ACCESSIBILITY IN THE 15-MINUTE CITY: A COMPARATIVE ANALYSIS OF WALKING, CYCLING, AND E-BIKES IN FOUR BRAZILIAN CITIES

Thiago Vinicius Louro[1,3], Lucas Brandão Monteiro de Assis [1], Jorge Ubirajara Pedreira Junior[2], André Luiz Barbosa[1], Karst T Geurs[3]
[1]Universidade de São Paulo, [2]Universidade Federal da Bahia, [3]University of Twente

ABSTRACT
The 15-minute city concept aims to ensure access to essential services and employment within a short walk or bike ride. However, existing research has largely overlooked job accessibility and the role of emerging mobility modes such as e-bikes. This study examines job accessibility via walking, conventional bicycles, and e-bikes within the 15-minute city framework across four Brazilian cities: Natal, Goiânia, Salvador, and São Paulo. The results reveal that in Natal and Goiania, active transportation aligns well with the goals of the 15-minute city, providing access to jobs and services. In Salvador and São Paulo, greater distances make walking or cycling insufficient, risking the exclusion of underserved populations. For sprawled cities, integrating public transport into the 15-minute city framework is essential, as active transportation alone cannot overcome spatial challenges. E-bikes, however, can bridge gaps by extending the reach of active transportation, making the concept more feasible in less compact areas.

1. INTRODUCTION

The 15-minute city concept, defined by Moreno et al. (2021), envisions neighborhoods where residents can access all essential services and daily needs within 15 minutes of active transportation such as walking or cycling. These services include public schools, parks, libraries, grocery stores, retail outlets, workplaces, basic healthcare facilities, and recreational areas. The framework aims to foster livable neighborhoods, promote economic growth, support social cohesion, and enhance sustainability.

Despite growing research on the 15-minute city concept, significant gaps remain. One critical gap is the limited attention to job accessibility within this framework. While the concept encompasses various activities and services, employment opportunities are among its most critical components. Most studies so far have focused on amenities like schools, parks, and healthcare, often overlooking employment's pivotal role. This omission is problematic because job accessibility is fundamental to urban functionality and social equity. Cities function as labor markets, bringing people together to exchange skills, goods, and services (Bertaud, 2018). Poor job accessibility leads to inefficient labor allocation, hindered economic growth, and exacerbated social inequalities. Knap et al. (2023) emphasize that employment is particularly crucial to the 15-minute city concept, since commuting constitutes a significant portion of most individuals' daily travel.

Another gap lies in the predominant focus on walking as the primary mode of active transportation in existing literature. While walking is an important aspect of the concept, there has been insufficient exploration of cycling-based X-minute cities, especially those incorporating e-bikes. E-bikes hold significant potential to address many of the limitations associated with conventional cycling, such as longer distances and challenging terrain, as noted by Gehrke et al. (2020) and Pritchard et al. (2019). A notable exception is Knap et al. (2023), who examined e-bike penetration within the X-minute city framework.

This study seeks to address these gaps by focusing explicitly on job accessibility within the 15-minute city framework. We calculate cumulative accessibility to employment opportunities in four Brazilian cities of varying sizes, Natal, Goiânia, Salvador, and São Paulo, using three modes of active transportation: walking, conventional bicycles, and e-bikes. Accessibility is assessed across four time thresholds: 15, 20, 25, and 30 minutes. For each mode and time threshold, we measure the share of the population with access to specific proportions of available jobs, enabling a detailed analysis of labor market accessibility within the framework. By incorporating both cycling and e-bikes and emphasizing job access in diverse urban contexts, this study contributes to a more inclusive and context-sensitive understanding of the 15-minute city concept.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Study area

This study focuses on four Brazilian cities, Natal, Goiânia, Salvador, and São Paulo, that differ significantly in population size, geographic characteristics, and urban morphology. Natal, located on the northeastern coast, has approximately 750,000 inhabitants. Goiânia, situated in the Central-West region, has a population of

around 1.4 million. Salvador, also in the Northeast, is home to over 2.4 million residents, while São Paulo, Brazil's largest city, has more than 11 million inhabitants. The selection of these cities captures a range of urban scales and spatial structures, offering a representative basis for analyzing job accessibility through active transportation modes within the 15-minute city framework.

2.2. Data

The data used in this study came from multiple sources. Street network data were extracted from OpenStreetMap using the OSMnx Python package (Boeing, 2017), while cycling infrastructure data were obtained from CicloMapa. Topographic data were obtained using the OpenTopography plugin in QGIS (Win, 2024), and slope values were calculated using OSMnx's terrain analysis. Formal employment and population data were accessed through the aopdata package in R (Pereira et al., 2022).

2.3. Accessibility methodology

Accessibility refers to the extent to which land-use and transport systems allow individuals or groups to reach destinations using one or more transport modes (Geurs & van Wee, 2004). It is commonly measured by travel impedance and the number of reachable opportunities, depending on transport mode, research focus, and data availability. Among various approaches, we use the cumulative opportunity measure, which counts the number of opportunities within a set travel time, distance, or cost using a binary impedance function (Barboza et al., 2021; Geurs & van Wee, 2004). This widely used indicator is simple to calculate, data-efficient, and easy to communicate (Pereira & Herszenhut, 2023). It is defined in Equation 1:

$$A_i = \sum O_j \cdot f_t(c_{ij}), \quad f_t(c_{ij}) = \begin{cases} 1 \; if \; c_{ij} \leq t \\ 0 \; if \; c_{ij} > t \end{cases} \tag{1}$$

In which A_i is the accessibility at point i; O_j represents the number of opportunities (like jobs, businesses, services, etc.) at location j; c_{ij} is the travel cost between i e j (time, distance, cost, or a combination of these elements); and the function $f_t(c_{ij})$ returns 1.0 if c_{ij} is less than or equal to a defined cost (t) and zero if it exceeds this threshold.

We opted not to use gravity-based accessibility measures as their performance is expected to be very similar (Palacios & El-geneidy, 2022). We estimated cumulative opportunities for various travel time thresholds, 15, 20, 25 and 30 minutes, to account for the X-minute city framework.

2.3.1 Travel time estimation

Cycling travel times were estimated using a linear mixed-effects speed model, originally developed for São Paulo by Louro et al. (2025, unpublished) and extended to other cities using the same methodology. Based on GPS data from the Tembici bike-sharing system, the model's fixed effects account for factors such as road characteristics (e.g., slope, length), time of day, and cycling infrastructure. For consistency, we applied standardized parameters representing a baseline scenario: male rider, weekday (Wednesday), and morning peak. As a result, travel time and accessibility estimates reflect this specific context. It is important to note that the model is based on bike-sharing users, who may differ from the general cycling population in demographics, experience, and travel behavior.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The proportion of the population in the four cities that can access varying shares of employment opportunities by foot, bicycle, and e-bike across different travel time thresholds is illustrated in Figure 1. In all cases, walking provided only limited access to employment opportunities, particularly within the 15-minute and 20-minute thresholds. For instance, in Natal, only 3.3% of the population could access at least 5% of available jobs within 15 minutes, and even at 30 minutes, access remained restricted, with 28.3% reaching 5% of jobs, 12.4% reaching 10%, and just 5.5% reaching 15%. Similarly, in Goiânia, 14.2% of the population could access 5% of jobs within 30 minutes, but access to higher percentages (e.g., 10%) was minimal, at 2.1%. In Salvador and São Paulo, the situation was even more constrained, as only a small fraction of the population could reach even 5% of jobs within a 30-minute walk, with access to higher job percentages remaining negligible. These results highlight a critical limitation of the 15-minute city framework when applied strictly to walking: it risks

excluding populations from essential economic opportunities, particularly in larger or more dispersed cities like Salvador and São Paulo. Walking alone is insufficient for accessing a significant share of jobs, underscoring the importance of integrating multiple transportation modes beyond walking to ensure equitable access to labor markets.

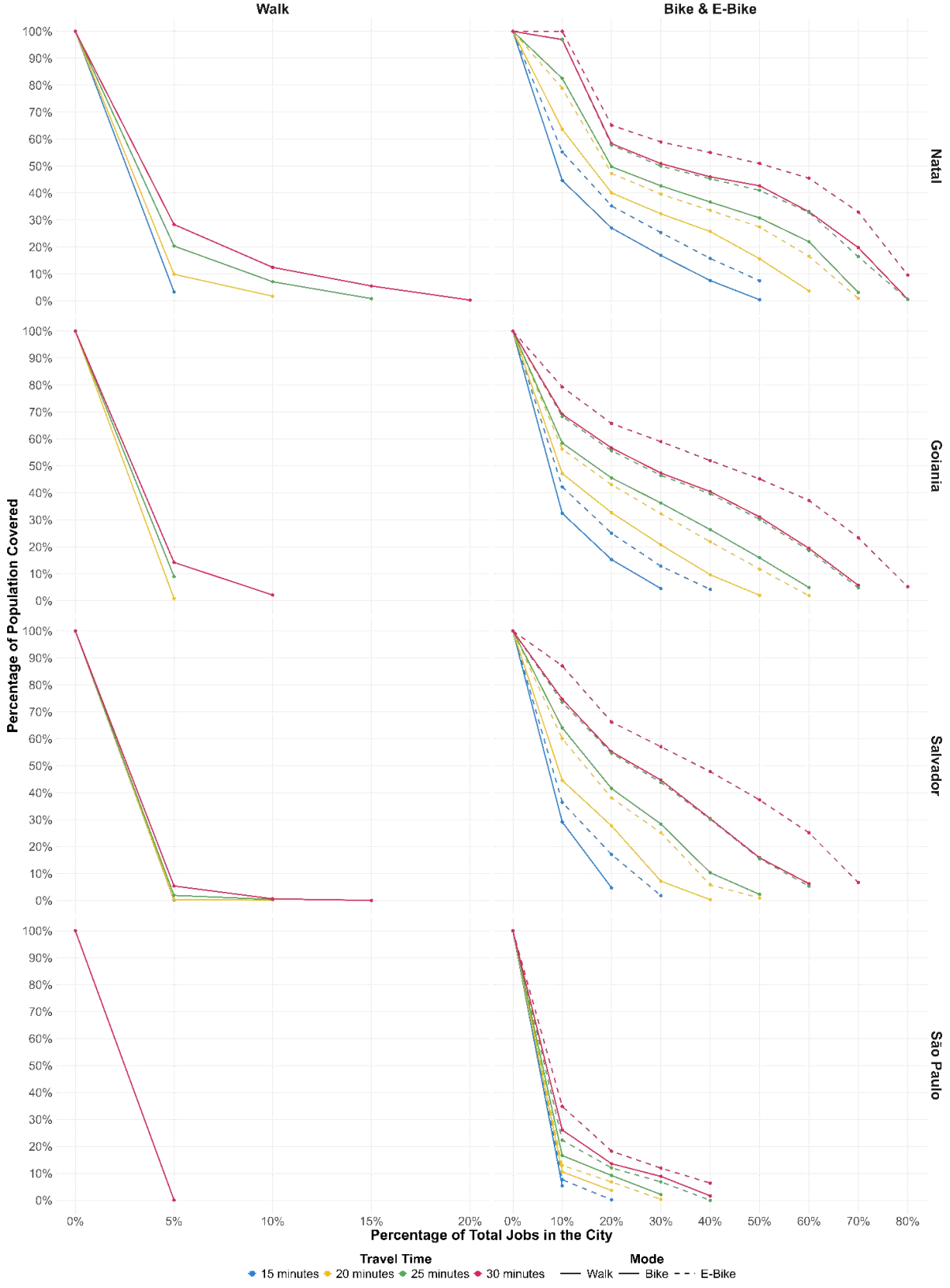


Figure 1: Percentage of population with access to jobs by foot, regular and electric bicycles in Natal, Salvador, Goiania and São Paulo across different travel time thresholds

Compared to walking, cycling significantly improves job accessibility in all four cities, particularly in Natal

and Goiânia. For instance, at 15 minutes, nearly 45% of Natal's population could access at least 10% of jobs by bicycle, with 27% reaching 20% and 17% reaching 30%. By 30 minutes, 97% of the population could access 10% of jobs, 58% could reach 20%, and over 50% could access 30%. Similarly, in Goiânia, 32% of the population could access 10% of jobs within 15 minutes, though access to higher proportions (e.g., 30%) was lower than in Natal. By 30 minutes, 69% of the population could access 10% of jobs, 57% could reach 20%, and 47% could access 30%. In Salvador, cycling also provided substantial improvements over walking: at 15 minutes, 29% of the population could access 10% of jobs, and by 30 minutes, 75% could access 10%, 55% could reach 20%, and 45% could access 30%. However, in São Paulo, cycling showed limited impact compared to the other cities. At 15 minutes, only 5.4% of the population could access 10% of jobs, and even at 30 minutes, access remained low, with just 26% reaching 10%, 14% reaching 20%, and fewer than 9% accessing 30%. These findings demonstrate the potential of cycling to bridge gaps in accessibility and support the economic viability of the 15-minute city concept, particularly in smaller and more compact urban areas. However, the disparities across cities highlight the challenges of implementing the framework in larger, denser, or more sprawled cities like São Paulo.

The accessibility results with e-bikes highlight their transformative potential to improve job access across all four cities, particularly at longer travel time thresholds (e.g., 25 and 30 minutes). In Natal, e-bikes demonstrated significant advantages over conventional bikes: at the 15-minute mark, 55% of the population could access at least 10% of jobs by e-bike, compared to 45% with regular bikes, a 10% improvement. By 30 minutes, e-bikes enabled 46% of the population to access 60% of jobs, compared to only 33% with conventional bikes. Goiânia also benefited substantially from e-bikes, especially at longer travel thresholds. At 15 minutes, 42% of the population could access 10% of jobs via e-bike, compared to 32% with bikes. By 30 minutes, 37% of the population could access 60% of jobs with e-bikes, while only 19% could do so with bikes—an 18% difference. In Salvador, e-bikes similarly outperformed conventional bikes: at 15 minutes, 36% of the population could access 10% of jobs with e-bikes, compared to 29% with bikes. By 30 minutes, only 6% of the population could access 60% of jobs with bikes, while 25% could reach the same share with e-bikes. Even in São Paulo, where accessibility remained low for both modes, e-bikes showed a notable advantage. At 15 minutes, 7.7% of the population could access 10% of jobs via e-bike, compared to just 5% with bikes. By 30 minutes, e-bikes allowed 35% of the population to access 10% of jobs and 12% to access 30%, compared to only 26% and fewer than 9%, respectively, with conventional bikes. These findings underscore the transformative potential of e-bikes in addressing the limitations of conventional cycling, such as physical effort and distance constraints (Gehrke et al., 2020; Pritchard et al., 2019). By enabling workers to reach a broader range of job opportunities, e-bikes can enhance labor market efficiency and reduce mismatches between skills and employment.

The results reveal significant variations in job accessibility across the four cities, driven by differences in urban size, density, and spatial structure. Smaller cities like Natal benefit greatly from active transportation modes such as cycling and e-bikes, thanks to their compactness and shorter distances between residential areas and job centers. In contrast, larger cities like São Paulo struggle to achieve meaningful accessibility, even with e-bikes, highlighting the need for a multimodal approach. For sprawled cities, integrating public transport into the 15-minute city framework is essential, as active transportation alone cannot overcome spatial challenges. E-bikes, however, can bridge gaps by extending the reach of active transportation, making the concept more feasible in less compact areas.

Poor accessibility limits individual livelihoods and leads to inefficient labor markets, reduced productivity, and greater social inequality. In smaller cities, active transportation aligns well with the 15-minute city goals, fostering equitable access to jobs and services. In larger cities, spatial mismatches make reliance on walking or cycling insufficient, risking exclusion of underserved populations. E-bikes offer a transformative solution, complementing public transit and enabling broader access to jobs and services within desired timeframes.

5. CONCLUSIONS

This study analyzes job accessibility within the 15-minute city framework in four Brazilian cities: Natal, Goiânia, Salvador, and São Paulo, using walking, conventional bicycles, and e-bikes. Accessibility varied significantly due to differences in urban size, density, and spatial structure. Walking offered limited access to employment, particularly within 15- and 20-minute thresholds, exposing a key limitation of relying solely on

pedestrian mobility. These results highlight the need for multimodal strategies to ensure equitable access to jobs.

Cycling improved accessibility in smaller and medium-sized cities such as Natal and Goiânia. At the 30-minute mark, nearly 97 percent of Natal's population could access 10 percent of jobs by bicycle, compared to only 28.3 percent by walking. In contrast, larger cities like São Paulo saw smaller gains, reflecting the difficulty of applying the 15-minute city model in dispersed urban areas.

E-bikes further enhanced accessibility, especially over longer distances. In Natal, 55 percent of the population could access 10 percent of jobs within 15 minutes using e-bikes, compared to 45 percent with standard bicycles. In São Paulo, e-bikes enabled 35 percent of the population to reach this threshold within 30 minutes, versus 26 percent with conventional bikes. These findings demonstrate the potential of e-bikes to extend the reach of active transportation in low-density settings.

Limited accessibility constrains economic opportunity, reduces productivity, and reinforces inequality. In smaller cities, active transport supports the goals of the 15-minute city by improving access to employment and services. In larger cities, however, walking and cycling alone are insufficient. E-bikes and improved integration with public transport are essential to expanding access and promoting inclusive urban mobility.

This study adds nuance to the 15-minute city concept by emphasizing the role of job accessibility and diverse transport modes. Incorporating bicycles, e-bikes, and multimodal systems can enhance both efficiency and equity. Future research should explore emerging mobility technologies and assess their long-term impacts on urban sustainability and inclusion.

Acknowledgements
This study was financed by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. We also thank Tembici for providing the GPS data.

REFERENCES

Barboza, M. H. C., Carneiro, M. S., Falavigna, C., Luz, G., & Orrico, R. (2021) Balancing time: Using a new accessibility measure in Rio de Janeiro. Journal of Transport Geography, 90, 102924.

Batista Duarte, L., da Mota Silveira Neto, R., & Firmino Costa da Silva, D. (2023). The relevance of job accessibility to labour market outcomes: Evidence for the São Paulo metropolitan region. Urban Studies, 60(16), 3233–3251.

Bertaud, A. (2018) Order without design: How markets shape cities. MIT Press.

Boeing, G. (2017) OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. Computers, Environment and Urban Systems, 65, 126–139.

Carvalho, T., Farber ,Steven, Manaugh ,Kevin, & and El-Geneidy, A. (2025) Assessing the readiness for 15-minute cities: A literature review on performance metrics and implementation challenges worldwide. Transport Reviews, 0(0), 1–27.

Gehrke, S. R., Akhavan, A., Furth, P. G., Wang, Q., & Reardon, T. G. (2020) A cycling-focused accessibility tool to support regional bike network connectivity. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 85, 102388.

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. Journal of Transport Geography, 12(2), 127–140.

Knap, E., Ulak, M. B., Geurs, K. T., Mulders, A., & van der Drift, S. (2023) A composite X-minute city cycling accessibility metric and its role in assessing spatial and socioeconomic inequalities – A case study in Utrecht, the Netherlands. Journal of Urban Mobility, 3, 100043.

Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C., & Pratlong, F. (2021) Introducing the "15-Minute City": Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities. Smart Cities, 4(1), Article 1.

Palacios, M. S., & El-geneidy, A. (2022) Cumulative versus Gravity-based Accessibility Measures: Which One to Use? Findings.

Papa, E., Silva, C., Brömmelstroet, M. te, & Hull, A. (2016) Accessibility instruments for planning practice: A review of European experiences. Journal of Transport and Land Use, 9(3), Article 3.

Pereira, R. H. M. (2019) Future accessibility impacts of transport policy scenarios: Equity and sensitivity to travel time thresholds for Bus Rapid Transit expansion in Rio de Janeiro. Journal of Transport Geography, 74, 321–332.

Pereira, R. H. M., Braga, C. K. V., Herszenhut, D., Saraiva, M., & Tomasiello, D. B. (2022) TD 2800—Estimativas de acessibilidade a empregos e serviços públicos via transporte ativo, público e privado nas vinte maiores cidades do Brasil no período 2017-2019. Texto para Discussão, 1–36.

Pereira, R. H. M., & Herszenhut, D. (2023) Introduction to urban accessibility: A practical guide with R.

Pritchard, J. P., Tomasiello, D. B., Giannotti, M., & Geurs, K. (2019). Potential impacts of bike-and-ride on job accessibility and spatial equity in São Paulo, Brazil. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 121, 386–400.

Thiago Vinicius Louro (thiagolouro@usp.br)
Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Transportes - Av. Trabalhador Sãocarlense, 400 - São Carlos – SP, Brasil

MOBILIDADE AÉREA URBANA E GÊMEOS ESPACIAIS: BRASÍLIA COMO ESTRUTURA PILOTO PARA IMPLANTAÇÃO DE REDES UAM-UTM

Emilia Stenzel[1], Li Weigang[2], Juliano Maia[2], Lucas Ramson[2]
[1]Universidade de Brasília - Faculdade de Ciências da Informação, [2]Universidade de Brasília - TransLab - Departamento de Ciência da Computação

RESUMO
O artigo analisa o potencial de Brasília como laboratório para a implantação de uma rede de Mobilidade Aérea Urbana (UAM), estruturada por eVTOLs, UAVs e sistemas de gestão do espaço aéreo de baixa altitude (UTM). A pesquisa adota abordagem exploratória e qualitativa, com base em revisão crítica de literatura e análise morfológica aplicada ao território do Distrito Federal. A hipótese central sustenta que a malha viária e o zoneamento funcional da capital federal oferecem suporte técnico-operacional para a modelagem de corredores aéreos integrados. São mobilizados os conceitos de nova materialidade (Picon, 2015) e de escalas urbanas (West, 2017), articulados ao desenvolvimento do conceito de gêmeos espaciais, como extensão normativa da infraestrutura terrestre ao domínio aéreo. O Eixão é analisado como eixo-piloto de simulação, e a integração com zonas periféricas e municípios da RIDE é discutida em perspectiva concêntrica e escalonada. Os resultados apontam a UAM como vetor de reconfiguração territorial, com potencial para ampliar a conectividade regional, reduzir assimetrias espaciais e viabilizar soluções sustentáveis, interoperáveis e de baixo impacto para os desafios contemporâneos da mobilidade urbana.

1. INTRODUÇÃO

A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) desponta como resposta estratégica às limitações dos sistemas viários convencionais. Baseada na operação de eVTOLs, UAVs e sistemas inteligentes de gestão do espaço aéreo (UTM), sua implementação exige reconfigurações espaciais, regulatórias e operacionais que ultrapassam os marcos da mobilidade terrestre.

Brasília, com sua clara morfologia, seu zoneamento funcional e sua baixa densidade vertical, constitui um laboratório ideal para testar soluções UAM-UTM. Seu traçado modernista, fundamentado em princípios de racionalidade e separação de fluxos, permite a adaptação tridimensional da infraestrutura viária e a articulação com plataformas digitais interoperáveis.

Este artigo examina como atributos estruturais da capital federal podem ser mobilizados para estruturar uma rede de corredores aéreos e vertiportos. A análise, ancorada em revisão crítica de literatura e leitura morfológica aplicada, propõe o conceito de gêmeo espacial como fundamento para a organização do espaço aéreo urbano, com ênfase no Eixão como eixo-piloto. Em um momento de inflexão nos paradigmas de mobilidade e planejamento territorial, a experiência de Brasília oferece um modelo escalável de conectividade aérea urbana, com potencial para reorganizar fluxos entre centro e periferia, cidade e território.

2. METODOLOGIA

A pesquisa adota uma abordagem exploratória e qualitativa, orientada por revisão crítica de literatura e análise morfológica aplicada. Situado na interface entre os estudos urbanos e os debates contemporâneos sobre mobilidade aérea, o estudo parte da hipótese de que a estrutura viária e o zoneamento funcional de Brasília oferecem condições espaciais únicas para a implantação de corredores UAM.

A fundamentação teórica ancora-se na noção de “nova materialidade” (Picon, 2015), que descreve a transformação das formas urbanas sob a influência de sistemas digitais, e nas leis de escala urbana formuladas por West (2017), que associam variações morfológicas à eficiência sistêmica. A proposta se ancora na construção de um modelo conceitual informado por diretrizes internacionais (U-Space, ICA 100-37) e aplicadas ao contexto urbano e patrimonial de Brasília. Assim sendo, não lança suas bases em simulações técnicas nem projeções quantitativas, ainda em fase de desenvolvimento no âmbito do TransLab/ UnB, cujos trabalhos recentes incorporam inteligência artificial em ambientes simulados de tráfego aéreo urbano (Garcia et al., 2023).

O método inclui (1) análise dos atributos morfológicos da malha urbana do Plano Piloto, (2) articulação com dados secundários do Plano Diretor de Transporte Urbano e do PMUS-DF, (3) leitura crítica de estudos internacionais sobre UAM e integração UTM, e (4) desenvolvimento do conceito de “gêmeos espaciais”, adaptado da literatura sobre digital twins, mas ancorado na matriz física da cidade como dispositivo estruturante do espaço aéreo.

3. MOBILIDADE E A RECONFIGURAÇÃO TERRITORIAL

A mobilidade aérea urbana (UAM) reconfigura os fundamentos territoriais do planejamento urbano ao introduzir uma lógica de deslocamento tridimensional, digitalizada e menos dependente da infraestrutura física. Ao reorganizar fluxos ponto a ponto com base em redes modulares e interoperáveis, esse novo modal altera a forma como as cidades conectam funções, populações e territórios.

No Brasil, marcado por desigualdades espaciais estruturais, a UAM oferece uma alternativa à reprodução dos modelos viários que, ao longo do século XX, ampliaram os custos sociais e ambientais da mobilidade. Ao evitar grandes obras e desadensamentos compulsórios, o modal aéreo reduz barreiras físicas e operacionais à circulação, conectando zonas centrais e periféricas com mínima interferência territorial. Estudos comparativos indicam que a UAM apresenta vantagens logísticas superiores mesmo frente a soluções terrestres eletrificadas e autônomas, especialmente em contextos urbanos dispersos (Garrow, German & Leonard, 2021).

A condição tridimensional da UAM articula-se às transformações contemporâneas da cidade digital, caracterizadas pela superposição de camadas físicas e informacionais. Conforme argumenta Picon (2013), a emergência de uma "nova materialidade", constituída por infraestruturas híbridas e dispositivos computacionais, impõe uma reformulação do espaço urbano, exigindo modos de planejamento compatíveis com redes distribuídas, dinâmicas e auto-organizáveis.

Nesse contexto, as redes UAM reforçam a desmaterialização progressiva da mobilidade como fenômeno puramente físico. Mais do que deslocar corpos, trata-se de articular territórios por meio de fluxos, acessos e sincronias. A operacionalização dessas redes se ancora em plataformas de gerenciamento inteligente (U-Space), que integram variáveis como demanda em tempo real, topografia, meteorologia e restrições urbanas. A UAM também dialoga com a teoria das escalas urbanas (West, 2017), que associa a expansão das redes territoriais ao aumento da produtividade e da diversidade econômica, sem a necessidade de aglomeração física. Ao permitir que zonas periurbanas e rurais se integrem funcionalmente a núcleos urbanos, o modal aéreo inverte a lógica centrífuga do crescimento urbano e estimula novas centralidades. Essa abordagem espacial, análoga ao pensamento sobre o "artista urbano" de Hultin (2020), enfatiza a reinvenção da cidade por meio da infraestrutura distribuída e da arte técnica do planejamento.

Casos como o de Shenzhen ilustram a aplicabilidade dessas redes em contextos densos e heterogêneos, com ganhos expressivos de tempo, eficiência logística e inclusão de territórios isolados. Em países com grandes distâncias intraurbanas e deficiências crônicas de infraestrutura, como o Brasil, esses modelos têm potencial de ampliar a coesão territorial e reduzir assimetrias de acesso a mercados, serviços e oportunidades (Cohen, Shaheen & Farrar, 2021).

4. BRASÍLIA COMO LABORATÓRIO DE REDES UAM: MORFOLOGIA, CONECTIVIDADE E ESCALA

4.1 Gêmeo espacial e continuidade viária

O conceito de gêmeo espacial, desenvolvido no âmbito do TransLab/UnB, traduz uma estratégia inovadora de aproveitamento da infraestrutura urbana existente como matriz reguladora para redes UAM. Diferentemente do digital twin tradicional, que replica o ambiente físico em modelos digitais para simulação e monitoramento, o gêmeo espacial opera como dispositivo normativo: assume a malha viária e, em especial, a lógica hierárquica do Eixão como vetor de organização tridimensional do tráfego aéreo urbano (Brunelli, Ditta & Postorino, 2022).

A linearidade, a clareza funcional e a segmentação da hierarquia viária de Brasília configuram um suporte excepcional para a estruturação vertical do espaço aéreo urbano. O Eixão, em particular, permite segmentação por faixas altimétricas, com baixa interferência de obstáculos e compatibilidade com padrões operacionais definidos pelo ICA 100-37. O gêmeo espacial potencializa a continuidade física e funcional entre modais, articulando o UTM ao ATM, e habilitando o espaço aéreo como novo domínio de infraestrutura pública interoperável.

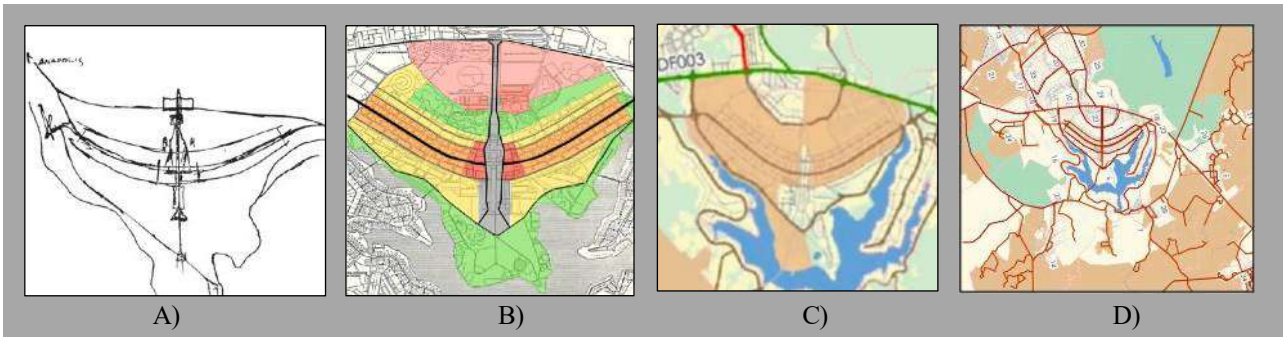


Figura 1: Plano Piloto: A) Matriz Urbana; B) Zoneamento; C) Restrição de Carga; D) Principais Vias. Fontes: A) Relatório do Plano Piloto; B) TransLab-UnB ; C) e D) PDTU/GDF (2024)

4.2 Eixão como plataforma tridimensional de mobilidade

A escolha do Eixão como eixo piloto de simulação não decorre apenas de sua centralidade simbólica e territorial. Trata-se de uma infraestrutura tecnicamente preparada para suportar experimentações UAM. As faixas verdes centrais oferecem área de segurança lateral, com largura suficiente para faixas paralelas bidirecionais e zonas de escape. A baixa densidade construtiva adjacente reduz riscos operacionais e facilita a instalação modular de vertiports e vertistops.

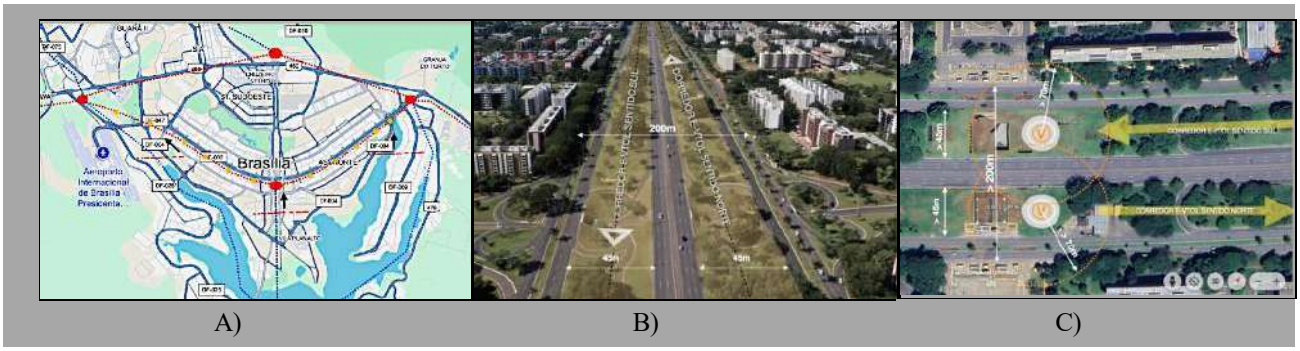


Figura 2: Projeto Piloto de Corredor de UAM no Eixão: A) Vertiportos, B) Corredor, C) Vertistops
Fonte: TransLab, UNB.

Do ponto de vista regulatório, a ocupação do espaço aéreo sobre o Eixão respeita os critérios de afastamento definidos pela ANAC e pelo DECEA, evitando zonas de exclusão críticas e interferências com áreas sensíveis. O corredor aéreo, ao sobrepor-se a uma infraestrutura existente, evita conflitos fundiários, preserva o patrimônio edificado e reforça o uso público do espaço urbano, ampliando sua dimensão funcional sem pressionar sua base física. Simulações preliminares do projeto ISUAM, conduzidas pelo TransLab/UnB, reforçam a viabilidade técnica de operações UAM seguras com uso de aprendizado por reforço em corredores tridimensionais sobre o Eixão (Garcia et al., 2023).

4.3 Expansão concêntrica e integração da RIDE

A proposta da rede UAM em anéis concêntricos, organizada pelo TransLab/UnB, responde a uma lógica escalonada de conectividade. O primeiro anel, com alta frequência e baixa distância, ativa conexões entre o Plano Piloto e as regiões administrativas adjacentes. O segundo, com raio ampliado, abrange áreas com centralidades secundárias e maior densidade populacional. O terceiro, de média frequência, alcança municípios da RIDE, com perfil rural ou periurbano.

Essa estrutura em camadas integra zonas de demanda com padrões distintos de urbanização, permitindo calibragem da operação conforme volume, perfil do serviço e grau de acessibilidade exigido. A inserção da RIDE como fronteira de expansão aérea reforça a coesão funcional do território, redistribuindo centralidades e mitigando desequilíbrios históricos entre núcleo e periferia. O UAM passa a operar não apenas como sistema de transporte, mas como infraestrutura de integração regional.

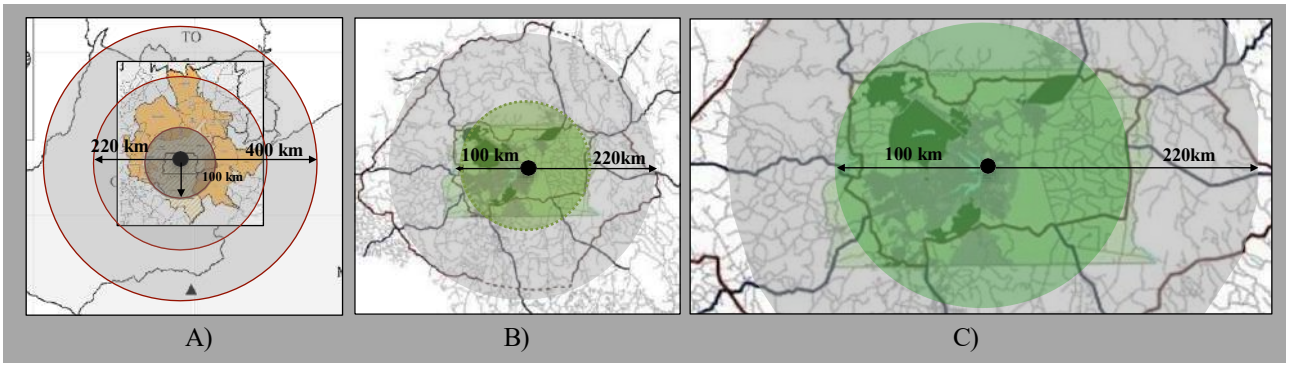


Figura 3: A) Autonomia de eVTOLs e UAVs já em teste; B) e C) Anéis de Vertiportos Projetados
Fonte: TransLab - UNB.

4.4 Zoneamento e compatibilidade funcional

O zoneamento urbano de Brasília oferece condições técnicas e operacionais propícias à instalação de vertiportos com mínima interferência sobre os usos estabelecidos. Áreas industriais e logísticas concentram-se em zonas periféricas compatíveis com transporte de carga e UAVs autônomos. Zonas comerciais e administrativas comportam vertiportos de passageiros, com alta rotatividade e compatibilidade com fluxos existentes. Já áreas verdes centrais e eixos estruturantes possibilitam corredores aéreos contínuos com baixo custo de implantação.

Essa compatibilidade decorre da gramática urbanística original de Brasília, baseada na separação funcional e no planejamento hierárquico dos fluxos. O UAM, ao inserir-se nessa lógica, evita conflitos e reforça a coerência do espaço urbano. A infraestrutura aérea é tratada como camada adicional de circulação, adaptativa e reversível, apta a responder às exigências de preservação e flexibilidade que caracterizam o espaço urbano contemporâneo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Brasília reúne atributos morfológicos e institucionais que a qualificam como território privilegiado para o desenvolvimento de um projeto-piloto de Mobilidade Aérea Urbana (UAM). A combinação entre a amplitude espacial, a hierarquia funcional do sistema viário e a centralidade articuladora do Plano Piloto sustenta sua seleção como laboratório para implantação de uma rede UAM-UTM. Ao explorar as potencialidades do território existente — sem os impactos físicos próprios das soluções viárias convencionais —, essa estratégia oferece uma resposta compatível com os imperativos contemporâneos de mobilidade, sustentabilidade e reorganização territorial.

A proposta de corredores aéreos apoiados na estrutura urbana existente, articulada a uma malha de vertiportos e conectada a um sistema federativo de gestão do tráfego de baixa altitude, representa um novo regime de conectividade. Tal regime amplia o raio de influência da capital, reduz desigualdades territoriais e contribui para aliviar a sobrecarga nos sistemas viários legados. Ao preservar a integridade física e simbólica do patrimônio moderno de Brasília, a UAM afirma-se também como solução de baixo impacto e alta compatibilidade com os princípios da preservação.

Mais do que uma inovação modal, o modelo aqui examinado reposiciona o espaço aéreo como vetor funcional de integração urbana e regional. A integração da UAM ao planejamento territorial do Distrito Federal é, nesse sentido, não apenas uma resposta às disfunções da mobilidade atual, mas um passo decisivo na construção de novas articulações entre centro e periferia, cidade e território, espaço físico e infraestrutura digital. Essa inflexão recoloca Brasília no centro da experimentação urbanística, como cidade-laboratório para uma mobilidade mais distribuída, interoperável e compatível com os desafios da Era Digital.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brunelli, M., Ditta, C. C., & Postorino, M. N. (2022). A *Framework to Develop Urban Aerial Networks by Using a Digital Twin Approach*. Drones, 6(12), 387. https://doi.org/10.3390/drones6120387

Cohen, A.P, Shaheen, S. A. e Farrar, E. M. *Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges,* in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 9, pp. 6074-6087, Sept. 2021, doi: 10.1109/TITS.2021.3082767.

Garcia, C.., Li Weigang, N. Hirata, e C.Neumann. *"Isuam: Intelligent and safe UAM with deep reinforcement learning."* In 2023 IEEE 29th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), pp. 378-383. IEEE, 2023.

Garrow, L., B. J. German, C.E. Leonard. *Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research, i*n:Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Volume 132, November 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/ j.trc.2021.103377. (Acessado em 10/07/2025)

Hultin, J. *Novos Desafios para a Cidade. Considerações para o „artista" urbano*. In A Reinvenção das Cidades. Política Decocrática. Caminhos da Inovação. (pp. 205-223). teMA Editorial.

Jatobá, S.. *Crescimento Urbano na Metrópole de Brasília.* Brasília: Seminário Regional de Desenvolvimento.2011.

Picon, A. *Smart cities: A spatialized intelligence.* 1a. Edição. Editora Wiley. 2015

SESAR Joint Undertaking (2023). *U-Space* Concept of Operations (v3.10). Disponível em: https://corus-project.eu/wp-content/uploads/2022/11/CORUS-XUAM-D4.1-delivered_3.10.pdf (Acessado em 06/07/2025)

Stenzel, E. (2020). Brasília. Estética e Cidade. in A Reinvenção das Cidades. Política Democrática. Brasília aos 60 anos (pp. 126-140). teMA Editorial, 2020.

UFSC-LABTRANS-GDF-FEPESE (2024) Atualização e Elaboração do Plano Diretor de Transportes Urbanos (PDTU) e Plano de Mobilidade Urbana Sustentável. Produto 2 – Relatório de Levantamento de Informacões. Disponível em: https://sistemas.df.gov.br/PDTU/Publicacoes. (Acessado em 04/07/2025)

UFSC-LABTRANS-GDF-FEPESE (2025) Plano Diretor de Transportes Urbanos e Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PDTU/PMUS). Produto 3.2 - Diagnóstico da Mobilidade Urbana (Volume II). Disponível em: https:// sistemas.df.gov.br/PDTU/Publicacoes (Acessado em 04/07/2025).

West, G. *Scale: The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability, and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economies, and Companies,* New York: Penguin Press, 2017.

Emilia Stenzel (e.stenzel@me.com)
Universidade de Brasília, FFCI- PPGINF, BCE , Campus Darcy Ribeiro, 70.919-970, Brasília/DF, Brasil
Li Weigang (weigang@unb.br)
Universidade de Brasília, TransLab-CIC, Caixa Postal 4466, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília/DF, Brasil

MOBILIDADE E ACESSIBILIDADE UNIVERSAL NAS CAPITAIS BRASILEIRAS: UMA ANÁLISE DOS DADOS DO CENSO DEMOGRÁFICO 2022

Lucas Eduardo Dornelles[1], **Marina Frederich de Oliveira**[2]
[1]Universidade Federal de Santa Maria, [2]Grupo Ecorodovias

RESUMO
Além de promover o retrato da população brasileira, o Censo Demográfico também cumpre um papel essencial na leitura do espaço urbano, por meio da Pesquisa Urbanística do Entorno dos Domicílios. Ao reunir dados sobre temas como acessibilidade universal, circulação, meio ambiente e infraestrutura, esta pesquisa permite compor um retrato urbanístico das ruas, avenidas, becos e vielas que integram o tecido urbano brasileiro. Dentro deste contexto, este estudo busca identificar padrões e desigualdades na infraestrutura urbana das capitais brasileiras, especialmente no que diz respeito à mobilidade e acessibilidade universal. Os resultados revelam avanços em indicadores como presença de calçadas, mas apontam deficiências significativas na disponibilidade de rampas para cadeirantes e na obstrução de calçadas por obstáculos físicos. O estudo conclui que a existência de calçadas não garante, por si só, mobilidade urbana inclusiva, reforçando a necessidade de políticas públicas mais integradas e fiscalizações contínuas para garantir equidade no espaço urbano.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Censo Demográfico, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), constitui a principal fonte de informações sobre a população brasileira, abrangendo dados fundamentais como idade, sexo, cor ou raça, escolaridade, e outros aspectos socioeconômicos e demográficos. A última operação censitária, realizada pelo instituto em 2022, revelou o panorama de um Brasil cada vez mais envelhecido, onde que o total de pessoas com 65 anos de idade ou mais representa mais de 10% da população (IBGE, 2023a). Em adição, os dados censitários também mostraram que o Brasil tem 14,4% milhões de pessoas com deficiência, sendo que em 16,0% dos domicílios recenseados havia pelo menos um morador com deficiência (IBGE, 2025).

Além de promover o retrato da população brasileira, o Censo também cumpre um papel essencial na leitura do espaço urbano, por meio da Pesquisa Urbanística do Entorno dos Domicílios. Ao reunir dados sobre temas como acessibilidade, circulação, meio ambiente e infraestrutura, a Pesquisa do Entorno permite compor um retrato urbanístico abrangente das ruas, avenidas, becos e vielas que integram o tecido urbano brasileiro, evidenciando desigualdades territoriais e carências estruturais. Esses dados são especialmente relevantes em um cenário de mudanças demográficas intensas, marcado pelo envelhecimento acelerado da população.

A mobilidade e a acessibilidade urbanas ocupam posição central nos debates contemporâneos sobre planejamento e desenvolvimento das cidades. A qualidade de vida nas cidades está diretamente condicionada à forma como os espaços urbanos são planejados, organizados e mantidos. Um ambiente urbano inclusivo, com calçadas regulares, rampas adequadas e ausência de obstáculos, contribui para a equidade no uso da cidade e para a valorização do espaço público como bem coletivo (Jamaico, 2021; Gaglioni et al., 2022).

Diante desse contexto, o presente estudo realiza uma análise dos resultados da Pesquisa Urbanística do Entorno dos Domicílios nas capitais dos estados brasileiros, com o objetivo de identificar tendências, padrões e lacunas na infraestrutura urbana que impactam a vida da população. O estudo busca revelar como as capitais brasileiras têm se estruturado (ou falhado em se estruturar) para garantir o direito à mobilidade, à acessibilidade e à permanência segura da população nos espaços públicos.

2. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO DE ESTUDO

Antes da realização do Censo, o IBGE realiza a Pesquisa Urbanística do Entorno dos Domicílios, com o intuito de fornecer um panorama da infraestrutura urbana do país, avaliando temas como acessibilidade universal, circulação de veículos, equipamentos públicos e meio ambiente. Para se compreender a forma de realização da pesquisa, é necessário compreender os conceitos de quadra e face, ilustrados na Figura 1, que também apresenta os quesitos do questionário da pesquisa que são levados em conta neste estudo.

Quadra é um trecho geralmente retangular bem definido de uma área urbana ou aglomerado rural, limitado por ruas e/ou estradas. Contudo, a quadra pode ser irregular e ser limitada por elementos como estradas de ferro, cursos d'água ou encostas. Em alguns locais, a quadra é chamada de quarteirão. Já a face é cada um dos lados

da quadra, contendo edificação ou não.

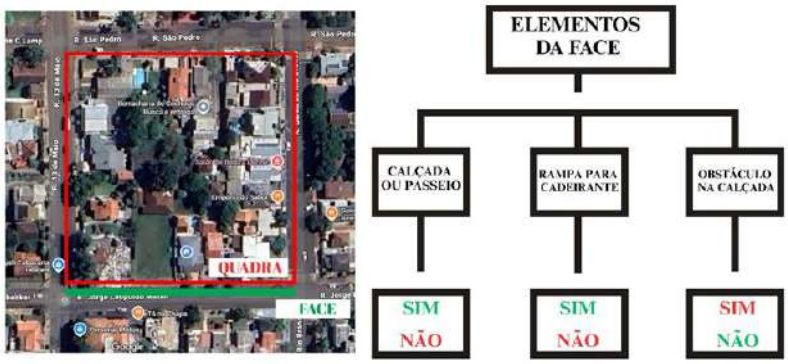


Figura 1: Quadra e Face e quesitos avaliados neste estudo.

Na pesquisa em questão, os agentes do IBGE fazem um levantamento a partir de observações, nas faces das quadras urbanas do país, de parâmetros relacionados às condições da via, arborização, existência de ciclovia, calçada, passeio, iluminação pública, dispositivos de drenagem e acessibilidade. Já neste estudo, são avaliados apenas os quesitos relacionados à acessibilidade universal, como existência de calçada/passeio, rampa para cadeirante e existência de obstáculos na calçada. Utiliza-se como universo de estudo as capitais das unidades federativas do Brasil, com o intuito de avaliar, mesmo que indiretamente, a implementação de políticas públicas em áreas como acessibilidade e mobilidade urbana.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados da Pesquisa Urbanística do Entorno dos Domicílios, realizada no âmbito do Censo Demográfico 2022, aponta avanços importantes na acessibilidade urbana em diversas localidades do país. Os resultados indicam que, em comparação com levantamentos anteriores, há uma melhoria gradativa na infraestrutura urbana voltada ao entorno dos domicílios, especialmente em relação à presença de calçadas, rampas de acessibilidade, iluminação pública e equipamentos urbanos de uso coletivo (IBGE, 2023a). Por outro lado, embora a análise da Pesquisa do Entorno confirme uma tendência positiva rumo a cidades mais acessíveis, ela também evidencia os desafios ainda existentes para a universalização do direito à mobilidade urbana segura, autônoma e equitativa.

3.1. Existência de calçada/passeio

A existência de calçada/passeio é muito importante para garantir a segurança e conforto dos pedestres, tornando os espaços urbanos mais inclusivos e universalmente acessíveis. Além disso, é essencial para promover a saúde e qualidade de vida da população, assim como permitir a evolução de modos de transporte mais sustentáveis (Almeida et al., 2024). A Tabela 1 apresenta o percentual de população residente de acordo com o quesito existência de calçada ou passeio para todas as capitais das unidades da federação do Brasil.

Tabela 1: Percentual de população residente de acordo com o quesito calçada/passeio.

Município	Calçada/passeio			Município	Calçada/passeio		
	Existe	Não existe	ND		Existe	Não existe	ND
São Paulo (SP)	89,91	9,84	0,25	Campo Grande (MS)	85,44	14,52	0,04
Rio de Janeiro (RJ)	81,29	17,76	0,95	Teresina (PI)	93,14	6,69	0,17
Brasília (DF)	92,86	6,88	0,26	João Pessoa (PB)	91,44	8,53	0,03
Fortaleza (CE)	88,73	11,17	0,1	Natal (RN)	86,88	13,06	0,06
Salvador (BA)	56,13	43,56	0,31	Cuiabá (MT)	86,06	13,01	0,93
Belo Horizonte (MG)	91,72	8,24	0,04	Aracaju (SE)	92,71	6,69	0,61
Manaus (AM)	81,89	18,00	0,12	Florianópolis (SC)	74,68	25,17	0,15
Curitiba (PR)	94,86	5,07	0,07	Porto Velho (RO)	76,17	23,22	0,61

Recife (PE)	71,75	28,08	0,17	Macapá (AP)	64,16	35,79	0,05
Goiânia (GO)	98,03	1,92	0,04	Boa Vista (RR)	61,65	38,30	0,05
Porto Alegre (RS)	81,63	18,08	0,28	Rio Branco (AC)	78,27	21,63	0,10
Belém (PA)	76,99	22,92	0,10	Vitória (ES)	75,33	24,64	0,03
São Luís (MA)	88,06	11,89	0,04	Palmas (TO)	88,04	11,79	0,17
Maceió (AL)	84,49	15,46	0,05	Brasil	84,05	15,67	0,28

A partir dos dados, é possível identificar que as cinco capitais com maior cobertura de calçada ou passeio são Goiânia (98,03%), Curitiba (94,86%), Teresina (93,14%), Brasília (92,86%) e Aracaju (92,71%). São capitais de estados de diferentes regiões do país, o que mostra que não há um domínio exclusivo de uma única região em termos de infraestrutura de passeios. Por outro lado, as cinco capitais com pior desempenho, em termos de inexistência de calçada ou passeio, foram Salvador (43,56%), Boa Vista (38,30%), Macapá (35,79%), Recife (28,08%) e Florianópolis (25,17%). A nível nacional, o percentual da população residente em vias com existência de calçada ou passeio aumentou de 66,4% em 2010 para 84,05% em 2022, o que comprova avanços em políticas públicas voltadas à mobilidade e acessibilidade. Mesmo assim, ainda são muitos os desafios para se avançar no quesito existência de calçada ou passeio.

3.2. Rampa para cadeirantes

As rampas para cadeirantes são essenciais para a acessibilidade urbana. A Lei da Acessibilidade (Lei 10.098, 19/12/2000), dispõe em seu artigo 3° que "o planejamento e a urbanização das vias públicas, dos parques e dos demais espaços de uso público deverão ser concebidos e executados de forma a torná-los acessíveis para todas as pessoas, inclusive para aquelas com deficiência ou mobilidade reduzida. A Tabela 2 apresenta o percentual de população residente de acordo com o quesito existência de rampa para cadeirantes para todas as capitais das unidades da federação do Brasil.

Tabela 2: Percentual de população residente para o quesito rampa para cadeirantes.

	Rampa para cadeirantes				Rampa para cadeirantes		
Município	**Existe**	**Não existe**	**ND**	**Município**	**Existe**	**Não existe**	**ND**
São Paulo (SP)	16,60	73,31	10,09	Campo Grande (MS)	55,65	29,79	14,56
Rio de Janeiro (RJ)	16,43	64,87	18,71	Teresina (PI)	11,89	81,25	6,86
Brasília (DF)	30,42	62,44	7,14	João Pessoa (PB)	12,50	78,94	8,56
Fortaleza (CE)	11,58	77,16	11,27	Natal (RN)	18,21	68,68	13,12
Salvador (BA)	6,89	49,24	43,87	Cuiabá (MT)	26,56	59,50	13,94
Belo Horizonte (MG)	28,20	63,52	8,28	Aracaju (SE)	28,61	64,1	7,29
Manaus (AM)	6,50	75,38	18,11	Florianópolis (SC)	19,96	54,71	25,32
Curitiba (PR)	40,47	54,39	5,14	Porto Velho (RO)	18,64	57,53	23,83
Recife (PE)	13,08	58,68	28,25	Macapá (AP)	15,15	49,01	35,84
Goiânia (GO)	35,22	62,82	1,97	Boa Vista (RR)	17,05	44,6	38,35
Porto Alegre (RS)	34,58	47,05	18,37	Rio Branco (AC)	14,71	63,56	21,73
Belém (PA)	10,31	66,68	23,01	Vitória (ES)	34,89	40,43	24,67
São Luís (MA)	8,80	79,26	11,94	Palmas (TO)	11,97	76,07	11,96
Maceió (AL)	16,85	67,64	15,51	Brasil	15,2	68,85	15,95

Apenas um em cada sete domicílios nas capitais tem acesso a rampa para cadeirantes. Esse número é muito baixo, considerando os princípios de acessibilidade previstos em lei, como Estatuto da Pessoa com Deficiência

e Lei de Acessibilidade. As capitais que se destacam neste tópico são Campo Grande (55,65%), Curitiba (40,47%), Goiânia (35,22%), Porto Alegre (34,58%) e Vitória (34,89%). Por outro lado, os destaques negativos ficaram para Salvador (6,89%), Manaus (6,50%), São Luís (8,80%), Belém (10,31%) e Fortaleza (11,58%).

Em praticamente todas as capitais o percentual de rampas é muito inferior ao de calçadas. É o caso de São Paulo, onde 89,91% têm calçadas, mas só 16,6% têm rampas e Rio de Janeiro, com 81,29% com calçadas e apenas 16,43% com rampas. Isso mostra que a simples existência de calçadas não garante a acessibilidade, de forma que a infraestrutura urbana ainda exclui sistematicamente pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida. Um dos melhores índices relativos para as capitais foi Curitiba, que apresentou 94,86% com calçadas e 40,47% com rampas.

3.3. Existência de obstáculos nas calçadas

A presença de obstáculos em calçadas representa uma barreira física direta à mobilidade autônoma, sobretudo para pessoas idosas, que compõem uma parcela crescente da população dos grandes centros urbanos. Riscos de queda, fraturas e isolamento social aumentam significativamente em áreas com calçadas irregulares, estreitas ou obstruídas. A Tabela 3 apresenta o percentual de população residente de acordo com o quesito existência de obstáculos nas calçadas para todas as capitais das unidades da federação do Brasil.

Tabela 3: Percentual de população residente para o quesito obstáculos nas calçadas.

	Obstáculos nas calçadas				Obstáculos nas calçadas		
Município	**Existe**	**Não existe**	**ND**	**Município**	**Existe**	**Não existe**	**ND**
São Paulo (SP)	66,16	23,75	10,09	Campo Grande (MS)	54,60	30,84	14,56
Rio de Janeiro (RJ)	53,44	27,85	18,71	Teresina (PI)	86,49	6,65	6,86
Brasília (DF)	71,92	20,94	7,14	João Pessoa (PB)	75,07	16,38	8,56
Fortaleza (CE)	73,85	14,89	11,27	Natal (RN)	71,75	15,14	13,12
Salvador (BA)	38,26	17,87	43,87	Cuiabá (MT)	69,54	16,51	13,94
Belo Horizonte (MG)	70,10	21,61	8,28	Aracaju (SE)	73,50	19,21	7,29
Manaus (AM)	74,32	7,57	18,11	Florianópolis (SC)	49,25	25,43	25,32
Curitiba (PR)	62,13	32,73	5,14	Porto Velho (RO)	62,92	13,25	23,83
Recife (PE)	56,94	14,81	28,25	Macapá (AP)	54,19	9,97	35,84
Goiânia (GO)	64,89	33,14	1,97	Boa Vista (RR)	43,01	18,64	38,35
Porto Alegre (RS)	35,07	46,56	18,37	Rio Branco (AC)	71,42	6,85	21,73
Belém (PA)	66,10	10,89	23,01	Vitória (ES)	38,25	37,08	24,67
São Luís (MA)	82,11	5,95	11,94	Palmas (TO)	75,43	12,61	11,96
Maceió (AL)	64,09	20,40	15,51	Brasil	65,22	18,83	15,95

Os dados sobre obstáculos nas calçadas nas capitais brasileiras revelam que grande parte da população enfrenta barreiras físicas que comprometem a mobilidade, especialmente para pessoas com deficiência, idosos e gestantes. Dois em cada três brasileiros vivem em locais com calçadas obstruídas, o que representa um grande desafio para a acessibilidade e mobilidade urbana. As capitais com a maior presença de obstáculos nas calçadas foram Teresina (86,49%), São Luís (82,11%), João Pessoa (75,07%), Palmas (75,43%) e Manaus (74,32%). Por outro lado, os menores índices foram encontrados em Porto Alegre (35,07%), Salvador (38,26%), Vitória (38,25%), Boa Vista (43,01%) e Florianópolis (49,25%).

É importante salientar que quantidade de calçada não garante qualidade, uma vez que a falta de manutenção, uso indevido e infraestrutura desorganizada são comuns em grandes centros urbanos brasileiros. Um exemplo é São Luís, que tem um alto percentual de calçadas (88,06%), porém também um alto índice de obstáculos

(82,11%). Curitiba, com a maior proporção de calçadas (94,86%) e uma das maiores de rampas (40,47%), ainda tem 62% de obstáculos. Ainda, Teresina apresenta muitas calçadas (93,14%), mas também é a capital com mais obstáculos (86,49%).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o Brasil tenha avançado nas últimas décadas com a formulação de políticas públicas voltadas à mobilidade e à acessibilidade urbana, os dados mais recentes do Censo Demográfico 2022 revelam que os desafios persistem em larga escala. Em Salvador (BA), por exemplo – quinta capital mais populosa do país –, cerca de 44% da população ainda não conta com acesso a calçadas ou passeios. Ainda mais alarmante é o dado referente às rampas de acessibilidade: apenas 6,89% da população tem acesso a esse tipo de estrutura essencial para cadeirantes e pessoas com mobilidade reduzida.

Esse cenário não é exclusivo da capital baiana. A negligência em relação à acessibilidade é um problema estrutural comum à maioria das capitais brasileiras. Mesmo nas metrópoles com maior cobertura de calçadas, como São Paulo e Rio de Janeiro, o número de rampas permanece baixo — 16,60% e 16,43%, respectivamente. Isso evidencia que a mera presença de calçadas não garante, por si só, a acessibilidade urbana. É preciso que essas estruturas sejam planejadas, executadas e mantidas segundo critérios técnicos que respeitem as normas de acessibilidade, garantindo o uso pleno e seguro por todos os cidadãos.

Outro aspecto crítico é a presença generalizada de obstáculos nas calçadas, como postes, desníveis, mobiliário urbano mal posicionado e árvores sem proteção adequada. Tais barreiras comprometem severamente a circulação de pedestres, especialmente os mais vulneráveis, como idosos, pessoas com deficiência ou crianças. Mesmo cidades consideradas modelo em mobilidade, como Curitiba (PR), apresentam altos índices de obstáculos, indicando falhas na manutenção e na padronização dos passeios públicos.

Esse panorama reforça a necessidade de uma abordagem mais integrada e eficaz, que vá além da simples implementação de infraestrutura física. Políticas públicas voltadas à mobilidade inclusiva devem prever mecanismos de fiscalização, padrões construtivos uniformizados e ações contínuas de requalificação do espaço urbano, além de promover a participação da sociedade civil no planejamento e monitoramento das ações. Apenas com uma agenda pública comprometida com a equidade espacial será possível construir cidades verdadeiramente acessíveis, seguras e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, R. A.; Hardt, L.P.A e Hardt, C. (2024) Calçadas como lugares de socialização: equidade urbana para pessoas com mobilidade reduzida. Caderno Metrópoles, São Paulo, v. 26, n. 60, p. 727-755. http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2024-6015

Gaglione, F.; Gargiulo, C.; Zucaro, F.; Cottrill, C. (2022). Urban accessibility in a 15-minute city: a measure in the city of Naples, Italy. Transportation Research Procedia Amsterdam, v. 60, pp. 378-385. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.049.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2023a) https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/38186-censo-2022-numero-de-pessoas-com-65-anos-ou-mais-de-idade-cresceu-57-4-em-12-anos

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2023b) Censo Demográfico 2022: Características Urbanísticas do Entorno dos Domicílios – Resultados do Universo. SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6591. Acesso em: 23 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2025) https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/43463-censo-2022-brasil-tem-14-4-milhoes-de-pessoas-com-deficiencia

Jamaico, K. O. M. (2021) Acessibilidade e Mobilidade em Ourinhos-SP: Um Estudo de Caso a Partir das Calçadas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geografia), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ourinhos, SP.

Lucas Eduardo Dornelles (lucascivilufsm@gmail.com)
Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Cidade Universitária - Prédio 8 (INPE), sala 2061 - Camobi, Santa Maria, RS, Brasil
Marina Frederich de Oliveira (marina.oliveira@ecorodovias.com.br)
Grupo Ecorodovias, Gerência de Pavimento, Rodovia dos Imigrantes (SP 160), s/nº - Km 28,5, Jardim Represa, São Bernardo do Campo, SP, Brasil

MOBILIDADE E JUSTIÇA TERRITORIAL: AVALIAÇÃO ESPACIAL DA COBERTURA DO TRANSPORTE PÚBLICO EM ÁREAS PERIFÉRICAS

Daniel dos Reis Oliveira, Jessica Ferreira Alves, Pedro Henrique Santos Silva, Andersonn Magalhães de Oliveira
Universidade Federal do Sul da Bahia

RESUMO
Este artigo realiza um diagnóstico espacial da cobertura do transporte público por ônibus no bairro Califórnia, periferia urbana de Itabuna-BA, com o objetivo de identificar deficiências que comprometem a justiça territorial e a equidade na mobilidade. Utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG), foram gerados buffers de acessibilidade de 100 a 250 metros ao redor das paradas de ônibus. Os resultados apontam cobertura insuficiente em distâncias curtas de caminhada, concentração de paradas em avenidas principais e áreas sem atendimento. A análise evidenciou ainda os desafios técnicos para ampliar o acesso em regiões com relevo acidentado e infraestrutura precária. Os achados corroboram a literatura sobre desigualdades socioespaciais na mobilidade urbana (BITTENCOURT et al., 2020; TAPLIN & SUN, 2020) e reforçam a importância de diagnósticos territoriais para orientar políticas públicas que promovam maior inclusão e eficiência nos sistemas de transporte em áreas periféricas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte público urbano é um elemento central na promoção da equidade no acesso a serviços, oportunidades e ao espaço urbano (CÂMARA e BANISTER, 1993; SCHEURER et al., 2017). No entanto, no Brasil, sua oferta ainda é marcada por desigualdades significativas, especialmente nas periferias urbanas, onde a baixa qualidade do serviço compromete o direito à mobilidade (BITTENCOURT et al., 2020). A precariedade das linhas, a baixa frequência dos veículos e a desconexão entre bairros periféricos e centros urbanos limitam a autonomia dos moradores e aprofundam processos de exclusão territorial (MARICATO, 2011; SILVEIRA e COCCO, 2010).

A literatura indica que a configuração espacial dos sistemas de transporte público desempenha um papel central na ampliação das desigualdades urbanas. Exemplos de estudos realizados em contextos diversos, como Austrália, Hong Kong, Tailândia e América Latina, mostram que populações residentes em áreas de menor renda enfrentam piores condições de acessibilidade e serviço, mesmo quando a infraestrutura urbana está presente (SCHEURER et al., 2017; CHANG et al., 2019; PEUNGNUMSAI et al., 2020).

No Brasil, essas desigualdades são ainda mais acentuadas, reforçando as disparidades históricas entre os centros economicamente valorizados e os territórios periféricos (CÂMARA e BANISTER, 1993; BITTENCOURT et al., 2020). A combinação entre segregação socioespacial e baixa cobertura do transporte público acaba por consolidar um ciclo de desvantagens cumulativas para as populações marginalizadas.

Estudos em cidades brasileiras de médio porte têm evidenciado variações intrarregionais significativas na acessibilidade aos centros urbanos, com desvantagens expressivas para os usuários de transporte coletivo (COSTA et al., 2021). Esse cenário reforça a importância de diagnósticos espaciais no sistema de mobilidade. Entre os fatores que afetam essa acessibilidade estão padrões urbanos dispersos, o crescimento do uso de automóveis particulares e o planejamento territorial desarticulado (SILVEIRA e COCCO, 2010).

Sendo assim, a análise da disposição espacial dos elementos do sistema, como linhas, paradas e frequências, torna-se fundamental para a compreensão da eficiência e da justiça espacial na oferta do serviço. Por exemplo, o espaçamento entre paradas é um fator crítico, pois influencia tanto a velocidade operacional quanto o acesso dos usuários (MARTINO, 2014).

Nesse contexto, o presente estudo parte do seguinte problema: o sistema de transporte público nas periferias, apresenta uma configuração espacial inadequada, que compromete a eficiência do serviço e acentua a desigualdade no acesso à mobilidade. A partir disso, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: Como identificar as deficiências espaciais do transporte público, e de que forma as eventuais falhas impactam a acessibilidade e a equidade na mobilidade urbana?

A hipótese orientadora deste estudo é que a baixa cobertura territorial da rede de transporte, aliada à má distribuição das paradas e à escassez de linhas, revela um sistema ineficiente que contribui para a exclusão socioespacial da população local. Com base nisso, o objetivo deste artigo é realizar um diagnóstico espacial do sistema de transporte público, adotando como região de ensaio o bairro Califórnia, em Itabuna - Bahia, identificando falhas na cobertura espacial do sistema de transporte de ônibus, a fim de subsidiar propostas para uma mobilidade mais eficiente, e equitativa.

Este estudo destaca a importância de compreender como os aspectos técnicos da engenharia de transportes,

especialmente a estrutura espacial dos sistemas, afetam a equidade na mobilidade urbana, com foco nos entraves de acesso ao transporte público na periferia de Itabuna. A desarticulação entre o planejamento técnico e a vivência das populações periféricas aprofunda a exclusão social na mobilidade (BITTENCOURT et al., 2020; GAO et al., 2022), evidenciando a urgência de intervenções que promovam justiça territorial e políticas públicas mais eficazes, reconhecendo o transporte como um direito social fundamental.
Nesse contexto, entender como a configuração espacial do transporte público influencia a equidade urbana é fundamental, sobretudo nas periferias. A integração entre transporte e uso do solo é apontada como chave para ampliar a acessibilidade e promover inclusão (BOISJOLY e EL-GENEIDY, 2021; GIUFFRIDA et al., 2022). Ferramentas como os SIGs auxiliam na identificação de falhas na rede e na proposição de melhorias (CHA, 2008), considerando fatores como conectividade e centralidade (SCHEURER e PORTA, 2006). Sendo assim, este estudo contribui com evidências empíricas sobre desigualdades espaciais na mobilidade, respondendo a lacunas pouco exploradas nas cidades médias brasileiras.

2. METODOLOGIA

O presente estudo adotou uma abordagem de análise espacial com base em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), visando diagnosticar falhas na cobertura territorial do transporte público por ônibus no bairro Califórnia, em Itabuna-BA. A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: (i) definição da área de estudo; (ii) coleta e consolidação de dados espaciais; (iii) geoprocessamento e geração de camadas analíticas; e (iv) análise espacial dos resultados.
A área de estudo foi definida a partir da escolha do bairro Califórnia, localizado na zona norte de Itabuna, por se tratar de uma região periférica que apresenta características de adensamento populacional, relevo acidentado e precariedade na oferta de transporte coletivo. Os dados espaciais foram obtidos a partir de três fontes principais: Google Maps, OpenStreetMap e o aplicativo Siga Atlântico, plataforma da concessionária de transporte coletivo de Itabuna, que fornece a localização das paradas e as rotas dos ônibus em operação.
Essas informações foram sistematizadas e integradas em um banco de dados geográfico consolidado no software QGIS, que serviu de base para os procedimentos de geoprocessamento. A partir das paradas de ônibus mapeadas, foram geradas camadas de buffers com raios de 100 m, 150 m, 200 m e 250 m, com o objetivo de representar diferentes distâncias máximas de caminhada até os pontos de embarque, os valores desses buffers se justificam pelos critérios de Taplim e Sun (2020). Para cada cenário, foi calculada a proporção da área do bairro coberta pelas zonas de influência das paradas, permitindo avaliar o nível de cobertura espacial.
Além disso, foram realizadas análises complementares sobre o espaçamento entre as paradas, a distribuição espacial das rotas de ônibus e a dispersão das áreas não atendidas, visando identificar padrões de ineficiência na configuração do sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise espacial realizada revelou importantes deficiências na configuração territorial do sistema de transporte público no bairro Califórnia, especialmente no que se refere à distribuição das paradas e à cobertura efetiva da rede.
A partir da geração dos buffers em torno das paradas de ônibus, foi possível calcular a porcentagem da área do bairro atendida em diferentes cenários de distância máxima de caminhada. Os valores obtidos indicam uma baixa cobertura inicial, que só atinge níveis satisfatórios com a ampliação considerável do raio de deslocamento, conforme representado no Gráfico 1.

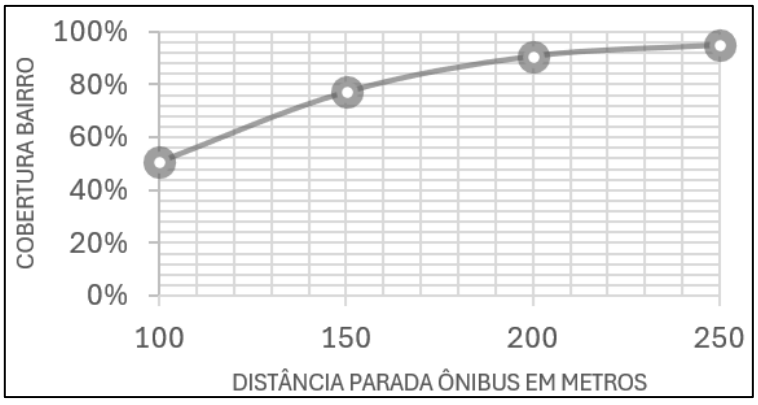


Gráfico 1: Gráfico de distâncias dos *buffers* das paradas de ônibus *versus* cobertura no bairro Califórnia, Itabuna-BA

Os raios de 100 m, 150 m, 200 m e 250 m utilizados nesta análise foram definidos com base em referências da literatura que tratam da acessibilidade a pé ao transporte público. Segundo Taplin e Sun (2020), a maioria dos usuários caminha entre 150 e 240 metros até os pontos de ônibus, o que torna esses valores adequados para simular diferentes níveis de conforto e esforço. No entanto, em contextos como o do bairro Califórnia, com presença de topografia acidentada, a acessibilidade tende a ser reduzida. Pais et al. (2025) estimam que terrenos irregulares podem diminuir em até 10% a efetiva área de captação, tornando distâncias curtas ainda mais críticas.

Nesse sentido, os resultados mostram que, com apenas 100 metros de raio, a cobertura alcança 51% do bairro, sugerindo que metade dos moradores precisa percorrer distâncias maiores ou, possivelmente, enfrentar obstáculos no caminho. Mesmo ampliando o raio para 150 metros, a cobertura ainda é de apenas 77%. Atinge-se 95% de cobertura apenas com 250 metros, valor que pode ser excessivo considerando o relevo local e a ausência de infraestrutura adequada para caminhar.

Esses dados corroboram observações de Noh et al. (2021), que apontam a relação direta entre raio de captação e cobertura, além da importância das vias de acesso e da conectividade da malha urbana para o deslocamento a pé. Além disso, como sugere Matsuhashi (2002), a realocação estratégica de paradas, próximas a faixas de pedestres ou zonas de maior circulação, pode potencialmente duplicar ou triplicar o número de pessoas atendidas a curta distância, o que reforça a importância da reavaliação da localização atual das paradas no bairro estudado.

A visualização espacial das paradas de ônibus na figura 1, sobreposta aos buffers gerados, permite observar com maior precisão a concentração das paradas em determinadas vias principais e a existência de áreas amplas fora das zonas de cobertura. O mapa da figura 1 evidencia zonas de sombra no interior do bairro, distantes das rotas principais, o que limita o acesso seguro e confortável ao transporte coletivo. Essas lacunas territoriais indicam uma estrutura radial ou linear do sistema, voltada para o deslocamento em eixos principais, mas sem capilaridade suficiente para atender às áreas internas e de maior vulnerabilidade socioespacial.

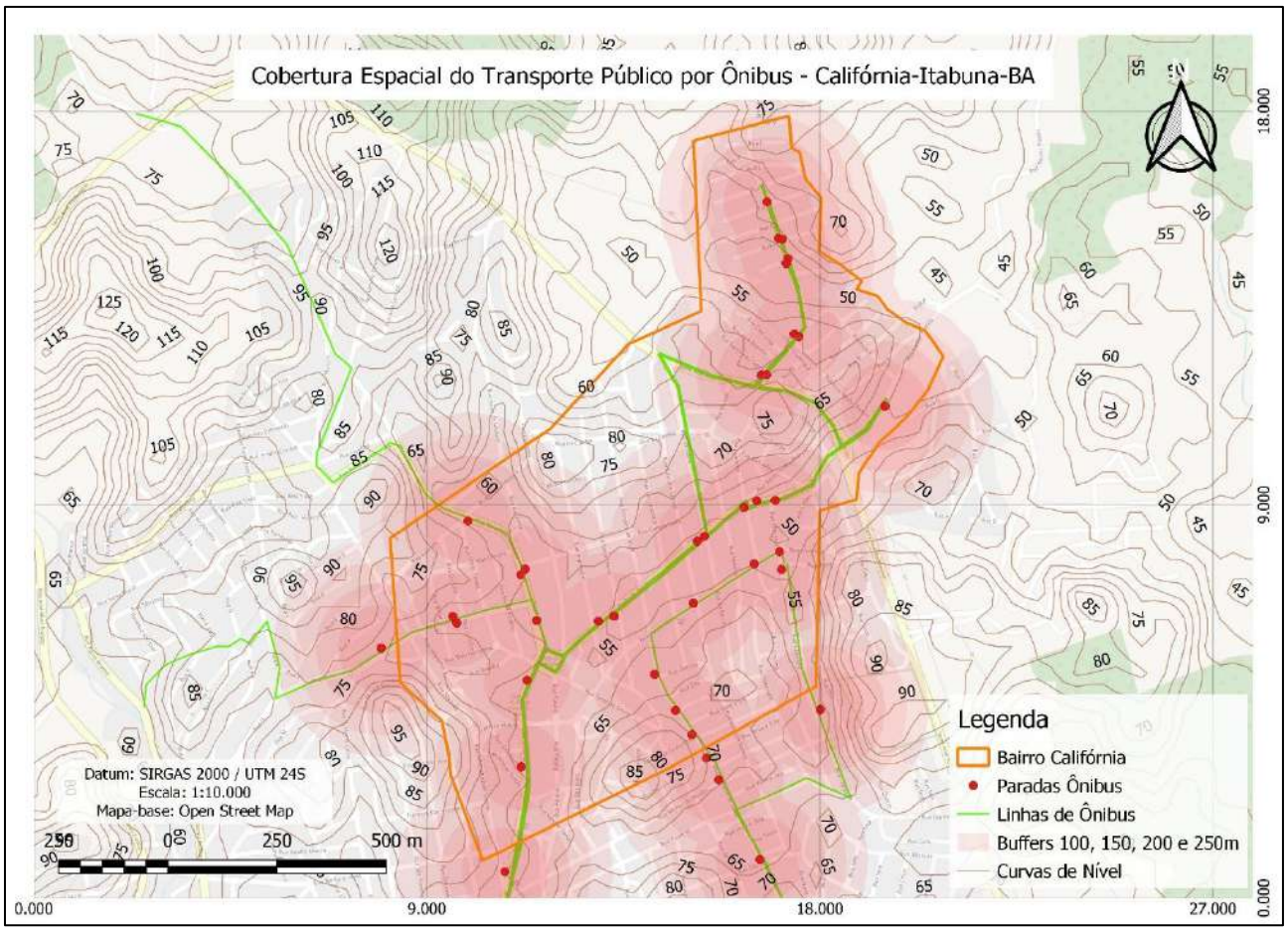


Figura 1: Mapa da cobertura espacial do transporte público por ônibus no bairro Califórnia, Itabuna-BA.

Ainda sobre o mapa da Figura 1, se observa o espaçamento entre paradas de ônibus com amplitudes que variam de 28 a 750 metros de distância. Além de regiões fora da cobertura dos *buffers*, cuja parada de ônibus mais próxima fica a mais de 450 metros dentro do bairro, o que evidencia problemas de eficiência do sistema.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo cumpriu o objetivo proposto ao realizar um diagnóstico espacial do sistema de transporte público por ônibus no bairro Califórnia, em Itabuna-BA. A análise baseada em SIG permitiu identificar falhas significativas na cobertura territorial da rede de transporte, respondendo de forma consistente à pergunta de pesquisa. Os achados confirmam parcialmente a hipótese inicial: embora a rede apresente baixa cobertura em distâncias curtas de caminhada e distribuição desigual das paradas, observou-se também uma superposição de pontos em algumas avenidas principais, o que revela tanto escassez quanto concentração desordenada da infraestrutura. A metodologia proposta foi aplicada com sucesso, validando-se como uma ferramenta eficaz para diagnosticar desigualdades no acesso à mobilidade urbana.

Os resultados obtidos revelaram que a cobertura espacial é insuficiente quando considerada a distância média de caminhada usual, especialmente em áreas com relevo acidentado, fator que reduz ainda mais a acessibilidade efetiva (PAIS et al., 2025). Com apenas 100 metros de raio, apenas 51% do bairro é atendido, aumentando para 77% com 150 metros e atingindo 95% apenas com 250 metros, limite que pode ser considerado excessivo em contextos de urbanização precária. Tais resultados corroboram os apontamentos de Taplin e Sun (2020), Noh et al. (2021) e Scheurer et al. (2017), reforçando que a má localização e o espaçamento inadequado entre paradas agravam a exclusão territorial, especialmente nas periferias urbanas brasileiras (BITTENCOURT et al., 2020; SILVEIRA e COCCO, 2010).

Do ponto de vista do planejamento urbano, a análise espacial permitiu identificar vazios territoriais críticos onde não há qualquer cobertura por transporte coletivo, bem como trechos extensos onde os ônibus passam sem paradas designadas, comprometendo o acesso da população e a eficiência operacional do sistema. Ao mesmo tempo, foram observadas avenidas principais com paradas muito próximas umas das outras, indicando uma sobreposição que pode prejudicar a velocidade comercial dos ônibus. A metodologia revelou, ainda, os desafios para promover uma distribuição mais equitativa do acesso ao transporte público em áreas de relevo íngreme e malha viária estreita, onde a instalação de novas paradas ou o redirecionamento das rotas exige soluções técnicas mais complexas.

Apesar das contribuições relevantes, este estudo apresenta limitações. A análise foi restrita à dimensão espacial da cobertura, sem incorporar dados de frequência de viagens, volume de passageiros ou qualidade da infraestrutura viária. Além disso, foram consideradas apenas variáveis físicas e de localização, sem a integração com indicadores socioeconômicos. Estudos futuros podem ampliar essa abordagem, combinando análises com outras técnicas e informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BITTENCOURT, T. A.; GIANNOTTI, M.; MARQUES, E. Cumulative (and self-reinforcing) spatial inequalities: Interactions between accessibility and segregation in four Brazilian metropolises. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 48, n. 7, p. 1989-2005, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1177/2399808320958426.

BOISJOLY, Geneviève; EL-GENEIDY, Ahmed. Public transport equity outcomes through the lens of urban form. Urban Form and Accessibility, 2021.

CÂMARA, P.; BANISTER, D. Spatial inequalities in the provision of public transport in Latin American cities. Transport Reviews, v. 13, n. 4, p. 351–373, 1993. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01441649308716857.

COSTA, Cayo; HA, Jaehyun; LEE, Sugie. Spatial disparity of income-weighted accessibility in Brazilian Cities: Application of a Google Maps API. Journal of Transport Geography, v. 90, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102905.

CHA, Ho-Seop. Enhancing equity in public transportation using geographic information systems and spatial optimization. 2008. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) – The Ohio State University, Columbus, 2008.

CHANG, Zheng et al. Public transportation and the spatial inequality of urban park accessibility: New evidence from Hong Kong. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 76, p. 111–122, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.012.

GAO, Qi-Li et al. Revealing transport inequality from an activity space perspective: A study based on human mobility data. Cities, v. 131, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104036.

GIUFFRIDA, Nadia et al. A simplified framework for the equity-based spatial assessment of alternative public transport networks. Sustainability, v. 14, n. 24, 2022.

MARICATO, Ermínia. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis: Vozes, 2017.

MARTINO, Alessandro de. Geographic accessibility analysis and evaluation of potential changes to the public transportation system. Dissertação (Mestrado) – LUMA-GIS. 2014.

MATSUHASHI, Keisuke. A relation between location, accessibility and potential users of public transport stops. Journal of the City Planning Institute of Japan, 2002.

NOH, Nur 'Amirah Mhd.; MOHAMAD, Diana; HAMID, Ahmad Hilmy Abdul. Acceptable walking distance accessible to the nearest bus stop considering the service coverage. In: 2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN), 2021.

PAIS, Filipe; SOUSA, Nuno; MONTEIRO, João; RODRIGUES, João Coutinho; JESUS, Eduardo Natividade. Walking to public transport: Rethinking catchment areas considering topography and surrogate buffers. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2025.

PEUNGNUMSAI, A.; MIYAZAKI, H.; WITAYANGKURN, A.; KIM, S. M. A grid-based spatial analysis for detecting supply–demand gaps of public transports: A case study of the Bangkok Metropolitan Region. Sustainability, v. 12, n. 24, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su122410382.

SCHEURER, Jan; CURTIS, Carey; MCLEOD, Sam. Spatial accessibility of public transport in Australian cities: Does it relieve or entrench social and economic inequality? Journal of Transport and Land Use, v. 10, n. 1, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.5198/jtlu.2017.1097.

SCHEURER, Jan; PORTA, Sergio. Centrality and connectivity in public transport networks and their significance for transport sustainability in cities. In: World Planning Schools Congress, Global Planning Association Education Network. 2006.

SILVEIRA, M. R.; COCCO, R. G. Interações espaciais, transporte público e estruturação do espaço urbano. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 12, n. 1, p. 63, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.22296/2317-1529.2010v12n1p63.

TAPLIN, John H.; SUN, Yuchao. Optimizing bus stop locations for walking access: Stops-first design of a feeder route to enhance a residential plan. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 47, 2020.

Daniel dos Reis Oliveira (danieldanix89@gmail.com); *Jessica Ferreira Alves* (jessfalves18@gmail.com); *Pedro Henrique Santos Silva* (henriquermbspb@gmail.com); *Andersonn Magalhães de Oliveira* (andersonn.magalhaes@ufsb.edu.br);
Universidade Federal do Sul da Bahia, Centro de Formação em Tecno-Ciências e Inovação. Campus Jorge Amado.

MOBILIDADE NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA: PROPOSTA CONCEITUAL PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO

Erika Cristine Kneib
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Em meio os notórios problemas de mobilidade nas regiões metropolitanas (RM) brasileiras, cabe observar um processo de planejamento fragmentado, de gestão e de políticas desarticuladas e ausência de uma governança interfederativa, fatos considerados grandes gargalos para a mobilidade. Assim, este artigo procura destacar a importância do planejamento integrado e tem por objetivo apresentar uma proposta teórico-conceitual voltada à articulação dos temas e políticas afetos à mobilidade, no sentido de contribuir com o planejamento em escala metropolitana. Como metodologia, recorre-se à base teórica relativa à Teoria Geral dos Sistemas e a referências bibliográficas correlatas, para desenvolvimento da proposta, que é aplicada à Região Metropolitana de Goiânia, desenvolvendo-se o Sistema de Mobilidade de Interesse Metropolitano. Como resultados, a proposta mostra-se viável de ser adotada em outras RM ou cidades que desejam desenvolver um processo de planejamento integrado de mobilidade.

1. INTRODUÇÃO

Em meio os notórios problemas de mobilidade nas cidades brasileiras e a complexidade que os envolve, tais questões são majoradas quando se fala em regiões metropolitanas (RM). Apesar de haver limites político-administrativos, as pessoas desejam se deslocar entre os municípios de forma contínua e com qualidade.

A carência de integração entre as políticas públicas, notadamente as relativas à mobilidade, é notória, especialmente nas RM. O material do TCU (2015) constata a insuficiência de elementos de articulação que permitam alinhar estratégias e políticas de mobilidade urbana, gerando prejuízos no desenvolvimento e gestão desta política. Outra questão relevante consiste no próprio conceito de mobilidade, que ainda é tratado de forma restrita pelo poder público, considerando normalmente apenas o transporte público e/ou o sistema viário (IPEA, 2015). Em adição, bases de dados desatualizadas ou inexistentes, assim como a ausência de uma governança metropolitana efetiva têm sido considerados grandes gargalos no tema, que ainda apresenta muitas lacunas e obstáculos a serem superados (Kneib, 2022).

Neste cenário de complexidade metropolitana, que envolve diversas políticas e esferas federativas, um processo de planejamento articulado, que permita entender, planejar e integrar políticas urbanas relativas à mobilidade, se faz urgente. A necessidade de articulação de políticas é amplamente enfatizada no arcabouço legal relativo ao Estatuto da Metrópole, que as denomina de funções públicas de interesse comum (Brasil, 2015), mas ainda está longe de produzir efeitos práticos na maioria das RM nacionais.

Destarte, este artigo procura destacar a importância do planejamento da mobilidade de forma articulada, superando as abordagens fragmentadas que ocorrem nas RM brasileiras. Assim, se tem por objetivo apresentar uma proposta teórico-conceitual voltada à articulação dos temas e políticas afetos à mobilidade, no sentido de contribuir com o planejamento em escala metropolitana, especialmente no âmbito dos planos diretores de desenvolvimento urbano integrados (PDUI), como estabelece o Estatuto da Metrópole. Como metodologia, recorre-se à base teórica relativa à Teoria Geral dos Sistemas (Bertalanffy, 2015), assim como a referências bibliográficas que exploram a referida abordagem. Na sequência, a proposta teórico-conceitual é aplicada à Região Metropolitana de Goiânia (RMG), no sentido de verificar sua aplicabilidade.

Como resultados, a proposta desenvolvida mostra-se viável de ser adotada em outras RM ou cidades que desejam desenvolver um processo de planejamento integrado de mobilidade, assim como mostra-se capaz de incorporar as especificidades urbanas e metropolitanas do município ou região em que é aplicada, contribuindo para seu processo de planejamento integrado.

2. A TEORIA GERAL DOS SISTEMAS COMO BASE CONCEITUAL

A Teoria Geral dos Sistemas - TGS vem conformando uma base para vários campos científicos e tecnológicos, permitindo que o conceito de sistema seja definido e desenvolvido de diferentes formas. A teoria traz dois princípios básicos: i) um sistema integra um todo maior e é, ou pode ser, composto por outros sistemas; ii) um

sistema é um todo formado por partes interconectadas, que interagem entre si, dentro do próprio sistema, e com o ambiente externo, para alcançar um objetivo (Bertalanffy, 2015). Destacam-se alguns outros tópicos relevantes para este trabalho, no contexto da TGS, com base em (Bertalanffy, 2015):

- A TGS confirma a existência de sistemas dentro de sistemas em uma estrutura hierárquica que é relativa ao observador que os estuda, classificando os sistemas de diferentes formas;
- As interações, a interdependência entre os elementos e o contexto moldam a organização do sistema;
- Os subsistemas são as partes menores dentro de um sistema, que desempenham funções específicas e contribuem para o funcionamento do todo. Cada subsistema pode operar de forma semi-autônoma, mas ainda está interligado com os outros subsistemas e com o sistema maior;
- Em análises sistêmicas, o pesquisador tem papel participativo. Ele define o recorte da realidade e direciona o foco para um determinado fenômeno que deseja estudar, por meio de sua experiência e habilidade;
- O conhecimento resultante do sistema é limitado ou aproximado, por ser uma interpretação subjetiva do fenômeno, sendo produto da interação entre o indivíduo e o fenômeno observado.

3. A BUSCA POR UM SISTEMA DE MOBILIDADE

A partir de diversas constatações sobre a fragmentação das políticas afetas à mobilidade, há estudos, propostas e referências que procuram tratar deste tema, ao elaborar conceitos e definições sobre um sistema de mobilidade, dentre as quais é possível citar:

- O *Sistema Nacional de Mobilidade Urbana*, definido como "o conjunto organizado e coordenado dos modos de transporte, de serviços e de infraestruturas que garante os deslocamentos de pessoas e cargas no território do Município" (Brasil, 2012, Art. 3º);
- O *Sistema de Mobilidade Urbana* apresentado no trabalho de Gonzaga *et al* (2022, p. 228), que é definido como um "conjunto de elementos que interagem entre si e estabelecem as condições de acesso (através da interação entre Transportes e Uso do Solo, o que resulta na Acessibilidade) que, ao interagirem com as condições dos indivíduos, resultam nas condições de mobilidade da população" ;
- O *Sistema de Mobilidade Urbana,* apresentado por Kneib *et al* (2022), voltado à mobilidade das pessoas, derivado do conceito apresentado por Gonzaga *et al* (2022), que é definido como um "conjunto de subsistemas e elementos que interagem entre si e com fatores externos, com o objetivo de proporcionar mobilidade às pessoas" (Kneib *et al,* 2022, p. 38). Neste SMU, os subsistemas são 4: transportes, uso do solo, acessibilidade e pessoa;
- *O Sistema Único de Mobilidade Urbana (SUM),* que se caracteriza como uma proposta de política pública integrada e instrumento de gestão, tendo o transporte público coletivo como elemento central (Instituto MDT, 2023).

Assim, é possível observar que o conceito e a respectiva definição de um sistema de mobilidade ainda estão em construção e podem ser adaptados às necessidades e objetivos. Cabe destacar que o presente trabalho considera que o sistema de mobilidade vai muito além dos transportes, corroborando o defendido por Gonzaga et al (2022) e Kneib *et al* (2022), especialmente quando este será utilizado no âmbito do planejamento da mobilidade, voltado aos planos diretores.

4. MOBILIDADE NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA

A RMG é composta por 21 municípios. São municípios de tamanho, porte e população bastante diversificados, que somam cerca de 2,5 milhões de habitantes. Goiânia, a Capital do estado, é o com maior população (1,4 milhões), funcionando como um grande polo atrator de atividades, serviço e viagens. Na sequência estão os municípios de Aparecida de Goiânia, com 527 mil habitantes, Senador Canedo, com 155 mil e Trindade, com cerca de 142 mil habitantes (IBGE, 2022), que mais se destacam na RMG.

Para caracterizar a mobilidade na RMG, procurando destacar suas potencialidades e fragilidades, foi realizado um amplo de trabalho de levantamento de dados secundários que foram georreferenciados e analisados a partir de Sistemas de Informação Geográfica, em cada um dos temas (UFG, 2024). A seguir, apresenta-se apenas um resumo que procura destacar e exemplificar os principais aspectos de cada um dos temas trabalhados, que terão uma relação estreita com as especificidades da RMG, que conformam a proposta apresentada no item 5.

4.1. Atividades urbanas na RMG

As pessoas se deslocam na área urbana, ou metropolitana, com o objetivo principal de realizar suas atividades. Nesse sentido, é de grande importância que a mobilidade metropolitana considere a localização das atividades urbanas. São muitos os tipos de atividades urbanas e os motivos de viagens que geram as necessidades das pessoas em se deslocar. Para este estudo, devido à ausência de uma pesquisa origem e destino atualizada para a RMG, buscou-se desenvolver análises com base: i) nos deslocamentos pendulares (a partir a disponibilidade de dados de pessoas que se deslocam para os municípios da região metropolitana, por motivo trabalho e estudo, fornecidos pelo IBGE, 2017); ii) nos dados relacionados a empregos e oportunidades de estudo. Tais dados corroboram a polarização exercida pela capital, seguida do município de Aparecida de Goiânia. Dentre as informações com maior destaque, cabe enfatizar que Goiânia concentra 74% dos empregos, seguida de Aparecida de Goiânia, com 14,69% (UFG, 2024); os maiores números de deslocamentos pendulares são a partir de Aparecida de Goiânia para Goiânia - 123.919; seguidos de Senador Canedo para Goiânia - 25.205; e Trindade para Goiânia com 20.995 (IBGE, 2017).

4.2 As pessoas da RMG e suas características

A decisão de se deslocar e a forma deste deslocamento são funções das características, capacidades e necessidades das pessoas, englobando elementos como renda, gênero, idade, grau de escolarização, deficiência, dentre outros (Gonzaga *et al*, 2022). Em complemento, cabe enfatizar que as soluções para a mobilidade urbana podem estar em outras políticas, como as políticas econômicas e sociais.

Para identificar a analisar as diferentes características socioeconômicas das pessoas, podem ser utilizados diversos dados e indicadores. O recorte aqui adotado foi voltado à renda, idade e pessoas com deficiência, procurando ainda ilustrar a importância e o potencial de se identificar e analisar as características das pessoas no contexto da mobilidade. No que se refere à renda, destacam-se com maiores salários, além de Goiânia, os residentes nos municípios de Senador Canedo, Bela Vista, Trindade, Hidrolândia e Aparecida. Já com municípios com residentes de menores salários verificaram-se Caturaí, Brazabrantes, Bonfinópolis, Aragoiânia e Santa Bárbara. No que se refere à idade, as análises revelaram, por exemplo, que mais de 348 mil pessoas na RMG têm mais de 60 anos. Goiânia possui mais de 216 mil idosos, seguida de Aparecida de Goiânia com mais de 55 mil. No que se refere ao número de pessoas caracterizadas com deficiência nos municípios da RMG, são mais de 500 mil pessoas. Com relação aos percentuais, Santa Bárbara, Aragoiânia, Guapó e Caldazinha destacam-se com mais de 27% (UFG, 2024).

4.3 Os modos de transporte na RMG, as vias e os sinistros de trânsito

Modos ativos: para caracterizar os modos ativos foi identificada a infraestrutura cicloviária existente, assim como a possibilidade de integração bicicleta e ônibus. No que se refere à localização espacial da infraestrutura cicloviária, esta concentra-se no município de Goiânia, mas ainda com uma pequena quilometragem (135 km) se comparada ao sistema viário do município. No mais, observam-se ligações para Trindade, Senador Canedo e Aparecida de Goiânia, que somam, na RMG cerca de 262 km de algum tipo de tratamento viário para bicicleta. Identifica-se ainda que 17 dos 23 terminais de transporte coletivo da RMG possuem bicicletários (UFG, 2024).

Transporte coletivo: o serviço de transporte público coletivo de passageiros da RMG estrutura-se a partir de uma rede de serviços denominada Rede Metropolitana de Transportes Coletivos (RMTC), que engloba 19 dos 21 municípios da RMG (RMTC, 2024). A RMTC possui cerca de 300 linhas de ônibus, 21 terminais de integração e aproximadamente sete mil pontos de ônibus para embarque e desembarque de passageiros (RMTC, 2024). Existem dois BRT: um no sentido leste-oeste, o Eixo Anhanguera, com 13,5 km; outro no sentido norte-sul, com 22 km de extensão, com parte em funcionamento. Existem cerca de 20 km de vias com preferência para o transporte coletivo, os denominados corredores preferenciais (UFG, 2024).

Transporte motorizado individual e de cargas: o transporte motorizado individual foi avaliado a partir dos números relativos à frota, devido à ausência de uma pesquisa de origem e destino atualizada. Para se ter uma noção, em 2010, na RMG, havia o registro de 610 mil automóveis/carros e 324 mil motocicletas. Já nos anos de 2022 esses números subiram para mais de 963 mil e 567 mil, respectivamente (IBGE 2010, 2022). Já o transporte de cargas foi avaliado a partir da combinação de duas variáveis: a localização de indústrias e as vias

mais demandadas pelo transporte de cargas, revelando os principais eixos de conexão demandados pelo transporte de cargas, a exemplo da BR 153, BR 060, GO 010, GO 020, dentre outras (UFG, 2024).

Sistema viário: existem vias de responsabilidade federal, a exemplo da BR 163 e BR 060, vias de reponsabilidade estadual, a exemplo da GO 010, GO 020; e vias de responsabilidade municipal, que também possibilitam conexões entre os municípios. Contudo, a gestão de tais vias é desarticulada. As vias que funcionam como conexões entre os municípios da RMG foram identificadas e mapeadas, o que possibilitou identificar um conjunto de vias de interesse metropolitano, que tem como função estabelecer relações de acessibilidade entre os municípios, polos geradores de viagens e núcleos expressivos na RM, assim como seus problemas e potenciais (UFG, 2024).

Sinistros de trânsito: o levantamento mostrou números alarmantes e os municípios com maiores ocorrência na RMG. Em um recorte entre 2018 e 2022, os 21 municípios da RMG totalizaram 2.248 mortes. Isso corresponde à média de 24,8 mortes/ano por grupo de 100 mil habitantes ao custo aproximado de R$ 974 milhões somente com os mortos nesse recorte temporal de cinco anos (2018-2022) (UFG, 2024).

5. UMA PROPOSTA DE ARTICULAÇÃO: O SISTEMA DE MOBILIDADE DE INTERESSE METROPOLITANO DA RMG

A mobilidade metropolitana é ampla, complexa e extrapola o sistema de transportes, como já discutido. O sistema de mobilidade metropolitana é composto por diversos subsistemas que interagem entre si e com seu meio. Considerando-se as necessidades e especificidades da RMG, apresenta-se o *Sistema de Mobilidade de Interesse Metropolitano - SMIM* (Figura 1) como um conjunto de subsistemas e elementos que interagem entre si e com fatores externos, com o objetivo de proporcionar mobilidade às pessoas e cargas na RMG.

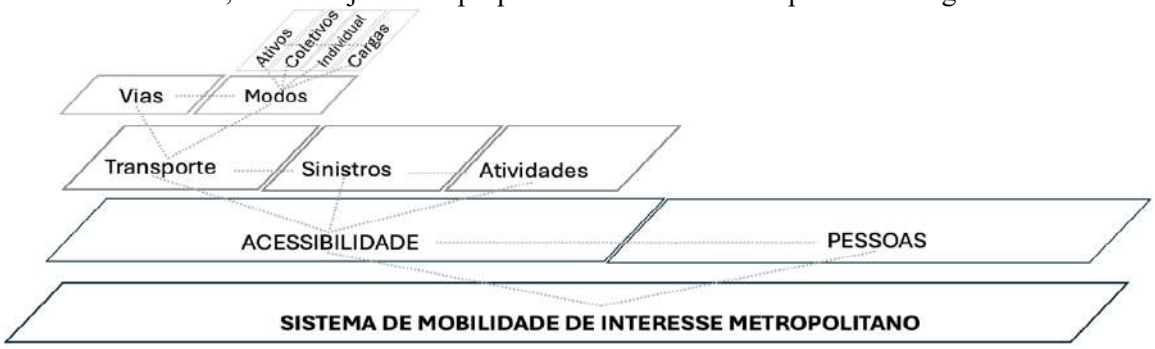


Figura 1: Representação da proposta do SMIM e seus subsistemas. Fonte: Própria.

Seguem algumas questões relevantes sobre a proposta:

- O termo *interesse metropolitano* procura chamar a atenção para a necessidade de um pacto interfederativo que consiga articular elementos municipais, estaduais e federais. A articulação e o consequente atendimento ao interesse metropolitano demanda uma governança e gestão interfederativas, como destacado no EM;
- Apesar de diversos temas e políticas relacionados, a gestão metropolitana precisa considerar e atuar, no mínimo, sobre o sistema de transportes e o sobre o uso do solo de interesse metropolitano. A articulação entre os modos de transporte e as atividades urbanas vai gerar maior ou menor acesso aos locais. Assim sendo, *o Sistema de Acessibilidade de Interesse Metropolitano na RMG* deve articular tais elementos e políticas nas 3 esferas federativas, garantindo o acesso seguro das pessoas à metrópole e entre os municípios metropolitanos;
- A partir da TGS que recomenda definir os subsistemas para viabilizar a análise, atendendo às especificidades da RMG, que inclui um alto índice de sinistros de trânsito, optou-se por destacar os *Sinistros de Interesse Metropolitano*, na busca por medidas articuladas que foquem em sua prevenção. Para a redução dos sinistros, notadamente os de interesse metropolitano, são necessárias ações diversas, que englobam não só o viário, como também os modos de transporte e as atividades urbanas de forma articulada;
- A abordagem mostrou ainda fundamental considerar as características e necessidades das pessoas, uma vez que soluções para que as pessoas possam se movimentar mais e melhor podem estar em outras políticas, que não as de transporte e uso do solo, conforme abordagens de Gonzaga *et al* (2022) e Kneib *et al* (2022).

Compõem a proposta do SMIM os seguintes subsistemas e elementos (Figura 1): (Sub) Sistema de Transporte de Interesse Metropolitano; Modos de transporte de interesse metropolitano; Vias de interesse metropolitano (que engloba a infraestrutura viária); (Subsistema de) Prevenção a Sinistros de Interesse Metropolitano; (Subsistema de) Atividades de interesse metropolitano; Sistema de Acessibilidade de Interesse Metropolitano; Sistema Pessoas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de problemas e lacunas relativos ao planejamento da mobilidade, especialmente em regiões metropolitanas, o presente trabalho apresentou uma proposta teórico-conceitual, relacionada ao Sistema de Mobilidade de Interesse Metropolitano - SMIM, com base no arcabouço teórico relacionado à TGS, aplicado à RMG, voltado ao planejamento, atendendo ao objetivo proposto.

A partir da proposta apresentada, é possível destacar: i) a necessidade de que o planejamento da mobilidade consiga articular temas e políticas que extrapolam somente os transportes, nas 3 esferas federativas; ii) a necessidade de uma base de dados articulada, em escala metropolitana, como potencial para o planejamento e articulação das políticas urbanas; iii) a importância de um diagnóstico em escala metropolitana que englobe tais temas, possibilitando identificar subsistemas específicos, a partir da problemática identificada; iv) o potencial do Estatuto da Metrópole e do PDUI para a integração metropolitana, especialmente no que se refere à gestão e governança interfederativas.

Entende-se ainda que o SMIM, aqui desenvolvido como uma proposta exploratória e inicial, pode conformar também a base para o desenvolvimento de um plano de mobilidade para a RMG, de fundamental importância para que este processo de articulação e planejamento da mobilidade tenha continuidade.

Agradecimentos

À professora Dra. Celene Antunes Barreira, coordenadora do PDUI RMG, e à equipe de pesquisadores que participou do documento *UFG (2024) Mobilidade metropolitana:* Patrícia Margon, Antenor Pinheiro, Juheina Lacerda, Wilson Lopes, Jaqueline Neves, Yordana Naciff.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bertalanffy, L. von (2015) *Teoria geral dos sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações.* 1901-1972. Tradução de Francisco M. Guimarães. 8 ed. Petrópolis, RJ: Editora Vozes, 2015. 360p.

Brasil (2012) Política Nacional de Mobilidade Urbana: Lei no 12.587, de 3 de janeiro de 2012**.** *Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana.* Brasília, DF: Câmara dos Deputados.

Brasil (2015) Lei n° 13.809, de 3 de janeiro de 2015. *Institui o Estatuto da Metrópole, altera a Lei no 10.257, de 10 de julho de 2001, e dá outras providência*s. Diário Oficial [da] União, Brasília, DF.

Gonzaga, A. S. D. S. ; Portugal, L. S. ; Kneib, E. C. (2022) Elementos e fundamentos para a concepção de um Sistema de Mobilidade Urbana orientado à inclusão social. *Caderno de Geografia,* 32(68), https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2022v32n68.

IBGE (2017) Arranjos populacionais e concentrações urbanas do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IBGE (2023) Censo Brasileiro de 2022. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

Instituto MDT (2025) SUM – Sistema Único de Mobilidade Urbana. Disponível em https://institutomdt.org.br/wp-content/uploads/2023/10/Cartilha_SUM_final.pdf. Acesso em junho de 2025.

IPEA (2015) A Governança Metropolitana da mobilidade: uma análise a partir dos Estados. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília : Rio de Janeiro.

Kneib, E. C.; Rocha, A. P. A. ; Lima, A. F. ; Tibiriça (2022) *Conectados pelo transporte coletivo: desafios e caminhos para a mobilidade urbana na região metropolitana de Goiânia* (livro eletrônico). 1. ed. Goiânia: Escoex,1. 160p

RMTC (2024) Dados e informações sobre o transporte coletivo – RMTC. Goiânia: Consórcio RMTC, 2024. Disponível em: https://www.rmtcgoiania.com.br/sobrea-a-rmtc/informacoes-institucionais. Acesso em: mar. 2024.

TCU (2015) Relatório de auditoria operacional. Governança em políticas de mobilidade. Tribunal de Contas da União. Brasília, 2015. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/ fileDownload.jsp?fileId=8A8182A250204B 77015039C8B3E42B 8E&inline=1>. Acesso em: junho de 2025.

UFG (2024) Mobilidade metropolitana. Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana de Goiânia. Universidade Federal de Goiás, 2024.

Érika Cristine Kneib (erikakneib@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais, Programa de Pós Graduação Projeto e Cidade
(Campus Samambaia, Av. Esperança, s/n - Chácaras de Recreio Samambaia, Edifício da Faculdade de Artes Visuais, Goiânia - GO, Brasil).

MONITORAMENTO REMOTO DA INFRAESTRUTURA DE ACESSIBILIDADE: CONTRIBUIÇÕES METODOLÓGICAS

Vivian de Oliveira Fernandes, Thamille S. Castro, Danielle M. Cazumba, Jorge Ubirajara Pedreira Jr
Universidade Federal da Bahia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC)

RESUMO
O presente trabalho apresenta resultados parciais de um projeto de pesquisa que visa desenvolver metodologias escaláveis para avaliação remota da acessibilidade as estrutura de mobilidade em cidades brasileiras. Foram analisadas duas abordagens complementares: uma técnica, baseada na adaptação do índice ICam 2.0 para auditorias por imagens de nível de rua; e outra perceptiva, fundamentada no método AHP para avaliação com participação de usuários. Os estudos de caso revelaram limitações estruturais em trechos urbanos e a viabilidade do uso de tecnologias de inspeção remota como ferramenta de diagnóstico. Os métodos mostraram-se eficazes de forma independente e servirão de base para a construção de um modelo híbrido de avaliação, que integrará dados técnicos e percepções dos usuários. Os resultados indicam potencial de aplicação em larga escala e contribuição para o planejamento urbano inclusivo, com foco na identificação de rotas prioritárias e apoio à formulação de políticas públicas.

1. INTRODUÇÃO

A acessibilidade urbana é condição fundamental para o exercício da cidadania e para a promoção da mobilidade segura, autônoma e inclusiva. No entanto, a precariedade da infraestrutura urbana, especialmente nas calçadas e travessias, compromete a circulação de pessoas com deficiência, idosos e outros grupos com mobilidade reduzida, além de desmobilizar a mobilidade a pé até daqueles que não possuem restrições.

Helbich (2024), Biljecki (2021), Berland (2017) indicam que para enfrentar esse desafio de forma eficiente, o uso de tecnologias de geoinformação e imagens de nível de rua (Street View Images – SVI) tem se mostrado promissor, permitindo a avaliação remota de grandes áreas urbanas com menor custo e maior agilidade.

Este artigo apresenta os resultados de dois trabalhados de Cazumbá (2024) e Castro (2024) aplicaram, respectivamente, abordagens técnicas e perceptivas para avaliação remota da acessibilidade. Ambas as metodologias mostraram-se eficazes e complementares. Com base nessas experiências, o projeto prevê, em etapa futura, a integração dessas abordagens em um modelo híbrido de avaliação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A acessibilidade urbana é um elemento fundamental para a inclusão social e a garantia do direito à cidade. Sua definição envolve a possibilidade de todas as pessoas, independentemente de suas condições físicas, sensoriais ou cognitivas, se deslocarem e usufruírem dos espaços urbanos de maneira segura, autônoma e confortável (Vasconcellos, 1999; Aguiar, 2010).

No campo da mobilidade ativa, o conceito de caminhabilidade tem ganhado destaque como métrica de qualidade dos espaços urbanos para o deslocamento a pé. De acordo com o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP, 2018), trata-se de uma medida da capacidade do ambiente urbano de promover e facilitar o deslocamento a pé, considerando fatores como segurança, conforto, acessibilidade e atratividade. Moura et al. (2017) sintetizam esse conceito nos "7Cs": conectividade, conveniência, conforto, convivialidade, consciência, coexistência e comprometimento.

Estudos como os de Bradshaw (1993) e Speck (2012) enfatizam que o ambiente urbano deve ser interessante, seguro, confortável e funcional para promover o deslocamento a pé. No contexto brasileiro, Ferrari de Lima et al. (2021) destacam a forte desigualdade territorial, onde áreas periféricas apresentam menor caminhabilidade e maior exposição a barreiras urbanas, o que reforça a necessidade de intervenções específicas para grupos vulneráveis, como idosos, crianças e pessoas com deficiência (Cruz et al., 2023).

Cazumba (2024) apoia-se nessas referências para adaptar o índice ICam 2.0, originalmente elaborado pelo ITDP, a uma abordagem remota com uso de imagens de nível de rua. Essa adaptação considera critérios técnicos como largura de calçada, rebaixamento de meio-fio, presença de rampas, continuidade do trajeto e percepção de segurança urbana.

Por sua vez, Castro (2024) fundamenta seu trabalho no Processo Analítico Hierárquico (AHP), proposto por Saaty (1980), e aplicado em diversas áreas para problemas de decisão multicritério (Barbosa, 2012; Lima et al., 2009). O método AHP permite capturar a percepção subjetiva dos usuários por meio de comparações entre pares de critérios, atribuindo pesos relativos que refletem a importância percebida de cada aspecto da acessibilidade.

A integração dessas abordagens — técnica e perceptiva — contribui para superar limitações metodológicas tradicionais que ignoram as experiências dos usuários e possibilita a construção de índices compostos mais representativos da realidade urbana. A literatura recente também aponta a importância de abordagens participativas e tecnológicas, como uso de Street View Images (SVI) e inteligência artificial, para ampliar a escala de análise e reduzir custos de avaliação presencial (Gunaydın e Tascioglu, 2021; Baiardi e Benatti, 2014; WHO, 2010).

3. METODOLOGIA

Este artigo adota como base metodológica os dois trabalhos de dissertação desenvolvidos no projeto de pesquisa, com objetivo de discutir suas contribuições e preparar o terreno para sua integração futura.

3.1 Estudo de Cazumbá (2024)

O estudo teve como objetivo adaptar o índice ICam 2.0 para a realização de auditorias remotas. A área de estudo escolhida foi o bairro da Barra, em Salvador-BA, caracterizado por intenso uso turístico e comercial. A metodologia utilizou 15 indicadores distribuídos em seis categorias principais: calçada, travessia, acessibilidade, segurança viária, segurança pública e ambiente urbano. A análise foi conduzida por meio de inspeções técnicas com base em imagens de nível de rua (SVI), possibilitando a identificação de falhas estruturais relevantes, como calçadas estreitas, ausência de rampas de acessibilidade e presença de mobiliário urbano obstrutivo. Os resultados demonstraram que a abordagem é eficaz para diagnósticos técnicos, apresentando potencial de replicação e baixo custo operacional.

3.2 Estudo de Castro (2024)

O estudo conduzido por Castro (2024) teve como objetivo propor uma metodologia perceptiva de avaliação da acessibilidade urbana com base no método Analytic Hierarchy Process (AHP). A pesquisa foi realizada no campus Federação da UFBA, onde se concentram rotas de circulação entre prédios acadêmicos. A metodologia utilizou cinco critérios principais: geometria da calçada, presença de obstáculos, equipamentos urbanos, travessias e áreas de estacionamento. O AHP foi aplicado com a participação de especialistas e usuários com deficiência, permitindo captar a importância relativa de cada critério a partir da percepção dos próprios usuários. Como resultado, foi construído um Índice de Acessibilidade Física (IAF), capaz de refletir a experiência vivida na utilização do espaço. A análise revelou a existência de barreiras relevantes mesmo em ambientes institucionais planejados, evidenciando a necessidade de estratégias mais sensíveis às demandas dos usuários.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A metodologia proposta por Cazumbá (2024) se mostrou eficaz para mapear criticidades da infraestrutura com precisão, mesmo sem inspeções presenciais. O uso de SVI permitiu verificar aspectos como degraus, buracos, sinalização e iluminação, indicando o potencial da abordagem para uso em auditorias técnicas periódicas de caminhabilidade.

Castro (2024) desenvolveu uma metodologia de vistoria virtual de acessibilidade física e microacessibilidade em ambientes universitários, com base na combinação entre o método AHP (Analytic Hierarchy Process) e o uso de imagens SVI. Foram definidos critérios como geometria da calçada, obstáculos, equipamentos urbanos, travessias e estacionamento. A atribuição de pesos pelo AHP foi realizada com o apoio de especialistas e pessoas com deficiência, valorizando a percepção do usuário na análise da acessibilidade. O resultado foi um índice perceptivo de acessibilidade física (IAF), capaz de refletir a experiência vivida no uso do espaço.
Os dados coletados mostraram que mesmo em ambientes institucionais, onde se espera maior adequação, há falhas significativas de acessibilidade, principalmente relacionadas à ausência de rampas adequadas, declividades excessivas e pisos irregulares.

Os dois estudos demonstram a eficácia do uso de imagens de nível de rua (Google Street View) associadas a métodos multicritério (ICam adaptado e AHP) na avaliação da acessibilidade urbana e universitária. No bairro da Barra, em Salvador, a metodologia proposta por Cazumba (2024) classificou a caminhabilidade geral como "suficiente" (nota 1,75), com ênfase em deficiências na pavimentação, largura das calçadas e ausência de rampas. Já no campus da UFBA, a abordagem de Castro (2025) revelou que nenhuma das três rotas avaliadas atende plenamente à NBR 9050/2020, com destaque para a precariedade da geometria das calçadas e travessias. Ambas as experiências reforçam o potencial das auditorias virtuais como alternativa de baixo custo, sistemática e escalável para diagnósticos e planejamento de acessibilidade.

5. PRÓXIMOS PASSOS: PROPOSTA DE INTEGRAÇÃO

A próxima etapa do projeto prevê o desenvolvimento e validação de uma abordagem híbrida de verificação e monitoramento remoto da acessibilidade urbana, unindo os aspectos técnicos objetivos e as percepções dos usuários em uma única estrutura avaliativa.

O modelo a ser proposto está sendo denominado de Índice Híbrido de Acessibilidade (IHA) e seguirá os seguintes passos:

5.1 Estruturação do Índice Híbrido

A estruturação do Índice Híbrido de Acessibilidade (IHA) seguirá uma sequência de procedimentos integrativos entre os dois estudos. Inicialmente, serão selecionados e harmonizados os critérios comuns às abordagens de Cazumbá (2024) e Castro (2024), como largura de calçada, presença de rampas, obstáculos, condições do piso, travessias e sinalização. Em seguida, os escores técnicos obtidos a partir do ICam adaptado e os pesos derivados do AHP serão normalizados para uma escala comum, possibilitando a agregação dos dados em um único modelo. A fusão das duas dimensões ocorrerá por meio de um modelo de ponderação composto, no qual os critérios técnicos e perceptivos receberão pesos diferenciados, considerando os perfis dos usuários avaliadores, como pessoas com deficiência, idosos e cuidadores. Por fim, será realizada uma aplicação piloto do IHA em uma rota urbana com função social relevante, utilizando imagens atualizadas do Google Street View como base para a inspeção remota.

5.2 Expansão da aplicação

Após a fase piloto, o Índice Híbrido de Acessibilidade (IHA) será aplicado em trechos urbanos com diferentes características — incluindo áreas residenciais, comerciais e institucionais — com o objetivo de testar sua versatilidade e abrangência. Essa aplicação permitirá a comparabilidade interterritorial entre bairros e cidades, facilitando a identificação de rotas prioritárias para intervenção com base em critérios técnicos e sociais. Além disso, os resultados serão representados por meio de mapas temáticos em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), fornecendo subsídios importantes para o planejamento urbano e para ações de fiscalização por parte de órgãos públicos.

5.3 Desenvolvimento de uma Plataforma Digital

Está prevista a criação de um protótipo de plataforma digital colaborativa, por meio da qual o Índice Híbrido de Acessibilidade (IHA) poderá ser aplicado, visualizado e atualizado por técnicos, pesquisadores e membros da sociedade civil. A ferramenta permitirá a inserção de dados e imagens auditadas remotamente, bem como a classificação automática das rotas avaliadas de acordo com seu nível de acessibilidade. Além disso, a plataforma contará com funcionalidades para atualização contínua das condições verificadas nas vias urbanas e disponibilização de relatórios técnicos por trecho ou por cidade, ampliando a transparência e o uso público das informações geradas.

5.4 Potencial de replicação

A proposta metodológica será desenvolvida com base em tecnologias livres e no uso de dados abertos, o que amplia seu potencial de replicação em diferentes contextos. Espera-se que a metodologia possa ser aplicada em outras cidades brasileiras, inclusive naquelas com baixa cobertura cadastral e institucional. Além disso, seu uso é viável em cidades de países em desenvolvimento que enfrentam desafios semelhantes relacionados à mobilidade e acessibilidade. A abordagem também poderá ser adaptada a ambientes urbanos específicos, como

áreas escolares, centros de saúde, unidades de atendimento ao cidadão, centros históricos e instituições universitárias, contribuindo para o planejamento inclusivo e o aprimoramento da infraestrutura em territórios socialmente diversos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou resultados parciais de um projeto de pesquisa em andamento que visa desenvolver metodologias escaláveis para avaliação remota da acessibilidade urbana em cidades brasileiras, com o uso de tecnologias de geoinformação e imagens de nível de rua (SVI). Os trabalhos de Cazumbá (2024) e Castro (2024), realizados no âmbito deste projeto, revelam abordagens metodológicas distintas e complementares: enquanto Cazumbá aplicou critérios técnicos derivados do índice ICam 2.0 (ITDP, 2018) para auditoria de infraestrutura urbana, Castro propôs uma avaliação perceptiva com base no método multicritério AHP (Saaty, 1980), incorporando a experiência de usuários reais.

Ambos os estudos demonstraram que a avaliação remota é uma estratégia viável, confiável e de baixo custo, com grande potencial de replicação. Cazumbá (2024) evidenciou falhas estruturais nas calçadas urbanas de Salvador, mesmo em áreas centrais, reforçando as críticas de Ferrari de Lima et al. (2021) e Cruz et al. (2023) sobre a desigualdade na distribuição da infraestrutura urbana. Por outro lado, Castro (2024) demonstrou que a percepção do usuário revela nuances que avaliações puramente técnicas tendem a ignorar — como obstáculos temporários, sensação de insegurança ou dificuldade de navegação — alinhando-se a autores como Vasconcellos (1999) e Moura et al. (2017), que defendem uma abordagem mais humanizada da mobilidade.

A proposta de construção de um Índice Híbrido de Acessibilidade (IHA) busca integrar essas duas dimensões — técnica e perceptiva — em uma métrica única e mais representativa da realidade urbana. Essa integração se alinha com a perspectiva defendida por Speck (2012), segundo a qual ambientes urbanos verdadeiramente caminháveis não se resumem a normas técnicas, mas precisam ser seguros, interessantes e confortáveis do ponto de vista de quem caminha. A utilização de imagens SVI, como destacado por Gunaydın e Tascioglu (2021), complementa esse esforço ao permitir inspeções remotas de alta escala, com potencial de atualização contínua e acompanhamento sistemático de rotas prioritárias.

O modelo híbrido previsto para a próxima etapa do projeto também dialoga com iniciativas de ciência cidadã e monitoramento participativo, como apontado por Baiardi e Benatti (2014), ao propor uma plataforma digital aberta para aplicação e atualização do índice por diferentes atores sociais.

Ao promover a convergência entre análise técnica padronizada e percepção de uso, o projeto contribui para uma abordagem mais holística da acessibilidade urbana. A proposta reforça o papel do Estado e das universidades no diagnóstico e planejamento de espaços urbanos mais justos, ao mesmo tempo em que oferece um instrumento concreto de apoio à tomada de decisão, com potencial de uso por órgãos públicos, conselhos de mobilidade e coletivos de pessoas com deficiência.

Agradecimentos

Este trabalho integra o projeto de pesquisa intitulado MapAccess “Mapeamento de informações geoespaciais remotas e colaborativas da acessibilidade universal urbana”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Edital Universal, Processo nº 405612/2023-0) do Grupo de Pesquisa em Informações Geoespaciais, com dissertações defendidas no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC) da UFBA onde foram desenvolvidas as dissertações.

REFERENCIAS

ABNT. NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

BAIARDI, A.; BENATTI, L. Acessibilidade urbana e mapeamento colaborativo: aplicação do OpenStreetMap em áreas de mobilidade reduzida. In: Anais do XVIII Encontro Nacional de Geógrafos. Vitória: AGB, 2014. p. 1–10.

BERLAND, A.; LANGE, D. A. Google Street View shows promise for virtual street tree surveys. Urban Forestry & Urban Greening, v. 21, p. 11–15, 2017.

BILJECKI, F.; ITO, K. Street view imagery in urban analytics and GIS: A review. Landscape and Urban Planning, v. 215, 104217, 2021.

BRADSHAW, R. Creating and using walkable environments. Transportation Research Record, v. 1400, p. 11–17, 1993.

CASTRO, T. S. Método de vistoria virtual da acessibilidade urbana através de imagens de nível de rua. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

CAZUMBÁ, D. M. Proposta de metodologia para o mapeamento virtual da caminhabilidade urbana associada à acessibilidade por imagens de nível de rua. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

CRUZ, C. S.; OLIVEIRA, E. G.; SANTOS, M. G. Caminhabilidade e desigualdade espacial: análise da infraestrutura de calçadas em bairros periféricos de Salvador (BA). Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 25, n. 2, p. 78–96, 2023.

FERRARI DE LIMA, K. C.; GOMES, J. R.; RIBEIRO, M. T. Mobilidade ativa e acessibilidade urbana: uma leitura crítica das desigualdades territoriais. Cadernos Metrópole, v. 23, n. 51, p. 289–311, 2021.

GUNAYDIN, B.; TASCIOGLU, M. Evaluation of walkability using street view imagery and deep learning: A case study of Istanbul. Computers, Environment and Urban Systems, v. 86, p. 101602, 2021.

HELBICH, M.; DANISH, M.; LABIB, S. M.; RICKER, B. To use or not to use proprietary street view images in (health and place) research? Health & Place, v. 87, 103244, 2024.

ITDP. Manual de avaliação da caminhabilidade – ICam 2.0. São Paulo: Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento, 2018.

MOURA, F.; CAMBRA, J.; GONÇALVES, C. Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method: A case study in Lisbon. Landscape and Urban Planning, v. 157, p. 282–296, 2017.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SPECK, J. Walkable City: How Downtown Can Save America, One Step at a Time. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2012.

VASCONCELLOS, E. A. Mobilidade urbana e cidadania: o desafio dos transportes no Brasil. São Paulo: Studio Nobel, 1999.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global Age-friendly Cities: A Guide. Geneva: WHO Press, 2010

Vivian de Oliveira Fernandes (vivian.fernandes@ufba.br)
UFBA, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (DETG). Rua Aristides Novis, 02 R. Prof. Aristídes Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, Brasil)

Thamille Silva Castro (thamcas@gmail.com)
UFBA, Escola Politécnica, Grupo de Pesquisa em Informações Geoespaciais. Rua Aristides Novis, 02 R. Prof. Aristides Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, Brasil)

Danielle Marques Cazumba (daniellecazumba25@gmail.com)
UFBA, Escola Politécnica, Grupo de Pesquisa em Informações Geoespaciais. Rua Aristides Novis, 02 R. Prof. Aristides Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, Brasil)

Jorge Ubirajara Pedreira Jr (jorge.ubirajara@ufba.br)
UFBA, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia (DETG). Rua Aristides Novis, 02 R. Prof. Aristides Novis, 2 - Federação, Salvador - BA, Brasil)

O QUE SAIU DO PAPEL? UMA ANÁLISE DO PLANO DIRETOR CICLOVIÁRIO DO RECIFE

Gustavo de Araújo Barros, Yara Cristina Labronici Baiardi
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este artigo avalia a implementação do Plano Diretor Cicloviário da Região Metropolitana do Recife (PDC/RMR) na cidade do Recife. Lançado em 2014 pelo governo de Pernambuco, o plano estabelecia diretrizes que norteiam as ações cicloviárias na região, com prazo de execução até 2024. A metodologia adotada consistiu na produção de tabelas comparativas e cartografias georreferenciadas, a fim de analisar a correspondência entre a malha cicloviária prevista e a existente, considerando extensão, traçado e tipologia. Os resultados indicam uma baixa taxa de congruência: apenas 9,5% da malha atual está em conformidade com o plano, enquanto 90,5% encontra-se fora do traçado previsto ou apresenta discrepâncias quanto à tipologia cicloviária. Diante desse cenário, conclui-se que, embora o PDC/RMR represente um avanço no planejamento da mobilidade por bicicleta, sua aplicação prática foi limitada, revelando descompassos entre o planejamento e a implementação de políticas públicas efetivas no Recife.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana é cada vez mais entendida como um fenômeno complexo, com abordagem centrada no indivíduo e suas interações socioeconômicas (Banister, 2008), o que levou à formulação do conceito de Mobilidade Segura e Sustentável (Instituto Cordial, 2023), utilizando-se de abordagens como os Sistemas Seguros de Mobilidade e Visão Zero (OECD/ITF, 2008). Nesse contexto, que integra sustentabilidade ambiental, social e econômica à segurança viária, a mobilidade por bicicleta ganha destaque, alinhando-se às atuais demandas ecológicas e sanitárias, por ser um um meio de transporte de baixo custo, capaz de ampliar o acesso da população às oportunidades de trabalho, lazer, equipamentos públicos e serviços, além de benefícios à saúde pública e qualidade ambiental (ITDP, 2017).

Estudos apontam a malha cicloviária como fator central para o uso da bicicleta nas cidades (Batalha e Portugal, 2019), na qual se percebe uma relação direta entre a implantação de facilidades ao ciclista e o aumento no número de viagens por bicicleta. A partir disso, a malha cicloviária deve seguir os princípios da coerência, atratividade, segurança, conforto e integrações com outros meios de transporte (CROW, 2017), devendo formar uma rede coesa e segura, conectada à hierarquia viária e com prioridade em vias arteriais, desde que acompanhadas de medidas de proteção ao ciclista (WRI, 2021; CROW, 2017).

No Recife, o Plano Diretor Cicloviário da Região Metropolitana (PDC/RMR), criado em 2014 com vigência até 2024, foi o principal instrumento de política cicloviária, prevendo 591 km de malha para a RMR, sendo 249,2 km destinados ao Recife.Contudo, em 2024, a cidade apresenta aumento de 37% nos sinistros fatais entre 2022 e 2023 (CTTU, 2024) e uma sequência de mortes de ciclistas entre o segundo semestre de 2024 e o primeiro de 2025 (Jornal do Comércio, 2025), o que levanta questionamentos sobre a efetividade da malha cicloviária existente e da execução do PDC/RMR.Diante disso, este artigo tem como objetivo avaliar a implementação do PDC/RMR no Recife, comparando a malha existente com a proposta no plano quanto à extensão, traçado e tipologia (ciclovia, ciclofaixa e ciclorrota).

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As bases de dados utilizadas neste estudo são: 1) a malha cicloviária existente no Recife (versão atualizada de outubro de 2024, a partir dos Dados Abertos do Recife) e 2) a malha cicloviária definida no Plano Diretor Cicloviário da Região Metropolitana do Recife (PDC/RMR) para o município do Recife, conforme levantamento do Instituto da Cidade Pelópidas Silveira.

A análise realizada neste estudo está dividida em três seções, que progressivamente adicionam maior rigor à avaliação da implementação do PDC/RMR, sendo elas 1) *Análise por extensão total:* Comparação direta entre as malhas cicloviárias existente e prevista; 2)*Análise por traçado da malha cicloviária:* Sobreposição das bases georreferenciadas das malhas cicloviárias resultando em uma camada de intersecção que indica os trechos da malha existente que coincidem com o traçado proposto pelo PDC/RMR e 3) *Análise por tipologia cicloviária:* Com base na camada gerada na etapa anterior, a análise busca identificar, entre os trechos espacialmente compatíveis com o PDC/RMR, aqueles que apresentam concordância com a tipologia cicloviária prevista e aqueles que apresentam discrepância quanto à tipologia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise por extensão total

No município do Recife, o qual este estudo limita sua análise, o PDC/RMR estabelece uma rede cicloviária total de 249,2 km, apresentando divisão tipológica onde a tipologia *ciclovia* soma 226,6 km (90,93%) da malha total, *ciclofaixa* com 4,2 km (2,35%) e *ciclorrota* com 18,4 km (7,38%). A *alta proeminência da tipologia de ciclovia é justificada no documento do plano*, onde é posto que a tipologia ciclofaixa deve ser evitada, pois "trata-se de espaço para bicicletas com baixo nível de segregação em relação ao tráfego lindeiro"(Pernambuco, 2014, p. 211), enquanto a tipologia de ciclorrota é posta como "caminhos, com ou sem sinalização, que representam uma rota recomendada para o ciclista (...) sendo um espaço compartilhado com os veículos automotores. Representa, efetivamente, um trajeto (Pernambuco, 2014, p.172, grifo nosso). Já a tipologia de ciclovia é definida enquanto "estruturas totalmente segregadas do tráfego motorizado, sendo a via de maior nível de segurança e conforto para os ciclistas." (Pernambuco, 2014, p.172).

Os resultados do implantando evidenciam que a malha cicloviária no Recife atualmente soma 202,95 km, sendo 29,3 km (14,4%) de ciclovias, 117,8 km (58,1%) de ciclofaixas, 49,2 km (24,2%) de ciclorrotas e 6,53 km (3,2%) de áreas compartilhadas com pedestres.

A tabela 1 faz a comparação da extensão entre estas duas malhas e apresenta relação percentual entre a malha existente e a malha do PDC/RMR.

Tabela 1: Comparação entre extensão da malha cicloviária existente e prevista no PDC/RMR no Recife por tipologia

Tipologia	Previsto (km)	Existente (km)	Relação entre extensão existente e prevista (%)
Ciclovia	226,6	29,3	12,9%
Ciclofaixa	4,2	117,8	2804,8%
Ciclorrota	18,4	49,2	267,4%
Área compartilhada	-	6,53	-
Total	249,2	202,95	81,4%

Fonte: Produção própria, 2025, baseada em Pernambuco, 2014 e Dados Abertos do Recife, 2024

Destaca-se, como discrepância de maior grau, *a diferença de 28 vezes mais quilômetros de ciclofaixa na malha atual do que no definido no PDC/RMR*, descumprindo com o preceito estabelecido no plano que se deve evitar a instalação desta tipologia. Em situação oposta, as ciclovias representam a menor parte da malha cicloviária atual com menos de 15% de sua quilometragem coberta. Para a comparação da quilometragem da malha total do PDC/RMR no Recife, percebe-se que a malha cicloviária existente apresenta uma diferença de 46,25 km, conformando assim que o PDC/RMR finalizou sua vigência com ainda 18,6% de sua quilometragem pendente.

A *alta discrepância de quilometragem entre as tipologias* levanta suspeitas de que as quilometragens por tipologia existente não foram instaladas de acordo com o definido no PDC/RMR, configurando discrepâncias tipológicas (por exemplo, uma ciclofaixa em uma via na qual o PDC/RMR estabelece uma ciclovia), tópico que será explorado na seção "Análise por tipologia cicloviária" deste estudo.

3.2. Análise por traçado da malha cicloviária

A partir de geoprocessamento, foi possível estabelecer uma relação em quilômetros entre o traçado da malha cicloviária existente e da malha do PDC/RMR para o Recife, *podendo assim entender o quanto o traçado atual segue o traçado definido no plano***.** Nisto, chega-se ao resultado que dos 202,95 km da malha cicloviária existente no Recife, *96,9 km coincidem espacialmente com a malha cicloviária definida no plano,* representando 38,9% do total de 249,2 km do plano, enquanto 106,5 km da malha existente encontram-se em desacordo com o plano.

Desta forma, o PDC/RMR encerrou seus 10 anos de vigência com um total de 152,3 km do seu traçado pendente de implementação, *representando 61,1% da malha definida no plano*. A tabela 2 sintetiza estas informações, enquanto a figura 1 apresenta a distribuição das malhas cicloviárias no território.

Tabela 2: Comparação quilométrica entre os traçados da malha cicloviária existente e traçado da malha cicloviária definida no PDC/RMR no Recife

Malha cicloviária	Extensão (km)	% em relação ao PDC/RMR
PDC/RMR	249,2	100%
Malha existente	202,95	-
Malha existente de acordo com o traçado do PDC/RMR	96,9	38,9%
Malha existente em desacordo com o traçado do PDC/RMR	106,05	-
Malha atual fora do traçado do PDC/RMR	152,3	61,1%

Fonte: Produção própria, 2025, baseada em Pernambuco, 2014 e Dados Abertos do Recife, 2024

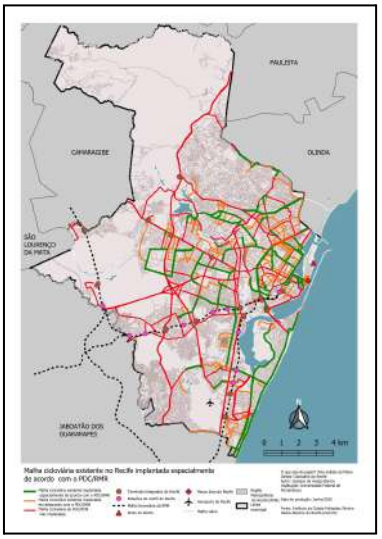


Figura 1: Malha cicloviária existente no Recife implantada espacialmente de acordo com o PDC/RMR, onde a cor vermelha é a malha do PDC/RMR nunca implantada, a cor verde é a malha existente implantada de acordo com o plano e em laranja a malha existente implantada em desacordo com o plano
Fonte: Produção própria, 2025, baseada em Pernambuco, 2014 e Dados Abertos do Recife, 2024

Nota-se como grandes corredores, mesmo que com estrutura prevista no PDC/RMR, em sua maioria não possuem estrutura, com destaque para a Av. Caxangá, BR/101 e BR/202, Av. Recife e Av. Abdias de Carvalho, sendo as exceções desta questão a Av. Agamenon Magalhães, Av. Boa Viagem, Rua Prof. João de Medeiros e Via Mangue.

3.3. Análise por tipologia cicloviária

Esta seção tem por objetivo investigar a possibilidade levantada anteriormente de que a implementação do PDC/RMR no Recife tenha sido feita com discrepâncias tipológicas. Para isso, a análise se deteve apenas entre os 96,9 km da malha cicloviária existente que foram implementados espacialmente de acordo com o plano, onde foi feita uma comparação de como ela é tipologicamente distribuída na atualidade e como é sua distribuição tipológica no PDC/RMR.

Desta forma, a tabela 3 adiciona o crivo da concordância e discrepância tipológica dentro da extensão analisada *apenas 23,8 km da malha existente possuem concordância tipológica, o que representa 9,5% dos 249,2 km do PDC/RMR***,** enquanto se tem 71,9 km de estruturas que divergem tipologicamente do plano. A tabela 4, por sua vez, levanta os tipos de discrepância tipológica (do plano para o existente), suas extensões aproximadas e a indicação de cor na figura 2, que traz a distribuição das discrepâncias no território, onde os

trechos com concordância tipológica estão em verde claro, a malha do PDC/RMR nunca implementada em tracejado vermelho e a malha existente fora do traçado do PDC/RMR, em tracejado amarelo.

Tabela 3: Comparação quilométrica e percentual entre os traçados da malha cicloviária existente e traçado da malha cicloviária definida no PDC/RMR no Recife, com destaque para concordância ou discrepância tipológica da malha

Malha cicloviária	Extensão (km)	% em relação ao PDC/RMR
PDC/RMR	249,2	100%
Malha existente	202,95	-
Malha existente de acordo com o traçado do PDC/RMR	96,9	38,9%
↳ • Concordância tipológica	23,8	9,5%
↳ • Discrepância tipológica	73,1	29,4%
Malha existente em desacordo com o traçado do PDC/RMR	106,05	-
Malha atual fora do traçado do PDC/RMR	152,3	61,1%

Fonte: Produção própria, 2025, baseada em Pernambuco, 2014 e Dados Abertos do Recife, 2024

Tabela 4: Extensão das discrepâncias tipológicas entre o PDC/RMR e a malha cicloviária existente no Recife

Discrepância tipológica ("PDC/RMR" para "Existente")	Extensão (km)	Cor na figura 2
Ciclovia para ciclofaixa	55,5	Roxo escuro
Ciclovia para ciclorrota	11	Ciano
Ciclovia para área compartilhada	2,5	Cinza escuro
Ciclofaixa para ciclovia	1,3	Laranja
Ciclofaixa para ciclorrota	0,1	Rosa
Ciclorrota para ciclofaixa	2,7	Verde escuro
Total	73,1	-

Fonte: Produção própria, 2025, baseada em Pernambuco, 2014 e Dados Abertos do Recife, 2024

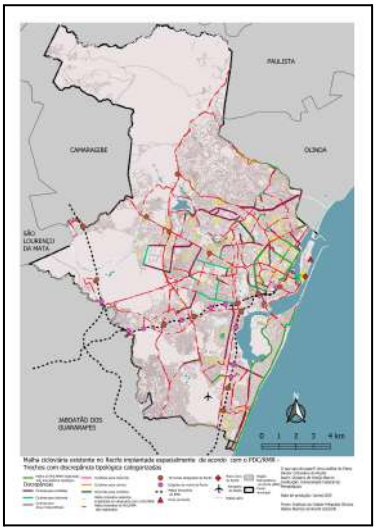


Figura 2: Malha cicloviária existente no Recife implantada espacialmente de acordo com o PDC/RMR - Trechos com discrepâncias tipológicas categorizadas
Fonte: Produção própria, 2025, baseada em Pernambuco, 2014 e Dados Abertos do Recife, 2024

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira análise comparou diretamente as quilometragens total e por tipologia entre a malha existente e o PDC/RMR. Verificou-se que, após 10 anos, apenas 81,4% dos 249,2 km previstos foram implantados no Recife, com grandes discrepâncias tipológicas.

Na segunda etapa, analisou-se a distribuição territorial da malha, sobrepondo o traçado do PDC/RMR à malha existente. Identificou-se uma intersecção de 96,9 km (38,9%), enquanto a maior parte da malha atual (106,05 km) foi construída fora do traçado definido.

A terceira análise apontou que 9,5% (23,8 km) da malha existente segue o plano em localização e tipologia. Outros 73,1 km (29,4%) coincidem em localização, mas divergem em tipologia — sendo a substituição de ciclovias por ciclofaixas (55,5 km), mesmo contraindicado pelo PDC, a principal discrepância.

Os resultados mostram que, apesar de a literatura apontar as vias arteriais como prioritárias devido ao maior risco, a implantação dessas vias foi baixa mesmo após uma década de execução do PDC.

Conclui-se que o PDC/RMR foi amplamente descumprido: apenas 9,5% da malha implantada está em conformidade plena, enquanto 90,5% apresentam desvios de traçado ou tipologia, contrariando as diretrizes do plano. Diante disso, é difícil vislumbrar melhorias na segurança viária que incentivem novos usuários. Para pesquisas futuras, recomenda-se avaliar outros objetivos do PDC, contribuindo para a revisão e elaboração de políticas públicas voltadas à mobilidade ativa no Recife.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batalha, Y. e L. Portugal (2019) Os fatores intervenientes no uso da bicicleta: uma revisão a partir da mobilidade sustentável. In Anais do XXXIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Engenharia de Transportes. ANPET. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337608655_os_fatores_intervenientes_no_uso_da_bicicleta_uma_revisao_a_partir_da_mobilidade_sustentavel (acesso em 29/06/2025).

Crow (2017) Design manual for bicycle traffic. Ede: Crow. Disponível em: https://crowplatform.com/product/design-manual-for-bicycle-traffic/ (acesso em 07/05/2025).

Instituto Cordial (2023) Mapa do universo temático da mobilidade segura e sustentável no Brasil: ciclo 2022/2023. Working Paper. São Paulo: Instituto Cordial.

Instituto da Cidade Pelópidas Silveira (ICPS) (2025) Base de dados. Recife, PE: ICPS. Disponível em: https://web.archive.org/web/20250117122926/http://icps.recife.pe.gov.br/node/61205 (acesso em 22/06/2025).

Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP Brasil) (2017) Guia de planejamento cicloinclusivo. Rio de Janeiro: ITDP. Disponível em: https://itdpbrasil.org/publication/guia-de-planejamento-cicloinclusivo/ (acesso em 07/05/2025).

OECD/ITF – Organisation for Economic Co-operation and Development / International Transport Forum (2008) Towards zero: ambitious road safety targets and the Safe System approach. Paris: OECD.

Pernambuco. Secretaria das Cidades (2014) Plano diretor cicloviário da Região Metropolitana do Recife. Recife: Governo do Estado de Pernambuco.

Recife (s.d.) Malha cicloviária do Recife: ciclovias, ciclofaixas e ciclorrotas (dados georreferenciados). Portal de Dados Abertos da Prefeitura do Recife. Disponível em: http://dados.recife.pe.gov.br/ne/dataset/malha-cicloviaria-do-recife/resource/a76b2f7a-1431-4db6-ac13-d4c6afd43d01 (acesso em 22/06/2025).

Recife. Autarquia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife (CTTU) (2025) Relatório anual de segurança viária com dados de 2023. Recife: CTTU. Disponível em: https://cttu.recife.pe.gov.br/relatorios-anuais-de-seguranca-viaria (acesso em 09/06/2025).

Soares, R. (2025) Mortes no trânsito: mais um ciclista é atropelado e morto no Recife. Jornal do Commercio, Recife, 25 abr. 2025. Disponível em: https://jc.uol.com.br/colunas/mobilidade/2025/04/25/mortes-no-transito-mais-um-ciclista-e-atropelado-e-morto-no-recife-e-a-oitava-morte-da-capital-em-sete-meses.html (acesso em 18/05/2025).

WRI Brasil (2020) Princípios para o desenho de ciclovias seguras: atendendo às necessidades para o uso da bicicleta nas cidades durante e depois da Covid-19. Washington, DC: WRI Brasil. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/2022-08/WRI_Principios-Ciclovias-Regras_2022.pdf (acesso em 07/05/2025).

Gustavo de Araújo Barros (gustavo.araujobarros@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Av. da Arquitetura, s/n - Campus Universitário, Centro de Artes e Comunicação (CAC) - Cidade Universitária. Recife (PE)
Yara Cristina Labronici Baiardi (yara.baiardi@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Av. da Arquitetura, s/n - Campus Universitário, Centro de Artes e Comunicação (CAC) - Cidade Universitária. Recife (PE)

PAPEL DA BICICLETA NA PROMOÇÃO DA MICROACESSIBILIDADE DO CAMPUS USP CAPITAL BUTANTÃ

Antônio de Paiva Fagundes Neto, Giovana Vasques Luciano, Maria Gabriela Batista, Aída P. Pontes de Aquino, Mateus Humberto
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo avalia o papel da bicicleta na melhoria da microacessibilidade dentro do Campus USP Capital Butantã, com base em dados de deslocamento real em bicicletas compartilhadas, registros de uso dos Restaurantes Universitários (RUs) e percepções da comunidade universitária. Foram utilizadas bases de dados da Tembici (bicicletas compartilhadas), acessos aos Restaurantes Universitários e fichas das oficinas participativas realizadas no âmbito da elaboração do Plano Diretor em 2024. A análise integrou técnicas quantitativas (mapas de calor, clusterização de trajetos, comparação modal) e qualitativas (análise de conteúdo). Os resultados apontam que a bicicleta oferece um tempo de deslocamento competitivo em relação ao carro e é muito superior à caminhada, sendo uma alternativa eficiente e sustentável para viagens intracampus. A análise qualitativa reforça a demanda por melhorias na infraestrutura cicloviária, segurança viária e acessibilidade. Os resultados dessa pesquisa foram utilizados como insumos para a construção de propostas do Plano Diretor USP Capital Butantã aprovado em 2025.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana é um dos principais desafios enfrentados pelas cidades brasileiras, especialmente em ambientes universitários que concentram grande fluxo diário de pessoas. Nesse contexto, o uso da bicicleta tem ganhado destaque como meio de transporte sustentável, eficiente e acessível. Além de contribuir para a redução da emissão de poluentes, a bicicleta demanda menor espaço viário e oferece maior flexibilidade nos deslocamentos cotidianos. O Campus da Universidade de São Paulo (USP) no Butantã, em São Paulo, abriga cerca de 70 mil pessoas diariamente e possui infraestrutura ainda fortemente voltada ao transporte motorizado individual. Apesar disso, há esforços crescentes para a promoção da mobilidade ativa.

Um dos esforços mais contundentes para a criação de novas diretrizes focadas em mobilidade dentro do Campus foi a elaboração de um Plano Diretor Participativo, o qual propõe uma abordagem ampla e integrada, com o objetivo de atender demandas, abrangendo diferentes áreas como patrimônio, áreas verdes, convivência e, notadamente, mobilidade. A metodologia adotada para a elaboração do Plano Diretor foi composta por três partes principais: leitura crítica, proposta e finalização, a qual é apoiada em todas as etapas por dados e por participação qualitativa da comunidade universitária.

Esta pesquisa surge como uma complementação ao estudo realizado para o Plano Diretor 2024, oferecendo um suporte adicional às propostas formuladas, especialmente no que diz respeito ao transporte de bicicletas do Campus. A abordagem adotada aqui fortaleceu as discussões tanto na fase da leitura crítica, agregando novos dados e análises, quanto na fase de propostas, contribuindo para a implementação de propostas de mobilidade mais eficazes.

Este artigo busca avaliar o papel da bicicleta na promoção da microacessibilidade no Campus a partir de quatro eixos: revisão bibliográfica e estudo de casos de Plano Diretores em ambientes universitários, o uso real das bicicletas compartilhadas da Tembici, os padrões de deslocamento observados nos acessos aos Restaurantes Universitários (RUs) e dados qualitativos coletados a partir da percepção da comunidade universitária obtida nas oficinas participativas. O objetivo é apresentar o estudo realizado que subsidiou a equipe técnica do Plano Diretor 2024 com análises e propostas de intervenções estruturais para ampliação do uso da bicicleta, contribuindo para uma mobilidade mais integrada, segura e eficiente.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

Universidades ao redor do mundo têm promovido a mobilidade ativa como resposta às questões de sustentabilidade e acessibilidade. A Universidade de Brasília (UnB) apresenta uma abordagem focada na promoção da mobilidade cicloviária dentro do Campus, tratando de ações para a promoção do uso da bicicleta, como a criação do Coletivo Bicicleta Livre em 2007, a implantação da malha cicloviária e do sistema de bicicletas compartilhadas gratuitas, além de posteriores análises dos componentes do sistema cicloviário que trouxeram visibilidade de quais eram os principais pontos de melhoria (Universidade de

Brasília, 2023).

A mobilidade ativa é um dos focos do Plano Diretor Integrado de 2021–2031 do Campus Zeferino Vaz. As diretrizes de mobilidade e acessibilidade urbana da Unicamp incluem ações estratégicas para melhorar e expandir a infraestrutura cicloviária no campus, como ciclofaixas, bicicletários, paraciclos e vestiários. Entre as metas estabelecidas estão também o planejamento de um sistema de compartilhamento de bicicletas e a redução da dependência de veículos motorizados. O plano contempla ainda o aumento da integração entre modos de transporte, o estímulo ao uso do transporte público e a diminuição das áreas de estacionamento ao longo das vias (Universidade de Campinas, 2021).

O Plano Diretor de Infraestrutura do Campus São Paulo da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) envolve um diagnóstico sobre a situação atual do Campus e avalia a relação dessas infraestruturas com os imóveis do Campus localizados na Vila Clementino e em Santo Amaro, além de suas conexões com outros modos de transporte da cidade de São Paulo. Nesse caso, há um grande foco na intermodalidade, propondo bicicletários junto a terminais de transporte e o estudo da implementação de um sistema próprio de compartilhamento (Universidade Federal de São Paulo, 2020).

Estudos como o de Mateo-Babiano (2020) mostram que fatores como infraestrutura segura, possibilidade de estacionamento, manutenção das bicicletas e disponibilidade gratuita influenciam fortemente a escolha pelo transporte ativo. No Brasil, o uso da bicicleta ainda enfrenta barreiras, com a falta de planejamento para desenvolvimento de infraestrutura cicloviária adequada, segura e confortável, assim como a implementação de outras políticas de incentivo, a exemplo de campanhas educativas eficientes. Pesquisas apontam que a infraestrutura bem planejada tem papel fundamental na adesão de grupos vulneráveis, como mulheres e pessoas de baixa renda (Benedini *et al.*, 2020).

3. MÉTODO

Foram utilizadas três bases de dados principais: (1) dados GPS e de viagens da Tembici realizadas dentro do Campus USP Capital Butantã entre maio de 2022 e abril de 2023; (2) registros por usuário de entrada nos quatro RUs presentes no Campus entre fevereiro e abril de 2024; (3) 55 fichas qualitativas resultantes das oficinas participativas realizadas no âmbito da elaboração do Plano Diretor.

Para as análises quantitativas, primeiramente, foi realizada uma análise dos dados da Tembici, que apresentou uma perspectiva do comportamento atual das viagens intracampus por bicicletas compartilhadas. Esse dado foi adotado como o comportamento dos ciclistas para o fim desta pesquisa. Além disso, foi realizada uma análise dos dados de entrada nos RUs, que traz a perspectiva de como é a locomoção dos usuários do Campus no horário das refeições, considerando que cada usuário sai do seu instituto e se dirige a um dos quatro Restaurantes Universitários e volta ao seu instituto. Esse dado ofereceu uma perspectiva de como é o comportamento dos pedestres nos horários de funcionamento dos RUs - provavelmente o de maior concentração de circulação intracampus.

Ambas as análises incluíram filtragens por localização e dia útil, georreferenciamento de trajetos (QGIS), cálculo de fluxos e densidades. A partir dos resultados de densidade em cada via do Campus, foi realizada a aplicação do algoritmo K-means para clusterização dos caminhos, com ajustes manuais para melhor visualização. O número ideal foi o de quatro clusters. A escolha desse número foi apoiada pelo Método do Cotovelo, que identifica o ponto de inflexão na curva de redução da variabilidade intra-grupo. Esse ponto indicou que quatro clusters representavam a solução mais adequada, equilibrando simplicidade e capacidade explicativa.

Os quatro clusters são: 1) Caminhos de baixa frequência para pedestres/ciclistas; 2) Caminhos de alta frequência para pedestres/ciclistas; 3) Caminhos de alta frequência para pedestres e baixa para ciclistas; e 4) Caminhos de alta frequência para ciclistas e baixa para pedestres.

Esse método trouxe uma visão comparativa entre as vias e quais eram aquelas que havia maior demanda por cada modo de transporte entre “bicicleta” e “a pé”, o que foi de grande valia para comparação com a infraestrutura existente em cada trecho e formas de melhoria.

Em relação às análises qualitativas, as 55 fichas foram processadas com técnicas de análise de conteúdo, filtragem daqueles que diziam respeito a transporte por meio de bicicleta, extração de palavras-chave e agrupamento temático. Através desse processo, é possível visualizar quais são os temas mais latentes perante a comunidade e trazer a participação dela para as análises a partir de dados.

4. RESULTADOS

Os dados, ao serem tratados e georreferenciados, trouxeram grande visibilidade em relação ao fluxo de cada uma das vias e quais eram os pontos de maior demanda dentro da cidade universitária (Figura 1). Vias arteriais foram as mais solicitadas em ambos os casos, sendo a Avenida Professor Luciano Gualberto, que é a via central do campus, a mais demandada. Contudo, vias informais e menores também tiveram densidade considerável, o que ocorre devido a facilidade de acesso entre institutos por essas vias.

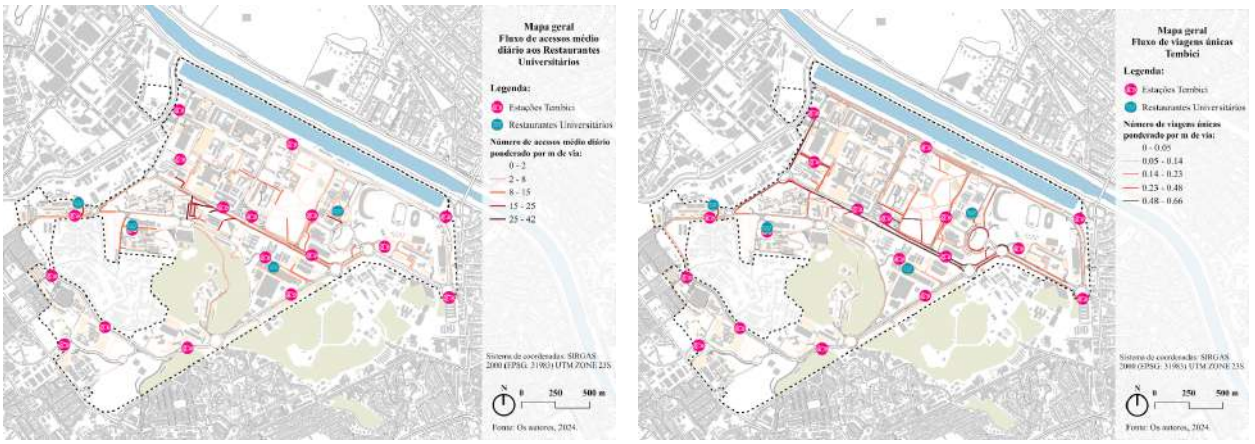


Figura 1: Fluxo de acessos médio ponderado por m linear de via considerando o acesso aos Restaurantes Universitários (esquerda) e a utilização atual de bicicletas compartilhadas (direita)

A partir da densidade das vias em cada um dos modos de transporte, foi possível segmentá-las dentro dos quatro *clusters*, os quais foram distribuídos em seus respectivos de acordo com a densidade comparada (Figura 2). A clusterização permitiu classificar os caminhos em quatro tipos, revelando vias prioritárias para intervenções. Foi possível observar que as principais vias com alta demanda de ciclistas e pedestres (no mapa marcados pela cor laranja) são principalmente as vias informais e que possuem menos infraestrutura, como travessas e acessos na Praça do Relógio.

A classificação de caminhos permite identificar pontos de demanda reprimida e infraestrutura subutilizada. Embora existam ciclovias e vias dedicadas ao uso de bicicletas, muitos desses trechos não são explorados em seu potencial máximo. Por outro lado, há trajetos que, embora não contenham infraestrutura formal, como ciclovias ou faixas exclusivas, são intensamente utilizados, sugerindo uma demanda por melhores condições de acessibilidade e de segurança. Esses resultados trouxeram pontos de atenção para a equipe técnica do Plano Diretor USP Capital Butantã, a qual teve clareza do quão comum é a conexão entre unidades por meio das vias informais. A partir disso, uma das propostas trazidas foi a melhoria das respectivas vias, como aumento de largura das calçadas e desenho de ciclovias em parte dos trechos.

Quando comparados com os resultados da análise qualitativa (Figura 3), os principais problemas citados relacionado à bicicleta foram: baixa disponibilidade de bicicletas, falta de ciclovias seguras e contínuas, inexistência de bicicletários e desejo de gratuidade no uso de bicicletas e serviços relacionados.

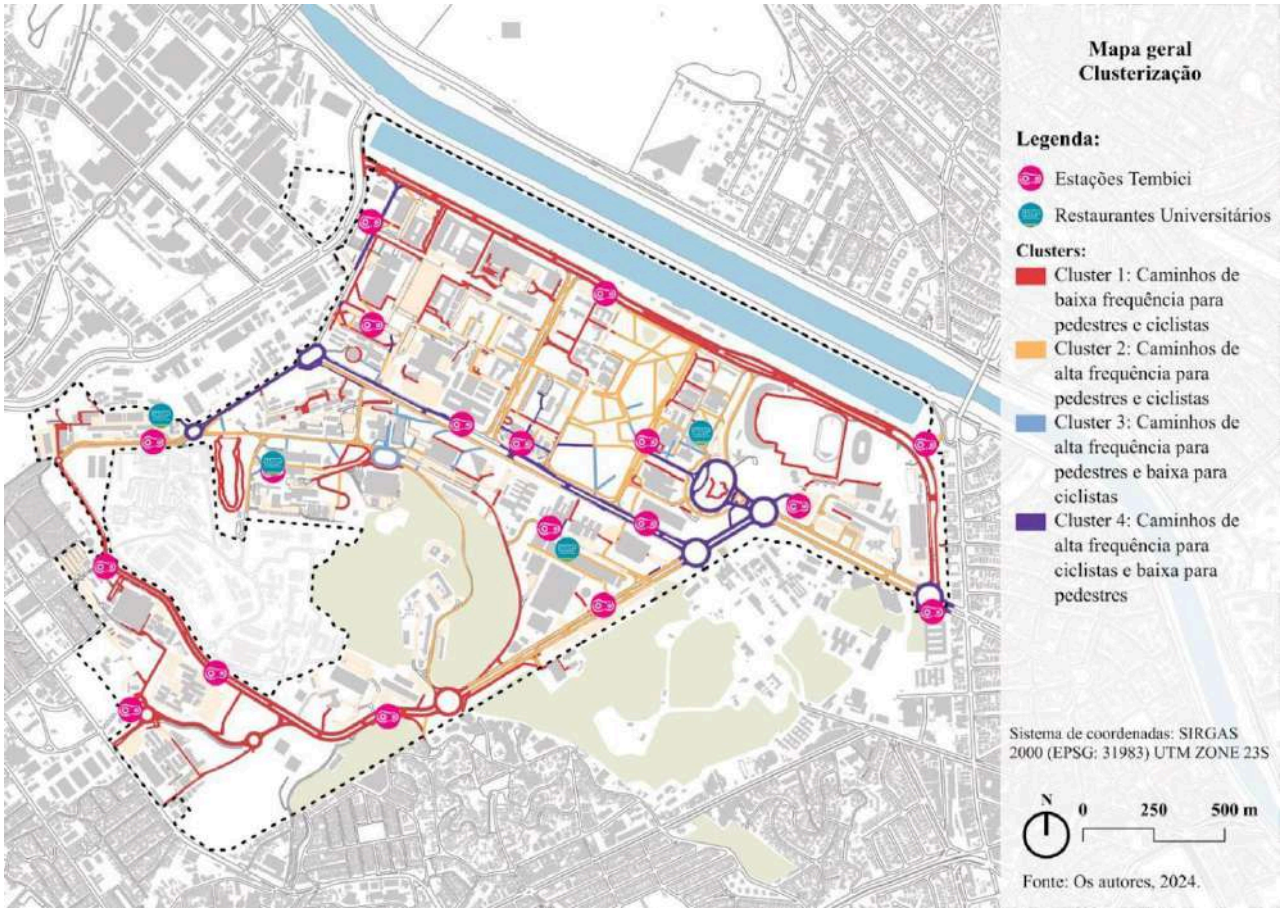


Figura 2: Vias do Campus de acordo com os seus respectivos *Clusters*

Com essa análise, foi possível identificar que a comunidade acadêmica se mostra favorável ao uso da bicicleta, desde que as condições estruturais sejam melhoradas. Esse resultado vai ao encontro com a análise quantitativa, pois há trajetos que, embora não contem com infraestrutura formal, como ciclovias ou faixas exclusivas, são intensamente utilizados.

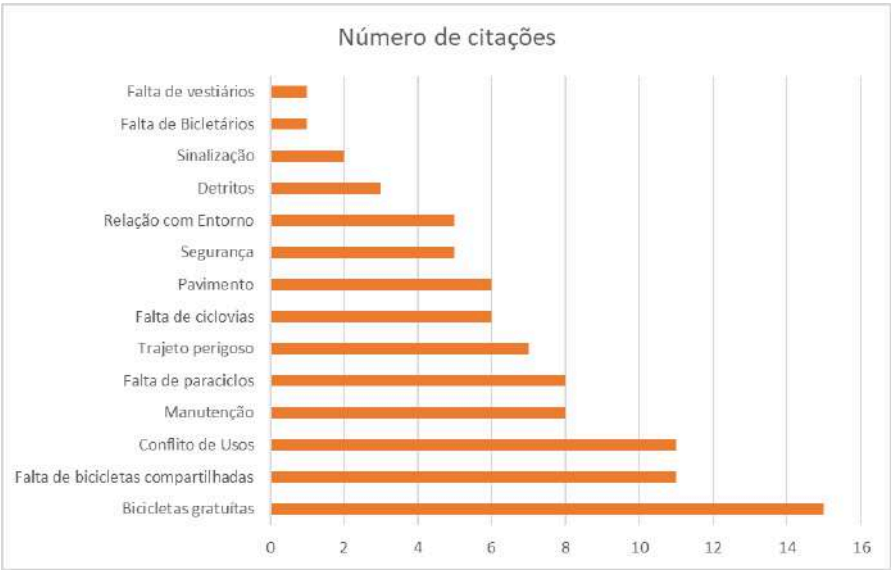


Figura 3: Problemas relacionados à bicicleta conforme o número de fichas das cinco oficinas participativas referentes à Fase 1 do Plano Diretor do Campus USP Capital Butantã

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados fornecem um ponto de partida sólido para o desenvolvimento de políticas que incentivem a mobilidade ativa focada em bicicleta dentro do Campus USP Butantã. O aperfeiçoamento dos métodos de coleta e a inclusão de novas variáveis poderão tornar futuras pesquisas mais robustas e abrangentes, contribuindo para um planejamento mais eficiente da infraestrutura de mobilidade ativa e para uma melhor compreensão das dinâmicas de microacessibilidade no ambiente universitário. É importante citar algumas limitações importantes em relação ao uso dos registros de entrada nos Restaurantes Universitários como estimativa dos deslocamentos a pé, uma vez que esses dados não captam variações de trajetos ou modos de transporte estimados, podendo gerar uma simplificação excessiva do comportamento real dos usuários.

A bicicleta é um modo de transporte promissor para o Campus USP Butantã, combinando agilidade e facilidade de acesso. O cruzamento de dados quantitativos e qualitativos aponta para a necessidade de ampliação da infraestrutura cicloviária e de incentivo à sua utilização, seja por meio de subsídio ao uso de bicicletas compartilhadas ou por melhorias em segurança viária, sinalização, manutenção e integração com outros modos. A experiência de outras universidades mostra caminhos viáveis e bem-sucedidos.

A continuidade dessa pesquisa, aliada ao aprimoramento de metodologias e à inclusão de novas variáveis, poderá contribuir para uma infraestrutura cicloviária mais eficiente e uma microacessibilidade mais integrada no Campus USP Capital Butantã, contribuindo para o dia a dia da comunidade universitária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benedini, D. J.; P. S. Lavieri e O. Strambi (2019) Understanding the use of private and shared bicycles in large emerging cities: The case of Sao Paulo, Brazil. *Case Studies on Transport Policy*, n. 8, p. 564–575. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.11.009

Mateo-Babiano, I.; N. M. C. Tiglao; K. A. Mayuga; M. A. Mercado e R. C. Abis (2020) How can universities in emerging economies support a more thriving cycling culture? *Transportation Research Part D*, n. 86, p. 1–12. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102444

PUSP; Scipopulis (2023) *Pesquisa de Mobilidade Campus USP da Capital*. São Paulo: USP.

Ribeiro, P.; F. Fonseca e T. Meireles (2024) *Relatório Técnico do GT Mobilidade*. In PDCB (Plano Diretor Campus Butantã).

Universidade de Brasília (2023) *Relatórios e Estudos do Plano Diretor do Campus Darcy Ribeiro*. Brasília: UNB.

Universidade de São Paulo (2024) *Plano Diretor do Campus USP Capital-Butantã: Consolidação de Proposta*. Disponível em: https://planodiretor.cb.usp.br/fase-3-consolidacao/ (acesso em 25/10/2024).

Universidade de São Paulo (2024) *Plano Diretor USP: Grupo de Trabalho de Mobilidade*. São Paulo: USP. Disponível em: https://planodiretor.cb.usp.br/gt-mobilidade-2/ (acesso em 20/10/2024).

Universidade Estadual de Campinas (2021) *Plano Diretor Integrado da Unicamp*. Campinas: UNICAMP. Disponível em: https://depi.unicamp.br/planejamento-territorial-plant/plano-diretor/ (acesso em 22/10/2024).

Universidade Federal de São Paulo (2020) *PDINFRA – Plano Diretor de Infraestrutura do Campus São Paulo*. São Paulo: Universidade Federal de São Paulo. Disponível em: https://sp.unifesp.br/epm/camaragrad/institucional/pdinfra-documentos-finais (acesso em 20/10/2024).

Antônio de Paiva Fagundes Neto (antoniopaivafneto@gmail.com)
Giovana Vasques Luciano (giovanavluciano@gmail.com)
Maria Gabriela Batista (mgabbat@gmail.com)
Aída P. Pontes de Aquino (aidapontes@usp.br)
Mateus Humberto (mateushumberto@usp.br)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av Professor Almeida Prado, Travessa do Biênio, 83 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-070

PARA ALÉM DA SUSTENTABILIDADE: ANÁLISE DO IMUS COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DA RESILIÊNCIA NA MOBILIDADE URBANA

Mariana Luiza da Silva Sassaron e Antônio Nélson Rodrigues da Silva
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

RESUMO
O aumento da vulnerabilidade urbana frente a eventos extremos demanda abordagens que integrem os conceitos de sustentabilidade e resiliência no planejamento da mobilidade a longo prazo. Entretanto, existem lacunas na literatura quanto à avaliação conjunta desses conceitos. Este trabalho, por meio de uma análise qualitativa e conceitual, de caráter bibliográfico e comparativo, investiga a capacidade do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS) de avaliar simultaneamente a sustentabilidade e resiliência da mobilidade urbana. A partir da comparação entre os indicadores do IMUS e as principais características da resiliência (robustez, redundância, preparação, rapidez e adaptação) observadas na literatura, conclui-se que o índice, em sua formulação atual, não é adequado para essa finalidade. Embora contemple aspectos estáticos da resiliência, o IMUS não incorpora sua dimensão dinâmica, essencial para captar a capacidade de resposta e transformação dos sistemas frente a eventos disruptivos.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado e desordenado dos centros urbanos tem ampliado a vulnerabilidade dessas áreas a desastres e eventos extremos (Büyüközkan *et al.*, 2022). Nesse cenário, os sistemas urbanos enfrentam desafios para manter níveis adequados de funcionamento e serviço, com destaque para o sistema de transporte (Nakata-Osaki e Rodrigues da Silva, 2023; Santamaria-Ariza *et al.*, 2023). Esse sistema é essencial para assegurar a mobilidade urbana, que, ao proporcionar acesso à educação, trabalho, saúde e lazer, influencia diretamente no desenvolvimento econômico, cultural e social das cidades (Ferraz *et al*., 2024). Com o objetivo de alcançar melhores condições urbanas, sociais e ambientais, muitos pesquisadores têm combinado os conceitos e abordagens da sustentabilidade e da resiliência para orientar o planejamento urbano (Elmqvist *et al*., 2019; Redman, 2014). Enquanto a sustentabilidade busca garantir que o sistema de transporte cumpra seu papel social e econômico minimizando seus impactos ambientais (Gallo e Marinelli, 2020), a resiliência é fundamental para que o sistema se adapte, resista e se recupere frente às perturbações (Gonçalves e Ribeiro, 2020). Ambos os conceitos são complexos e importantes, e os esforços para sua implementação conjunta devem ser cuidadosamente avaliados para que suas semelhanças e diferenças sejam compreendidas, de modo a garantir estratégias de aplicação mais eficazes (Elmqvist *et al.*, 2019; Marchese *et al.*, 2018).

Considerando a aplicação conjunta da resiliência e da sustentabilidade como um caminho para o planejamento de transportes, uma lacuna identificada na literatura é a ausência de métricas e estruturas capazes de avaliar os conceitos de forma integrada, considerando compensações e interdependências. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), proposto por Costa (2008), como ferramenta para avaliar a mobilidade resiliente e sustentável. Para isso, propõe-se as seguintes questões de pesquisa:

- Os indicadores do IMUS são capazes de mensurar e avaliar as principais características da resiliência (robustez, redundância, preparação, rapidez e adaptação) na mobilidade urbana?
- O IMUS, em sua formulação atual, é adequado para a avaliação integrada da sustentabilidade e resiliência na mobilidade urbana? Caso não seja, o que deve ser alterado?

2. SUSTENTABILIDADE E RESILIÊNCIA NA MOBILIDADE URBANA

O conceito de mobilidade urbana sustentável refere-se à capacidade do sistema de se desenvolver de maneira que equilibre necessidades sociais, econômicas e ambientais, de modo a garantir qualidade de vida no presente sem comprometer as gerações futuras (Gallo e Marinelli, 2020). Para Costa (2008), os domínios a serem avaliados na mobilidade sustentável são: acessibilidade, aspectos ambientais, sociais, políticos, infraestrutura de transportes, modos não-motorizados, planejamento integrado, tráfego e circulação urbana e sistemas de transporte urbano. O conceito de mobilidade resiliente, por outro lado, diz respeito à capacidade do sistema de reduzir os impactos resultantes de perturbações e manter seu funcionamento (Gonçalves e Ribeiro, 2020). Suas principais características são robustez, redundância, preparação, rapidez e adaptação (Tabela 1) e essas estão associadas às ações do sistema durante e após um choque: resistir, recuperar, absorver e transformar (Bergantino *et al*., 2024; Chen *et al*., 2022; Gonçalves e Ribeiro, 2020). Os domínios da resiliência podem ser classificados em social, econômico, institucional, governamental e natural (Ostadtaghizadeh *et al*., 2015).

Tabela 1: Principais características da resiliência na mobilidade urbana (Bergantino *et al*., 2024; Chen *et al*., 2022; Gonçalves e Ribeiro, 2020).

Característica	Definição	Fase do evento disruptivo	Ações relacionadas
Robustez	Capacidade do sistema de suportar estresse ou demanda sem degradação ou perda de função. Exemplos: conectividade da rede de transportes e infraestruturas bem planejadas e com manutenção.	Durante o evento	Resistir, recuperar e absorver
Redundância	Capacidade dos componentes do sistema de assumir funções de outros componentes em falha, sem prejudicar o desempenho geral. Exemplos: multimodalidade, múltiplos caminhos e infraestruturas duplicadas.	Durante o evento	Absorver
Preparação	Preparo e fortalecimento do sistema antes de um evento disruptivo, visando reduzir seus impactos negativos. Exemplos: monitoramento, manutenção, instruções aos usuários e planejamento.	Pré-evento	Resistir e recuperar
Rapidez	Capacidade do sistema de atender prioridades e alcançar metas rapidamente para conter e minimizar perdas. Está relacionada às estratégias de resposta e à preparação do sistema (identificar, mobilizar e utilizar os recursos disponíveis).	Pós-evento	Recuperar
Adaptação	Capacidade do sistema de ser flexível e responder a novas pressões. Exemplos: mudança de função de elementos, realocação de recursos e adaptação de padrões de mobilidade. Inclui a coleta de dados para fortalecer a resiliência.	Durante/Pós-evento	Transformar

3. METODOLOGIA

A análise dos indicadores do IMUS (Costa, 2008), quanto à sua capacidade de caracterizar e avaliar a resiliência na mobilidade urbana, foi organizada em três etapas: (1) Contextualização e entendimento do índice; (2) Levantamento bibliográfico para identificar indicadores relacionados às características da resiliência e suas relações com os domínios do IMUS; (3) Avaliação dos indicadores quanto à sua capacidade de analisar robustez, redundância, preparação, rapidez e adaptação no sistema de mobilidade urbana. A análise, conduzida pelos autores, possui caráter bibliográfico. Destaca-se o uso das ferramentas *Mendeley Web Importer*, *Mendeley Reference Manager* e *Mendeley Cite* na coleta, gerenciamento e citação das referências selecionadas.

Na primeira etapa, buscou-se compreender o escopo e os objetivos do IMUS, por meio da análise detalhada do processo de construção do índice e do seu guia de indicadores. Essa etapa foi essencial para garantir a correta interpretação dos elementos do IMUS e para estabelecer conexões iniciais com o conceito de resiliência.

Na segunda etapa, foi realizado um levantamento bibliográfico com foco em dois grupos de estudos: (i) estudos que abordassem as características da resiliência e seus respectivos indicadores; e (ii) estudos que relacionassem essas características aos domínios do IMUS. A busca foi conduzida nas bases *Scopus* e *Web of Science*, utilizando palavras-chave em inglês conforme o domínio e a característica analisada. Essa etapa foi realizada com o propósito de reunir referências relevantes para embasar a análise comparativa conceitual.

Na terceira etapa, os indicadores do IMUS foram confrontados com as definições das cinco características, descritas na Tabela 1, e com a literatura selecionada, considerando se cada indicador era adequado para avaliar as características da resiliência no contexto da mobilidade urbana. Trata-se de uma avaliação de natureza qualitativa, fundamentada na literatura e baseada na interpretação conceitual dos indicadores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta a hierarquia do IMUS - domínios (9), temas (37) e indicadores (87) - e destaca as características da resiliência não contempladas por seus indicadores. As características “preparação” e “robustez” são contempladas por todos os indicadores, ambas associadas às ações do sistema de resistir e se recuperar de eventos extremos.

Na literatura, a robustez é relacionada à capacidade do sistema e à conectividade da rede (Leobons *et al.*, 2019; Priolo *et al.*, 2023), enquanto a preparação refere-se a medidas tomadas previamente que fortalecem e estruturam o sistema (Chen *et al.*, 2022; Gonçalves e Ribeiro, 2020). Ao avaliar a sustentabilidade, os indicadores do IMUS buscam um sistema confiável, planejado e conectado, o que se relaciona bem com tais características da resiliência.

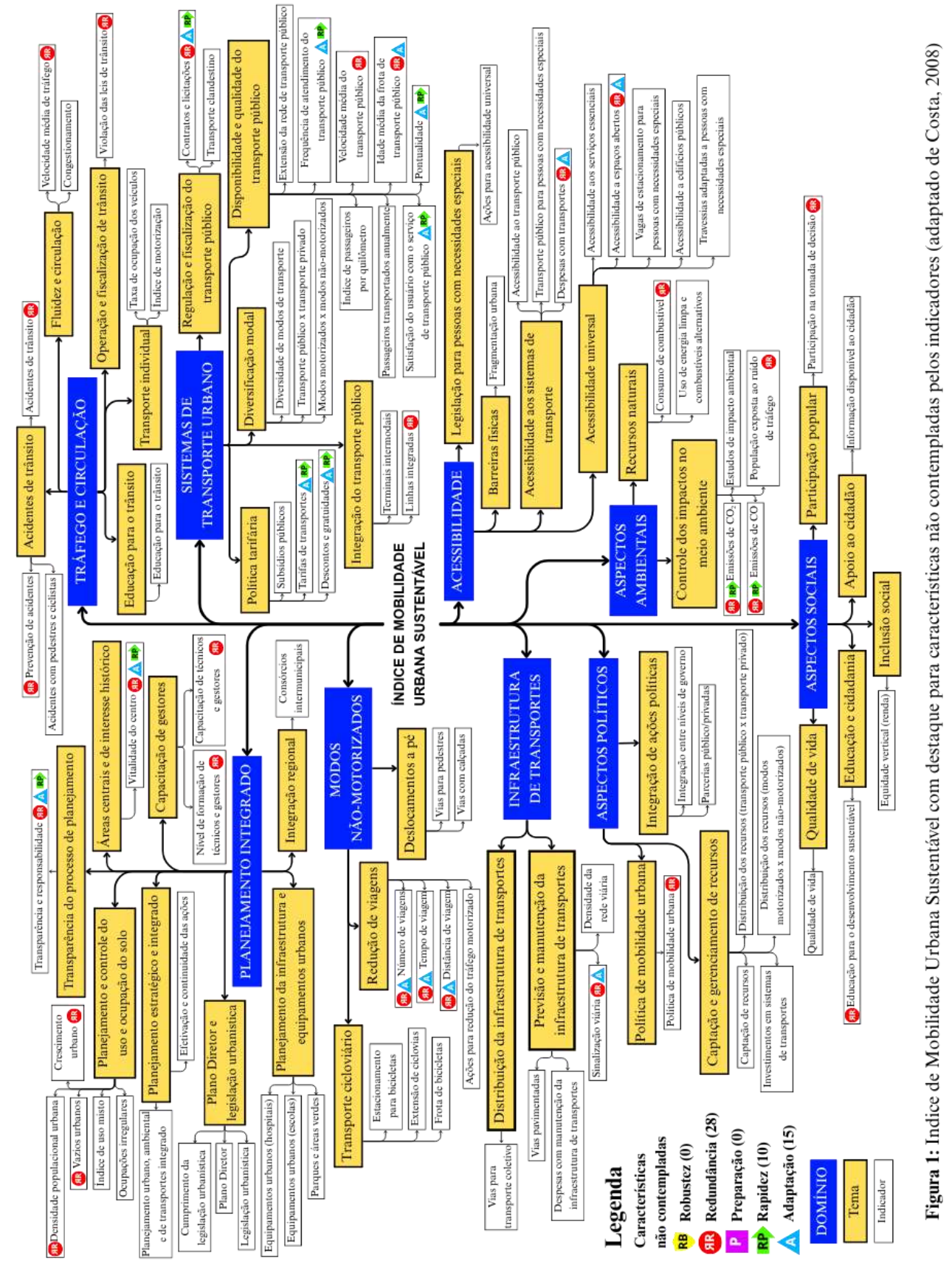


Figura 1: Indice de Mobilidade Urbana Sustentável com destaque para características não contempladas pelos indicadores (adaptado de Costa, 2008)

A característica "redundância" não é contemplada em 28 dos 87 indicadores. Na literatura, está associada à oferta de modos e rotas alternativas, nível de acessibilidade e presença de infraestruturas com capacidade excedente (Gonçalves e Ribeiro, 2020; Leobons *et al.*, 2019; Priolo *et al.*, 2023). Esses aspectos são parcialmente abordados pelo IMUS, por meio da análise da acessibilidade espacial, da promoção de multimodalidade e da densidade da rede viária. Elementos redundantes permitem que componentes do sistema assumam funções de outros quando necessário; todavia, contrariam o princípio de eficiência promovido pela sustentabilidade, que busca reduzir o uso de recursos naturais e otimizar a operação (Markolf *et al*., 2022). A resiliência, por outro lado, prioriza a eficácia, ou seja, a continuidade do funcionamento do sistema acima de tudo. Segundo Markolf *et al.* (2022), é possível buscar um equilíbrio dinâmico entre eficiência e resiliência, o que abre espaço para a inclusão de indicadores que considerem esse balanceamento.

A característica "rapidez" não é contemplada por 10 dos 87 indicadores. Na literatura, está associada ao tempo de reação do sistema, à disponibilidade de pessoas e recursos e ao tempo necessário para restaurar a operação normal (Gonçalves e Ribeiro, 2020; Leobons *et al*., 2019). A característica relaciona-se à capacidade restaurativa do sistema (Chen *et al*., 2022) e é abordada parcialmente pelo IMUS. O índice a avalia de maneira estática, ao examinar a capacidade do sistema de desenvolver estratégias de resposta a eventos disruptivos. Isso ocorre, por exemplo, ao avaliar a capacitação de gestores, a integração entre níveis de governo, a participação da população na tomada de decisões e o incentivo aos modos ativos e ao transporte público. No entanto, a dimensão dinâmica da "rapidez", referente ao desempenho real do sistema frente a eventos disruptivos, não é contemplada pelo índice.

A característica "adaptação" não é contemplada por 15 dos 87 indicadores. Na literatura, está associada à capacidade de transformação do sistema diante de eventos extremos, incluindo mudanças comportamentais, uso de informações, realocação de recursos e reconfiguração de estruturas (Markolf *et al*., 2019). Assim como a "rapidez", a "adaptação" é tratada de forma estática pelo IMUS, por meio da análise da disponibilidade de informações aos usuários, transparência governamental, planejamento integrado, uso misto do solo e manutenção da infraestrutura e dos modos de transporte. Contudo, o índice não considera a capacidade do sistema de se reorganizar durante e após um desastre de modo eficaz, tampouco avalia seu estado pós-evento, essencial para a captação de métricas e aprendizados a serem incorporados em políticas futuras. Dessa forma, a análise da aderência dos indicadores do IMUS às características da resiliência urbana permitiu identificar convergências relevantes, mas também lacunas importantes. A seguir, apresentam-se as principais conclusões e implicações desse mapeamento exploratório.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar a capacidade do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS) de mensurar e avaliar a resiliência na mobilidade urbana. Com esse intuito, analisou-se a aplicabilidade de seus oitenta e sete indicadores na avaliação das características da resiliência na mobilidade: robustez, redundância, preparação, rapidez e adaptação. Pelos resultados, constatou-se que tal mensuração é feita de maneira apenas parcial pelo IMUS, pois esse não contempla de forma dinâmica a capacidade de resposta e recuperação do sistema, um atributo essencial da resiliência. Apesar disso, os indicadores se mostram relevantes ao direcionar pontos de atenção e preparação do sistema.

Portanto, o IMUS, em sua formulação atual, não é adequado para uma avaliação integrada da sustentabilidade e resiliência na mobilidade urbana, embora represente um bom ponto de partida, passível de alteração e complementação. O índice avalia bem as características de "preparação" e "robustez", relacionadas à ação de "resistir". Por outro lado, "rapidez" e "adaptação" são parcialmente contempladas, impactadas por seu caráter dinâmico. Além disso, "redundância" é a característica menos observada. Na sustentabilidade propõe-se a eficiência dos sistemas, com redução do consumo de recursos e otimização operacional. Já na resiliência, a prioridade é a eficácia, com a garantia de continuação do funcionamento do sistema, mesmo que isso implique menor eficiência.

Assim, este trabalho contribui para o entendimento da relação entre sustentabilidade e resiliência na mobilidade urbana, ao discutir o potencial do IMUS para mensurar ambos os conceitos de forma integrada. Ao mesmo tempo, aponta caminhos para o aprimoramento do índice, seja pela incorporação de novos indicadores que capturem as dimensões de resposta e recuperação dinâmica do sistema, seja pela investigação da adequação

de outros índices de mobilidade urbana sustentável para essa finalidade. Essas possibilidades se apresentam como oportunidades relevantes para o avanço da integração entre sustentabilidade e resiliência nas políticas de mobilidade urbana, algo essencial em um cenário urbano cada vez mais vulnerável a eventos extremos.

Agradecimentos
Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bergantino, A. S.; A. Gardelli e L. Rotaris (2024) Assessing transport network resilience: empirical insights from real-world data studies. *Transport Reviews*, v. 44, n. 4, p. 834-857. DOI: 10.1080/01441647.2024.2322434

Büyüközkan, G.; Ö. Ilıcak e O. Feyzioğlu (2022) A review of urban resilience literature. *Sustainable Cities and Society*, v. 77, p. 103579. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103579

Chen, H.; R. Zhou; H. Chen e A. Lau (2022) Static and dynamic resilience assessment for sustainable urban transportation systems: A case study of Xi'an, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 368, p. 133237. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133237

Costa, M. da S. (2008) *Um índice de mobilidade urbana sustentável*. Tese (doutorado). Programa de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. DOI: 10.11606/T.18.2008.TDE-01112008-200521

Elmqvist, T.; E. Andersson; N. Frantzeskaki; T. McPhearson; P. Olsson; O. Gaffney; K. Takeuchi e C. Folke (2019) Sustainability and resilience for transformation in the urban century. *Nature Sustainability*, v. 2, p. 267-273. DOI: 10.1038/s41893-019-0250-1

Ferraz, A. C. P.; I. G. E. Torres; A. N. Rodrigues Da Silva; M. N. P. V. Romão; F. H. Hirosue e J. T. Bastos (2024) *Transporte público coletivo urbano* (1ª ed.) São Carlos: RiMa Editorial. Disponível em: https://editorarima.com.br/wp-content/uploads/2023/11/Transporte-Publico-Coletivo-Urbano.pdf (acesso em 17/06/2025)

Gallo, M. e M. Marinelli (2020) Sustainable mobility: A review of possible actions and policies. *Sustainability*, v. 12, n. 18, p. 7499. DOI: 10.3390/su12187499

Gonçalves, L. A. P. J. e P. J. G. Ribeiro (2020) Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods. *Journal of Transport Geography*, v. 85, p. 102727. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102727

Leobons, C. M.; V. B. Gouvêa Campos e R. A. de M. Bandeira (2019) Assessing urban transportation systems resilience: A proposal of indicators. *Transportation Research Procedia*, v. 37, p. 322-329. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.199

Marchese, D.; E. Reynolds; M. E. Bates; H. Morgan; S. S. Clark e I. Linkov (2018) Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications. *Science of The Total Environment*, v. 613-614, p. 1275-1283. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.086

Markolf, S. A.; A. Helmrich; Y. Kim; R. Hoff e M. Chester (2022) Balancing efficiency and resilience objectives in pursuit of sustainable infrastructure transformations. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 56, p. 101181. DOI: 10.1016/j.cosust.2022.101181

Markolf, S. A.; C. Hoehne; A. Fraser; M. V. Chester e B. S. Underwood (2019) Transportation resilience to climate change and extreme weather events - Beyond risk and robustness. *Transport Policy*, v. 74, p. 174-186. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.11.003

Nakata-Osaki, C. M. e A. N. Rodrigues da Silva (2023) Data analytics' contributions to resilient and sustainable urban mobility: An exploratory study. *In Anais* do 18th International Conference on Computational Urban Planning and Urban Management (Montreal, Canadá). CUPUM. DOI: 10.17605/OSF.IO/6YR5V

Ostadtaghizadeh, A.; A. Ardalan; D. Paton; H. Jabbari e H. R. Khankeh (2015) Community disaster resilience: A systematic review on assessment models and tools. *PLoS Currents*, v. 7. DOI: 10.1371/currents.dis.f224ef8efbdfcf1d508dd0de4d8210eD

Priolo, L.; P. Ribeiro e N. Pinto (2023) Urban resilience centered on transport systems. *Transportation Research Procedia*, v. 72, p. 4374-4381. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.331

Redman, C. L. (2014) Should sustainability and resilience be combined or remain distinct pursuits? *Ecology and Society*, v. 19, n. 2, p. 37. DOI: 10.5751/ES-06390-190237

Santamaria-Ariza, M.; H. S. Sousa; J. C. Matos e M. H. Faber (2023) An exploratory bibliometric analysis of risk, resilience, and sustainability management of transport infrastructure systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 97, p. 104063. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2023.104063

Mariana Luiza da Silva Sassaron, aluna de mestrado (msassaron@usp.br)
Antônio Nélson Rodrigues da Silva (anelson@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13566-590.

PARQUE LINEAR, RUA COMPLETA?
O CASO DAS "TRÊS RUAS" EM JOÃO PESSOA - PB

Pedro Henrique dos Santos Pereira, Amanda Jéssica Rodrigues da Silva, José Augusto Ribeiro da Silveira,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal da Paraíba

RESUMO
Promover Espaços Livres Públicos (ELPs) e uma mobilidade urbana sustentável é uma preocupação atrelada à agenda 2030 das Nações Unidades. Por isso, são importantes modelos de referência para a requalificação de ELPs urbanos, que gerem identidade e garantam qualidade de vida. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo verificar se o ELP localizado na cidade de João Pessoa, denominado Parque Linear das Três Ruas, atende às características teóricas de um parque urbano linear e converge às metas do 11º ODS. Ainda, foi verificado se há a possibilidade do espaço ser considerado uma Rua Completa. Para isso, foram realizadas comparações entre as características da área analisada e os preceitos teóricos desses modelos de ELPs sustentáveis. As discussões mostram que a denominação de Parque é incorreta para o local, e que sua configuração atual impede que seja classificado como uma Rua Completa.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O processo de produção do espaço urbano vem transformando as paisagens das cidades ao longo dos anos e, na maioria das vezes, essas mudanças ocorrem de forma não planejada, sem respaldo de estudos, podendo refletir negativamente sobre a qualidade de vida das pessoas (Lima e Medeiros, 2016). Outras vezes, as modificações são regidas por demandas políticas, não alcançando os objetivos desejados, especialmente em se tratando de projetos voltados à melhoria da mobilidade urbana e de modificações dos Espaços Livres Públicos (ELPs) urbanos.

Esses ELPs são áreas parcialmente edificadas, com baixa proporção de elementos construídos e presença efetiva de vegetação. Têm a função primordial de circulação, recreação, composição paisagística e de equilíbrio ambiental (Carneiro e Mesquita, 2000). Ou seja, são fundamentais para o bem-estar da população, tanto do ponto de vista da convivência, mobilidade e acessibilidade, quanto ambiental, dada a contribuição para o microclima urbano, ao reduzir a temperatura, elevar a umidade relativa do ar, absorver poluentes e favorecer a biodiversidade (Oliveira e Mascaró, 2007).

Tal importância é destacada pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente pelo 11º (décimo primeiro), que dentre suas metas, tem a de, até 2030, proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência. Também, tem a meta de proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis e sustentáveis para todos (ONU Brasil, 2025).

A grande questão, no entanto, é se as soluções que vêm sendo implantadas, de fato convergem para os ideais de sustentabilidade e metas da ONU quanto ao desenvolvimento sustentável, e em que nível essa convergência ocorre. Para isso, é interessante que as intervenções nos ELPs sejam orientadas por modelos formais, que permitam a diferenciação da área. Essa diferenciação esta relacionada à identidade do local, que leva à compreensão do espaço pelos usuários, permitindo o uso mais adequado para o ambiente e garantindo que sua função seja atendida dentro dos preceitos da sustentabilidade urbana.

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo verificar se o recente requalificado ELP denominado "Parque Linear das Três Ruas", localizado em João Pessoa-PB, figura-se de fato como parque linear e converge para as metas do 11º ODS sobre ELPs seguros, inclusivos, acessíveis e verdes. Ainda, o trabalho visa identificar se há a possibilidade do espaço ser considerado uma rua completa, dado o potencial identificado por Pereira (2024), ainda antes da requalificação, daquele espaço ser transformado em uma "Rua Completa".

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho se enquadra dentro de um estudo de caso com abordagem qualitativa e descritiva, uma vez que se analisa uma área específica (as Três Ruas) e se busca descrever e interpretar suas características quanto a sua classificação como parque linear, além de verificar a possibilidade de sua consideração como Rua

Completa. Para isso, são feitas comparações entre as características da área e os aspectos teóricos que definem esses modelos de intervenção urbana sustentável, especialmente no âmbito da mobilidade e da acessibilidade.

2.1 Área de Estudo

As Três Ruas, como são popularmente conhecidas as vias em torno das Ruas General Alfredo Floro Cantalice e Bancário Waldemar Mesquita de Aciolly, constituem um importante eixo viário localizado no bairro dos Bancários, na cidade de João Pessoa (PB), dividindo-o praticamente ao meio (Figura 1). A denominação "Três Ruas" decorre do fato de que, ao longo de quase toda sua extensão longitudinal (de aproximadamente 2.000 metros) há três vias paralelas, chegando a quatro em determinados trechos.

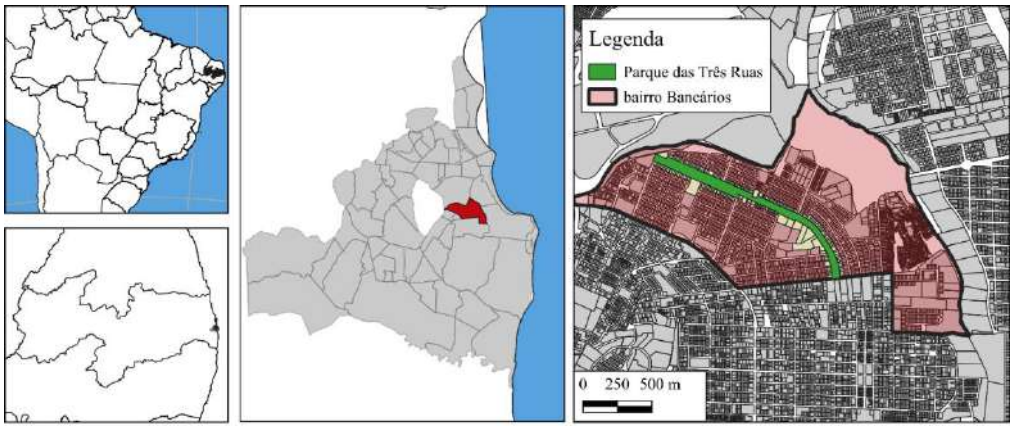


Figura 1: Localização do Parque Linear das Três Ruas em João Pessoa-PB

Entre os anos 2023 e 2024 a área passou por um processo de requalificação. Nesse processo, uma das pistas paralelas, antes com pavimentação em paralelepípedo, foi asfaltada, passando a ter atualmente 4 faixas pavimentadas para tráfego de veículos; 2 por sentido. Além disso, foram construídas uma ciclovia e uma pista de *cooper* nos canteiros de menor largura; além de uma quadra, uma pista de skate, um parquinho infantil e uma praça no trecho cujo canteiro lateral tinha maiores dimensões.

Após a obra, a área foi denominada Parque Linear das Três Ruas e conta, conforme a prefeitura de João Pessoa (2024) e a Superintendência de Mobilidade Urbana – SEMOB (2023), com aproximadamente 8.130,06 m² sendo 3.956,80 m² de área verde.

3. PARQUE DAS TRÊS RUAS, UM PARQUE LINEAR?

O surgimento e evolução do conceito de parques lineares remonta ao século XIX, com a concepção de grandes eixos, avenidas e bulevares com o objetivo de conectar espaços urbanos por meio de vias imponentes e estéticas que procuravam gerar um espaço para livre circulação de pedestres e espairecimento. A partir de 1960 começa-se a falar em *Greenways*, os materializados corredores verdes, que deram base para o conceito de parques lineares no Brasil (Mora, 2013).

Até os dias atuais, não há uma definição precisa para parques lineares, mas, definições que convergem para um ideal comum, o desenvolvimento urbano sustentável. Porém, para entender o que é um parque linear, concebê-los e avaliá-los é importante saber o que é um parque urbano. Para Guzzo *et al.* (2006) um parque urbano é um ELP destinado ao lazer ativo e contemplativo, à conservação dos recursos naturais e à promoção da melhoria das condições ambientais da cidade. Zhang *et al.* (2025) corroboram com esse pensamento. Para eles, os parques urbanos são responsáveis por benefícios ambientais, sociais e psicológicos, sendo essenciais para a recreação, interação social e conexão com a natureza. Nesse ponto, já é possível discutir a inadequação da denominação de parque atribuída às Três Ruas.

Como já descrito, o espaço denominado "Parque das Três Ruas" foi implantado ao longo de uma via urbana. Antes da requalificação, a área contava com duas faixas de rolamento pavimentadas, uma em cada sentido, e as pistas adjacentes eram compostas por pavimento em paralelepípedo. Após a requalificação (Figura 2), foram construídas quatro faixas de rolamento (duas em cada sentido, com pavimentação asfáltica e velocidade

regulamentada de 50km/h). Além disso, nas extremidades da área foram construídas três rotatórias, sendo duas delas adjacentes à nova ponte de conexão com a via que contorna Universidade Federal da Paraíba (UFPB).



Figura 2: Três Ruas após requalificação.

Essa configuração evidencia o incentivo à circulação de veículos motorizados e presença de automóveis estacionados ao longo da via (o que foge às metas do 11º ODS). Assim, uma das percepções mais marcantes no local é a predominância do tráfego intenso de veículos, especialmente nas horas de pico. Isso é o oposto das definições e objetivos de um parque urbano, uma vez contraria a ideia de lazer ativo e contemplativo, melhoria das condições ambientais, preservação de recursos naturais, etc. Percebe-se na área uma a redução do número de árvores e incentivo ao tráfego de veículos automotores, gerando mais poluição e desfavorecendo o conforto ambiental.

Em relação à denominação parque linear, de maneira geral, tem-se que esses são redes de espaços que contêm as características de parque mencionadas anteriormente, mas com a predominância de elementos lineares planejados, projetados e manejados com múltiplos objetivos de conexão, compatíveis com o uso sustentável do terreno (Mora, 2013). São áreas projetados a partir de propostas de requalificação do meio urbano com maiores dimensões no sentido longitudinal (Lima *et al.* 2025). São geralmente concebidos em espaços obsoletos, como linhas férreas desativadas, limites políticos que se tornaram vazios urbanos, orlas marítimas com infraestrutura da fase industrial, nas margens de corpos d'água e rios urbanos, entre outros (Kullman, 2011).

Percebe-se na literatura um forte vínculo entre parques lineares e corpos d'água e rios urbanos. Para Guzzo *et al.* (2006) os parques lineares são aqueles formados pelas faixas de terra existentes ao longo de rios e lagos, também com funções recreativas e conservacionista. Costa e Maciel (2020) dizem que o parque linear surge nas normas municipais como instrumento de requalificação urbana diretamente atrelado aos cursos hídricos. Mesma concepção é tida pela prefeitura de São Paulo, que descreve no Art. 273 do seu plano diretor, que os parques lineares são intervenções urbanísticas associadas aos cursos d'água, principalmente aqueles inseridos no tecido urbano (São Paulo, 2014).

Nessa perspectiva, pode-se dizer que as Três Ruas não se configuram como parque linear, uma vez que não existe nenhum curso d'água na sua extensão. Outras características que refutam a identificação da área como parque linear são apresentadas por Mora (2013), dentre elas:

i) Parques lineares têm a função de transporte e movimento, mas pregam por um desenvolvimento sustentável, logo, é interessante a criação de novas rotas paralelas ao parque linear, com o objetivo de descongestionar o tráfego e aumentar a eficiência no acesso. Implantação de rotas destinadas a meios de transporte alternativos para a melhoria da mobilidade urbana e a diminuição da poluição atmosférica proveniente de veículos motorizados;
ii) São espaços multifuncionais, o que está relacionado com o valor que eles geram em nível ambiental, de qualidade de vida, sócio-político e econômico. Destaca-se nesse quesito que esses parques preservam áreas protegidas, cursos d'água e a biodiversidade; promovem espaços seguros para melhorar a saúde física e mental; fortalecem a democracia através da participação popular em sua concepção e manutenção, etc.
iii) São espaços que permitem a integração e conexão entre áreas lineares a não lineares

Quanto à primeira característica, ao invés do incentivo à redução do tráfego de veículos na região, houve o processo contrário: o aumento no número de faixas pavimentadas e incentivo a maior circulação de veículos. Essas características foram inclusive utilizadas como justificativa para a requalificação da área, uma vez que essa seria uma rota alternativa que desafogaria outras vias na região. Em palavras da prefeitura municipal, "o projeto inclui melhorias na mobilidade urbana, com a construção de uma rotatória e um binário com pistas asfaltadas e duplicadas em ambos os sentidos" (João Pessoa, 2024).

Ainda em relação à primeira característica, apesar da existência de ciclovia, pista de *cooper* e calçadas padronizadas, não há continuidade. Para acessar outras áreas de bicicleta ou mesmo para chegar ao "parque" é necessário concorrer com os veículos nas pistas. Também, a falta de padronização nas calçadas das ruas adjacentes, impede o acesso de cadeirantes e pessoas com limitação de locomoção, o que diverge das duas outras características apresentadas e das metas do 11º ODS para acessibilidade a esses espaços públicos.

Outro ponto a se destacar é a velocidade regimentada da via, atualmente em 50km/h, o que gera insegurança para os usuários, principalmente nos cruzamentos, onde há conflitos entre ciclistas, pedestres e veículos. O excesso de velocidade é a principal causa de acidentes de trânsito em todo o mundo, especialmente nas cidades, onde existem usuários mais vulneráveis, como pedestres e ciclistas (Michelaraki e Yanis, 2025). Por isso, em áreas como as Três Ruas é importante que as velocidades sejam baixas. Para se ter ideia, quando uma pessoa é atingida por um veículo, trafegando a 50km/h, a chance de sobrevivência é de 50%, já para uma velocidade de 30 /h as chances se sobrevivência sobem para 90% (Michelaraki e Yanis, 2025).

A velocidade de 30km/h não deveria ser excedida em determinadas zonas urbanas, de modo a garantir a segurança para todos os usuários e melhorar a qualidade de vida das pessoas (Leonardi e Distefano, 2023). Melhoria na qualidade de vida e segurança são importantes características dos parques e estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento urbano sustentável, portanto a velocidade regimentada nas Três Ruas gera mais uma incongruência entre a classificação dada ao local e as características teóricas dos parques lineares.

4. RUA COMPLETA OU VIA REQUALIFICADA?

Outra inquietação que surge com a área é se é possível classificá-la como uma Rua Completa. Esse questionamento se dá pois Pereira (2024) verificou, antes da área ser requalificada, o potencial de algumas vias de João Pessoa serem reestruturadas como Ruas Completas, dentre as quais, as Três Ruas se posicionaram em destaque, como uma via de grande potencial.

O conceito de Ruas Completas surgiu nos Estados Unidos (EUA), em 2003, com o objetivo de propor ruas com leiaute equitativo para todos os usuários (Jordan e Ivey, 2021). A ideia é tornar o espaço livre público mais democrático, favorecendo o uso dos modos ativos e coletivos de transporte, sem extinguir o uso dos automóveis. São ruas que permitem a integração das funções de mobilidade e espaço público de convivência; é uma solução com foco nas pessoas e sensível ao contexto de cada rua, portanto, não existe uma tipologia única de Ruas Completas (WRI Brasil, 2021).

Essa ideia de não existir uma tipologia única está diretamente relacionada à concepção física da rua (que pode ser diferente a depender das necessidades especificas). Independentemente da sua configuração, o conceito está fundamento em componentes como *Traffic Calming*, planos cicloviários, caminhabilidade. Ainda, o escopo central das políticas de Ruas Completas tem bases em dois componentes: melhorar a segurança viária; e promover equidade aos usuários das vias (Delbosc *et al.* 2018).

Portanto, algumas das fragilidades que dificultam a validação das Três Ruas como Parque Linear, também dificultam a sua classificação como Ruas Completa, já que componentes básicos do modelo não são atendidos, ou seja, a priorização de modos ativos, com redução das faixas de veículos e, garantia de equidade e melhor acessibilidade aos diferentes usuários das vias. Dessa forma, pode-se dizer que a área se trata de uma via (ou vias) requalificada, com potencial de se tornar uma Rua Completa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo verificar se a classificação de parque linear atribuída a uma área urbana na

cidade de João Pessoa (PB) é adequada, à luz dos preceitos teóricos que definem esse tipo de espaço. A análise permitiu compreender as principais características dos parques lineares e identificar incompatibilidades entre os critérios teóricos e as condições observadas na área estudada, de modo que chamar o espaço de parque é muito mais uma estratégia política.

Além disso, verificou-se dificuldade em considerar aquela área como Rua Completa, pois os preceitos básicos do modelo não são atendidos pela atual configuração e usos das vias. No mais, destaca-se a necessidade de se repensar o local, para que, independentemente de sua classificação, ele seja de fato voltado ao desenvolvimento urbano sustentável, para a promoção de espaços livres públicos que melhorem a qualidade de vida da população, garantindo mobilidade ativa segura, acessibilidade e condições de permanência nos espaços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Costa, F. C. e K. L. S. Maciel (2020) O Parque Linear Capibaribe em Recife/PE e a Revisão do Plano Diretor da Cidade: interfaces jurídicas. *Revista Brasileira de Direito Urbanístico – RBD,* v. 6, n.11, p. 93-114.

Delbosc, A.; Reynolds, J.; Marshall, W.; Wall, A. (2018). American Complete Streets and Australian SmartRoads: What Can We Learn from Each Other? Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2672, n. 39, p. 166–176.

Distefano, N. e S. Leonardi (2022) Evaluation of the Effectiveness of Traffic Calming Measures by SPEIR Methodology: framework and case studies. *Sustainability,* v.14, 7325, p. 1-18. DOI: 10.3390/su14127325.

Guzzo, P.; R. M. A. Carneiro; H. Oliveira Jr. (2006) Cadastro Municipal de Espaços Livres Urbanos de Ribeirão Preto (SP): acesso público, índices e base para novos instrumentos e mecanismos de gestão. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana,* v. 1, n. 1, p. 19-30.

João Pessoa (2024) Parque Linear das Três Ruas será entregue neste sábado com a 1ª Virada Esportiva. Disponível em: https://www.joaopessoa.pb.gov.br/noticias/parque-linear-das-tres-ruas-sera-entregue-neste-sabado-com-a-1a-virada-esportiva/ (acesso em 11/07/2025)

Jordan, S. W.; Ivey, S. (2021). Complete Streets: Promises and Proof. *Journal of Urban Planning and Development*, v. 147, n. 2.

Kullmann, K. (2013) Green-networks: integrating alternative circulation systems into post-industrial cities. *Journal of Urban Design*, v. 18, n. 1, p. 36–58.

Lima, L. E. O.; J. A. R. Silveira.; A. G. Negrão; E. R. V. Lima.; A. D. L. Costa e E. L. Ribeiro (2025) Configuração Espacial e Qualidade Física de Parques Urbanos Lineares: o caso do parque Parahyba I, João Pessoa – PB. Ambiente Construído, v. 25, e135695, p 1-21. DOI: 10.1590/s1678-86212025000100796.

Mora, N. M (2013) Experiência de Parques Lineares no Brasil: espaços multifuncionais com o potencial de oferecer alternativas a problemas de drenagem e águas urbanas. Banco Interamericano de Desenvolvimento, Setor de Infraestrutura e Meio Ambiente. Nota Técnica IDBTN-518.

Oliveira, L. A. e J. J. Mascaró (2007) Análise da qualidade de vida urbana sob a ótica dos espaços públicos de lazer. *Ambiente Construído*, v. 7, n. 2, p. 59-69.

ONU Brasil (2025) *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11: Cidades e comunidades sustentáveis*. Nações Unidas Brasil. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11. (acesso em 05/072025)

Pereira, P. H. S. P. (2024) Análise Multicritério para a Priorização de Vias Urbanas Candidatas à Requalificação como Ruas Completas.

Sá Carneiro, A. R.; L. B. Mesquita (2000) Espaços Livres do Recife. Recife: UFPE.

Sakata, F. G. e F. M. Gonçalves. (2019) Um Novo Conceito para Parque Urbano no Brasil do Século XXI. *Paisag. Ambiente: Ensaios*, v. 30, n. 43, e155785.

SEMOB (2023) Obras do Parque das Três Ruas avançam e pista para atividades físicas ficará temporariamente suspensa. Disponível em: https://portal.semobjp.pb.gov.br/2023/12/obras-do-parque-das-tres-ruas-avancam-e-pista-para-atividades-fisicas-ficara-temporariamente-suspensa/ (acesso em 11/07/2025)

WRI Brasil (2021) Ruas Completas no Brasil: prevendo uma mudança de paradigma. DOI: 10.46830/wrirpt.19.00106

Yannis, G. e E. Michelaraki (2025) Effectiveness of 30km/h speed limit – A literatura review. Journal of Safety Research, v. 92, p. 490-503. DOI: 10.1016/j.jsr.2024.11.003.

Zhang, K.; W. L. Shang; J. De Vos; Y. Zhang e M. Cao (2025) Iluminating the Path to More Equitable Access do Urban Parks. *Scientific Reports*, v. 15:9676, p 1-13. DOI: 10.1038/s41598-025-94110-1.

Pedro Henrique dos Santos Pereira (pedrohenrique.96ph@gmail.com)
Amanda Jéssica Rodrigues da Silva (amanda.jessica@academico.ufpb.br)
José Augusto Ribeiro da Silveira (ct.laurbe@gmail.com)
Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campus I, Castelo Branco, João Pessoa-PB, Brasil.

PERCEPÇÃO POPULAR DIANTE DA POSSIBILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE PEDÁGIO URBANO NA REGIÃO CENTRAL DE BRASÍLIA

Glayson Luiz Alvarenga Chamiço, Marina Júlio Mendes, Pedro Igor de Araújo Rêgo, Vítor do Nascimento e Silva, Otavio Henrique da Silva
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO
Este estudo avaliou a percepção de 192 moradores do Distrito Federal sobre a implantação de pedágio urbano na área central de Brasília. A cada respondente foi atribuído escore derivado de questões em escala Likert tradicional. Ademais, foram coletados dados sobre deslocamento, perfil socioeconômico, tarifa-limite para abandono do carro e forma de cobrança para moradores do Plano Piloto. Em todos os subgrupos, a atitude "desfavorável" foi majoritária, e o teste qui-quadrado não indicou associação significativa (p>0,05) entre atitude em relação ao pedágio e as variáveis, sinalizando rejeição homogênea em toda a amostra. Adicionalmente, 46,97% dos entrevistados afirmaram que continuariam usando o carro independentemente do valor cobrado, evidenciando resistência à redução do tráfego. Moradores do Plano Piloto defenderam isenção para si, enquanto não residentes consideraram a cobrança justa. Esses resultados sugerem que a aceitação do pedágio depende de debate público aprofundado sobre equidade, possivelmente incluindo compensações ou subsídios aos grupos mais afetados.

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Brasília, Distrito Federal, apresenta uma configuração urbana caracterizada por uma malha viária extensa, baixa densidade populacional e elevada taxa de motorização. Essa configuração, associada à dinâmica socioeconômica da região, favorece o crescimento contínuo da frota de veículos, em especial dos automóveis particulares. Conforme os relatórios anuais da Secretaria Nacional de Trânsito – SENATRAN (2025), a capital brasileira conta, em maio de 2025, com uma frota de cerca de 2,2 milhões de veículos, dos quais 66,4% compostos por automóveis, expressando um aumento de 35,49% nos últimos dez anos.

Com a intensificação do uso de automóveis, percebe-se o surgimento de custos negativos para a sociedade: congestionamentos, aumento nos períodos de deslocamento, acidentes, prejuízos à qualidade de vida e crescimento das emissões de carbono. Considerando que investimentos em infraestrutura viária não são sustentáveis a longo prazo, o pedágio urbano é apresentado como uma medida de desestímulo ao uso de veículos individuais, conforme apontam Gomide e Morato (2011).

O pedágio urbano é um sistema no qual a cobrança ocorre para a circulação de qualquer veículo em determinadas áreas da cidade, as quais são definidas com base nos índices de congestionamento. O objetivo desse tipo de cobrança não é a arrecadação de receitas, como acontece com os pedágios tradicionais, mas sim realizar a regulação do tráfego na região, a fim de diminuir a quantidade de veículos circulantes e reduzir os índices de congestionamentos e os impactos negativos gerados por eles. Isso ocorre, pois, a cobrança da taxa aumenta o custo da utilização do transporte individual, o que incentiva uma mudança nas preferências do usuário, estimulando o uso de meios de transporte alternativos e a mudança de comportamento, por ser uma política sem caráter de proibição (Brinco, 2014, Gomide e Morato, 2011).

A utilização do pedágio para redução de tráfego é um tema amplamente discutido na comunidade acadêmica. Por exemplo, Chen *et al.*, (2021) propõem e simulam um sistema de pedágio urbano na área central de Melbourne, chamado de "CPV-based congestion pricing" (tarifa baseada no valor prospectivo acumulado, usando a Cumulative Prospect Theory), que busca aumentar a eficiência e a equidade ao cobrar valores diferenciados conforme a percepção de atraso e o perfil da viagem dos usuários. Já Fall (2022) explora os fatores sociais que influenciam a aceitação pública de um pedágio urbano hipotético em Dakar, Senegal, destacando a importância da percepção do problema do congestionamento e da existência de alternativas de transporte público de qualidade para a aceitação da medida. Ambos os estudos apontam que a precificação do congestionamento pode ser uma ferramenta eficaz para melhorar a mobilidade urbana: o primeiro enfatiza ganhos de eficiência e tempo de viagem, enquanto o segundo evidencia que a aceitação social depende de fatores como justiça percebida e qualidade do transporte público, além de indicar potencial para redução do uso do carro e incentivo a modos mais sustentáveis.

Um estudo relevante no contexto nacional é a dissertação de Souza (2017), que investigou a aceitação do pedágio urbano na Região Metropolitana de Belo Horizonte. A pesquisa contemplou tanto especialistas em transportes quanto a população local, totalizando mais de mil respondentes. Seus resultados indicaram que, embora a medida seja inicialmente controversa, a aceitabilidade aumenta significativamente quando a aplicação das receitas arrecadadas é destinada a melhorias no transporte público, alcançando até 78,7% de aprovação. Entre motoristas, mais da metade declarou que migraria para outros modos de transporte diante da cobrança.

A partir do descrito, e levando em conta o contexto da cidade de Brasília, o presente trabalho tem o objetivo de analisar como as características individuais e padrões de deslocamento influenciam a percepção e aceitação à implantação do pedágio urbano na capital, e os fatores relacionados a uma possível mudança de comportamento da população diante da implantação dessa medida regulatória.

2. MÉTODO

O estudo fundamenta-se em questionário estruturado, elaborado para avaliar a percepção e aceitação da população quanto à implantação de praças de pedágio urbano automático para acesso ao centro de Brasília/DF (Eixo Monumental, Asa Norte e Asa Sul). Aplicado em meio digital, o instrumento abordou: atitudes frente ao pedágio, hábitos de deslocamento, perfil sociodemográfico, percepção de justiça na cobrança aos moradores do Plano Piloto (Asa Norte e Asa Sul) e valores que induziriam a migração para modos alternativos de transporte. A coleta foi anônima, assegurando confiança, confidencialidade e rigor metodológico. O questionário foi divulgado em grupos acadêmicos e de trabalho do centro de Brasília, direcionando-se a usuários de automóvel. A amostra buscou atingir erro inferior a 7,5%, com nível de confiança de 95%, que totaliza um mínimo de 170 respondentes, representando a população do Distrito Federal que utiliza carro para acessar o centro de Brasília/DF.

O questionário inclui 14 questões fechadas e 1 aberta. As questões de 1 a 8 consistem em afirmações avaliadas em escala Likert tradicional de cinco pontos (1 = “discordo totalmente”; 5 = “concordo totalmente”), concebidas para captar indiretamente a atitude em relação ao pedágio (variável ordinal).

A partir da consulta à literatura, foram definidos os aspectos mais relevantes para a elaboração das afirmações (Tabela 1). Além disso, foram utilizadas questões reversas, configurando uma estratégia metodológica para aumentar a confiabilidade e a validade do instrumento de pesquisa. Essas questões foram formuladas de forma oposta às demais afirmações da escala, o que exigiu maior atenção e reflexão por parte dos respondentes. Essa técnica ajuda a mitigar o viés de aquiescência, ou seja, a tendência de concordar com todas as afirmações, e reduz respostas automáticas ou desatentas, promovendo uma maior consistência nas respostas.

Tabela 1: Afirmações em escala Likert Tradicional

Aspectos	Questões
Incentivo ao transporte público	1) O pedágio urbano incentivaria o uso de transporte coletivo ou alternativo (como bicicleta), ajudando a reduzir os congestionamentos na área central
Custo financeiro	2) O pedágio aumentaria os gastos diários da população de forma excessiva[1]
Melhoria do transporte público	3) A receita arrecadada com o pedágio poderia ser usada para melhorar o transporte público e beneficiar toda a população
Justiça social	4) O pedágio penalizaria de forma injusta quem não pode morar na área central, mas precisa ir até lá para trabalhar ou estudar, por exemplo[1]
Impacto ambiental	5) A redução do número de carros no trânsito resultaria em menos poluição
Prejuízo comercial	6) O comércio da área central seria prejudicado, pois muitas pessoas evitariam essa região para fazer compras[1]
Benefícios no longo prazo	7) Se bem planejado, o pedágio urbano traria mais benefícios do que custos para a população no longo prazo
Saturação do transporte público	8) O pedágio urbano pode prejudicar usuários do transporte público ao aumentar a lotação dos veículos[1]

Nota: [1]Questões reversas.

A soma dos escores gera um índice de 8 a 40 pontos, resultando em 33 opções possíveis de escore que, dividindo por 3 categorias (desfavorável, indiferente e favorável), resulta em um intervalo de 11 pontos. Sendo

classificado "desfavorável" para escore de 8 a 18, "indiferente" para escore de 19 a 29, e "favorável" para escore de 30 a 40, de modo que o conjunto das respostas revela, de forma sutil e menos sujeito ao viés de desejabilidade social, a orientação geral de cada participante. Para verificar a consistência interna e a confiabilidade desta escala de atitude, foi calculado o coeficiente α de Cronbach.

As questões entre 9 e 14 do instrumento de coleta de dados consistem em perguntas fechadas de escolha única, produzindo variáveis nominais ou ordinais que descrevem hábitos de deslocamento (9-10), comportamento declarado frente ao valor do pedágio e percepção de justiça (11-12) e perfil sociodemográfico (13-14). Por fim, a questão 15 é aberta, permitindo comentários qualitativos complementares.

3. RESULTADOS

Os dados foram coletados entre 18 e 25 de junho de 2025, sendo obtido um total de 192 respostas. A análise dos dados foi iniciada com a verificação da confiabilidade da escala de atitude, através do coeficiente α de Cronbach para as oito primeiras questões do instrumento, que atingiu 0,84 após a aplicação de *reverse coding* nas questões redigidas de forma negativa. Segundo Hair *et al.* (2019), valores de α de Cronbach superiores a 0,8 sugerem forte consistência interna, dessa forma, esse resultado evidencia adequada confiabilidade interna, indicando que as questões estão fortemente correlacionadas entre si, medindo de forma coesa a percepção dos respondentes sobre os impactos do pedágio urbano.

Quanto à percepção dos respondentes sobre a possível implantação do pedágio urbano no centro de Brasília, foi adotado um nível de confiança de 95%. Entre as questões 1 a 8, avaliadas por meio da escala Likert tradicional, o maior erro padrão observado foi de 7,03%. Além disso, a Tabela 2 apresenta um resumo das relações identificadas entre a atitude dos participantes em relação ao pedágio e as demais variáveis analisadas no estudo.

Tabela 2: Atitude dos respondentes em relação à implantação de pedágio urbano para acesso à área central de Brasília

Grupos		Atitude em relação à implantação de pedágio urbano		
		Desfavorável	Indiferente	Favorável
Utiliza carro particular para ir ao Plano Piloto	Sim	50,8%	39,4%	9,8%
	Não	45,0%	43,3%	11,7%
Quantidade de dias úteis (segunda a sexta) que utiliza o carro	Entre 1 e 2	35,0%	55,0%	10,0%
	Entre 3 e 4	46,9%	43,8%	9,4%
	5 dias úteis	56,3%	33,8%	10,0%
Tempo médio de percurso entre casa e Plano Piloto (apenas ida)	Menos de 15 minutos	60,0%	33,3%	6,7%
	Entre 15 e 30 minutos	48,9%	48,9%	2,1%
	Entre 30 e 60 minutos	46,2%	41,0%	12,8%
	Mais de 1 hora	50,0%	31,3%	18,8%
Morador do Plano Piloto	Sim	41,9%	38,7%	19,4%
	Não	50,3%	41,0%	8,7%
Faixa etária dos respondentes que utilizam carro	18 a 30 anos	57,7%	36,6%	5,6%
	31 a 45 anos	46,7%	40,0%	13,3%
	46 a 60 anos	36,4%	54,5%	9,1%
	Mais de 60 anos	20,0%	40,0%	40,0%
Renda familiar dos respondentes que utilizam carro[1]	Classe A	38,9%	44,4%	16,7%
	Classe B	44,7%	39,5%	15,8%
	Classe C	47,9%	47,9%	4,2%
	Classe D	66,7%	27,8%	5,6%
	Classe E	80,0%	10,0%	10,0%

Nota: [1]Classe A: mais de 20 Salários-Mínimos (SM); Classe B: 10 a 20 SM; Classe C: 4 a 10 SM; Classe D: 2 a 4 SM; Classe E: menos de 2 SM.

Conforme Tabela 2, a rejeição ao pedágio urbano é mais intensa entre quem usa carro particular para acessar o Plano Piloto (50,8% de posições desfavoráveis), especialmente naqueles com alta frequência de acessos semanais (56,3% entre os que circulam cinco dias por semana). Notou-se ainda que 60,0% dos entrevistados com trajetos de até 15 minutos são contrários à medida, bem como 50,3% dos que não residem no Plano Piloto. A resistência também predomina nas faixas etárias mais jovens (57,7% de desfavoráveis entre 18 e 30 anos) e nos estratos de menor renda, atingindo 66,7% na Classe D e 80,0% na Classe E.

Para avaliar a associação entre as variáveis de perfil e a atitude em relação ao pedágio, aplicou-se o teste de independência qui-quadrado a cada um dos subgrupos da Tabela 2. Os p-valores variaram de 0,15 (faixa etária) a 0,75 (uso ou não de carro), todos acima do nível de significância α=0,05. Assim, não se rejeita a hipótese nula de independência em nenhum dos casos, indicando que não há diferença estatisticamente significativa na atitude frente ao pedágio conforme as categorias de nenhum dos grupos analisados.

Quando questionados sobre o valor diário do pedágio que os fariam trocar o carro pelo transporte coletivo ou alternativo, 22,73% dos entrevistados indicaram R$ 2,50 como limite. Esse percentual caiu para 10,61% em R$ 5,00 e para 3,79% em R$ 7,50, voltando a subir para 15,91% em R$ 10,00. Em contrapartida, 46,97% afirmaram que continuariam usando o carro independentemente do valor cobrado.

A partir dos valores-limite declarados, associou-se cada patamar de tarifa (R$ 2,50; R$ 5,00; R$ 7,50; R$ 10,00) à proporção de respondentes dispostos a abandonar o carro. Essa proporção foi então ponderada pela frequência semanal de uso (número de dias úteis) e pelo tempo médio de deslocamento, gerando estimativas de redução de tráfego de 23,38% para R$ 2,50; 33,54% para R$ 5,00; 38,73% para R$ 7,50; e 55,13% para R$ 10,00, conforme ilustrado na Figura 1. Adaptou-se um modelo cumulativo, em que quem já deixa de usar o carro em R$ 2,50 permanece fora da via à medida que o pedágio cresce, somando-se aos novos voluntários em cada patamar mais alto. Isso reflete o efeito combinado de sensibilidade ao preço, frequência de uso e duração do deslocamento sobre a demanda por transporte individual.

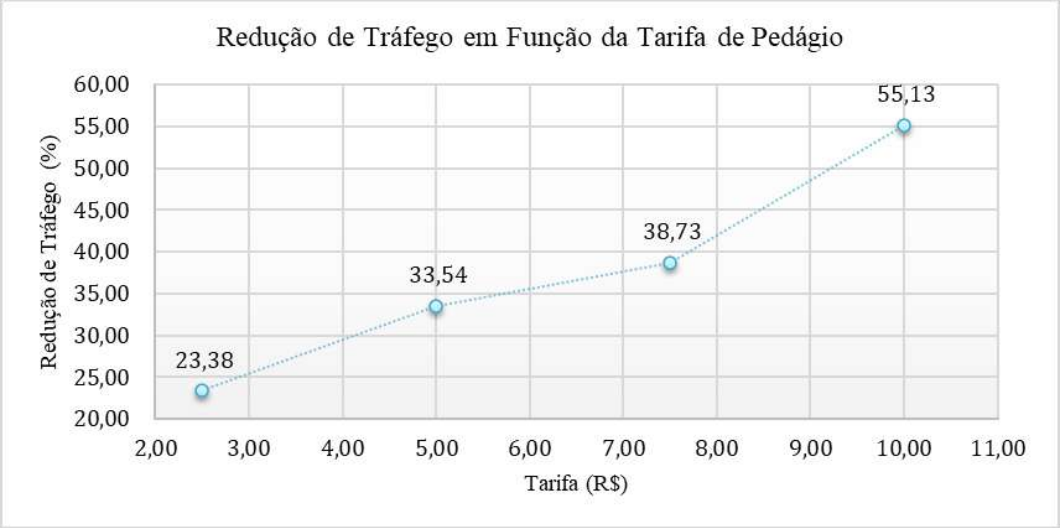


Figura 1: Redução de tráfego em função do valor da tarifa de pedágio

Entre os entrevistados que residem no Plano Piloto, 51,61% defendem que os moradores possuam isenção total da tarifa, 29,03 % acreditam que deveriam receber algum desconto e apenas 19,35% opinam que devem pagar o valor integral. Em contraste, entre aqueles que não moram no Plano Piloto, apenas 22,98 % apoiam a isenção para moradores, 24,84% desejam um desconto e a maioria de 52,17% considera justa a cobrança do valor integral para esse grupo. Isso evidencia percepções de equidade distintas conforme o vínculo residencial com a área central.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que a percepção dos moradores do Distrito Federal em relação à implantação de um pedágio urbano na região central de Brasília é predominantemente desfavorável. Essa rejeição mostrou-se homogênea entre diferentes grupos socioeconômicos, não havendo associações estatisticamente significativas conforme indicado pelo teste qui-quadrado (p>0,05). Entretanto, é relevante destacar que essa oposição é mais acentuada entre aqueles que utilizam o automóvel com frequência para acessar a área central, especialmente entre usuários com trajetos mais curtos e de menor renda familiar.

Observou-se ainda uma divergência importante na percepção sobre a equidade da cobrança: enquanto

moradores do Plano Piloto tendem a apoiar isenções ou descontos para si, não residentes avaliam que o valor integral deveria ser aplicado indistintamente. Isso aponta para a necessidade de um debate público aprofundado que leve em consideração percepções distintas de justiça e equidade, bem como possíveis medidas compensatórias ou subsídios aos grupos mais vulneráveis.

Além disso, embora os respondentes tenham indicado que tarifas mais elevadas aumentariam a disposição em abandonar o veículo particular em favor de alternativas sustentáveis, quase metade afirmou que continuaria utilizando o automóvel independentemente do valor cobrado. Isso evidencia uma resistência significativa à mudança de comportamento e sugere que a simples implantação do pedágio, sem a oferta de alternativas viáveis e eficientes de transporte público, poderia não ser suficiente para atingir os objetivos de redução significativa do tráfego.

Em síntese, os resultados do estudo indicam claramente que a aceitação do pedágio urbano em Brasília dependerá de estratégias complementares, incluindo melhorias substanciais no sistema de transporte público e ações comunicativas que promovam a compreensão coletiva dos benefícios ambientais e sociais associados a essa medida regulatória.

Por fim, este estudo reforça a importância de um planejamento participativo no processo de implantação de políticas públicas de mobilidade urbana. A diversidade de opiniões observada entre os moradores sugere que, para garantir a eficácia e aceitação das medidas, é essencial envolver a população nas discussões sobre soluções de mobilidade. A inclusão social, por meio de um processo deliberativo, pode ajudar a mitigar as desigualdades percebidas e resultar em soluções mais justas, que atendam tanto às necessidades de mobilidade quanto à equidade social.

Recomenda-se que futuros estudos ampliem a amostra, reduzindo a margem de erro para 1% ou 2%, o que possibilitaria maior precisão e generalização dos resultados obtidos. Além disso, sugere-se investigar quais formas de cobrança seriam consideradas mais justas e aceitáveis pela população, ampliando a compreensão sobre mecanismos eficazes e equitativos para a implementação de pedágios urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brinco, R. (2014) *Pedágio urbano e gerenciamento do tráfego urbano: elementos para a análise* (1ª ed.). Porto Alegre: Fundação de Economia e Estatística – FEE.

Chen, Y.; N. Zheng e H. L. Vu (2021) *A novel urban congestion pricing scheme considering travel cost perception and level of service*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 125, Art. 103042. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103042

Fall, A. N. (2022) *Analysis of social acceptability in the implementation of a congestion pricing area in Senegal*. Multimodal Transportation, v. 1, n. 4, Art. 100036. DOI: 10.1016/j.multra.2022.100036

Gomide, A. de Á. e R. Morato (2011) *Instrumentos de desestímulo ao uso do transporte individual motorizado: lições e recomendações*. São Paulo: Estação das Artes; Série Temas em Debates.

Hair, J. F.; W. C. Black; B. J. Babin e R. E. Anderson (2019) *Multivariate Data Analysis* (8ª ed.). Cengage.

SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito (2025) *Frota de veículos*. Ministério dos Transportes. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2025 (acesso em 06/06/2025).

SOUZA, S. L. (2017) *Pedágio urbano como instrumento de política pública, gestão e controle de tráfego: desafios para sua implantação na área central de Belo Horizonte*. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

Glayson Luiz Alvarenga Chamiço (eng.glaysonluiz@outlook.com)
Marina Júlio Mendes (marinajuliomendes@gmail.com)
Pedro Igor de Araújo Rêgo (pedro.rego@aluno.unb.br)
Vítor do Nascimento e Silva (vitornascimentoesilva@gmail.com)
Otavio Henrique da Silva (otavio.silva@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Anexo SG-12, 1º andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil

PESSOAS IDOSAS E ACESSO AO TRANSPORTE COLETIVO: UMA REFLEXÃO SOBRE DISTÂNCIAS E VELOCIDADES DE CAMINHADA

Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos[1], Daniela Antunes Lessa[2], Bárbara Abreu Matos[2], Mateus Gonçalves da Silva[2]

[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO

O envelhecimento populacional impõe exigências ao planejamento urbano, especialmente em cidades patrimonializadas como Ouro Preto (MG). Nesse contexto, este artigo objetiva evidenciar as limitações da abordagem convencional de acessibilidade ao transporte coletivo e sugerir adaptações metodológicas que promovam equidade. Para isso, aplicou-se o parâmetro "acesso ao transporte coletivo" em 120 segmentos de calçadas, comparando dois cenários: o primeiro com velocidade de 1,7 m/s, conforme as métricas do Índice de Caminhabilidade de Centros Urbanos Históricos; e o segundo, com velocidade de 0,4 m/s, representando o ritmo de pessoas idosas. Os resultados revelam que 97,5% dos segmentos foram classificados como "ótimos" no cenário padrão, mas apenas 47,5% mantiveram essa classificação com a velocidade reduzida. Essa queda na acessibilidade evidencia a inadequação dos critérios usuais e reforça a necessidade de parâmetros mais sensíveis à realidade do envelhecimento, promovendo justiça espacial e inclusão.

1. INTRODUÇÃO

Desde meados do século XX, observa-se um processo de envelhecimento populacional, impulsionado pela queda das taxas de fecundidade e mortalidade em diversas partes do mundo. No Brasil, essa transição demográfica é evidente: em 1980, pessoas com 60 anos ou mais representavam 6,3% da população; em 2010, esse percentual subiu para 10,8%, alcançando 15,8% em 2022 (OMS, 2007; IBGE, 2010; IBGE, 2022). À medida que a população envelhece, tornam-se mais evidentes as limitações impostas por alterações fisiológicas, cognitivas e sensoriais associadas à idade, como a perda de massa muscular, redução do equilíbrio e alterações na visão (Clares *et al*., 2014). Essas condições comprometem a autonomia no deslocamento e aumentam a vulnerabilidade a quedas — especialmente entre as mulheres, em função de fatores biológicos e socioculturais (Fhon *et al*., 2012). Além disso, a própria infraestrutura urbana frequentemente contribui para a insegurança desse público etário, devido às calçadas irregulares, travessias mal sinalizadas ou tempos de semáforo incompatíveis com sua velocidade de caminhada (Borges *et al*., 2024).

Paradoxalmente, a permanência no ambiente doméstico também acarreta riscos à saúde, como sedentarismo, isolamento social, doenças cardiovasculares e transtornos psicológicos (Olbrich *et al*., 2010). Assim, o planejamento urbano enfrenta o desafio de equilibrar a promoção da mobilidade com a garantia da segurança e do bem-estar das pessoas idosas. Nesse contexto, torna-se imprescindível rever os critérios convencionais de acessibilidade, como o parâmetro de 500 metros (ou cinco minutos de caminhada) até um ponto de transporte público, com base em uma velocidade média de 1,7 m/s (WRI Brasil, 2017). Tal valor é compatível com adultos jovens, mas não com a realidade de muitos idosos, cuja velocidade pode reduzir-se a 0,4 m/s. Isso significa que, em cinco minutos, uma pessoa idosa com mobilidade reduzida percorre apenas 120 metros — distância quatro vezes menor do que a considerada ideal para acesso a serviços básicos.

Essa discrepância se agrava em cidades com topografia acidentada, como Ouro Preto (Minas Gerais). Os estudos realizados por Álvares *et al*. (2016) e Matos *et al*. (2022) identificam obstáculos à circulação em Ouro Preto, mas não aprofundam os impactos específicos sobre essa faixa etária. Diante desse cenário, o presente artigo propõe a aplicação comparativa do parâmetro "acesso ao transporte público", extraído do Índice de Caminhabilidade de Centros Urbanos Históricos (ICCH) em dois cenários: um com base na velocidade média de caminhada de adultos jovens (1,7 m/s) e outro considerando a velocidade média de pessoas idosas (0,4 m/s). O objetivo é evidenciar as limitações da abordagem padrão e sugerir possíveis adaptações metodológicas que promovam maior equidade no planejamento urbano e no acesso ao transporte público.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada a partir da necessidade de adaptar ferramentas já existentes de avaliação urbana à realidade da população idosa. Para isso, organizou-se o processo em três etapas principais: (i)

delimitação da área de estudo, considerando as especificidades de Ouro Preto enquanto cidade patrimonializada; (ii) definição da unidade territorial de análise e seleção dos segmentos a serem avaliados; e (iii) aplicação comparativa do parâmetro "acesso ao transporte coletivo", com ajustes na escala de avaliação a partir da velocidade média de caminhada das pessoas idosas.

2.1 Área de estudo

O recorte espacial da pesquisa pertence ao distrito-sede de Ouro Preto, reconhecido como Patrimônio Cultural da Humanidade pela UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) desde 1980. O centro histórico reúne elementos arquitetônicos e culturais representativos do período colonial brasileiro. A área escolhida compreende pontos de relevância histórica, cultural e social, com significativa circulação de moradores e turistas.

2.2 Unidade territorial de análise

A Unidade Territorial de Análise (UTA) adotada no estudo foi o segmento de calçada, por permitir uma análise detalhada das condições da infraestrutura pedonal e de sua integração com a via e o entorno. Os segmentos foram definidos com extensão máxima de 150 metros, valor adequado para contextos urbanos com traçados irregulares e quarteirões assimétricos, como é o caso de Ouro Preto (Matos *et al*., 2021). Ao todo, foram selecionados 120 segmentos para aplicação do ICCH, distribuídos de forma a contemplar áreas com diferentes níveis de uso do solo, presença de equipamentos públicos, fluxo de pedestres e interesse histórico-cultural.

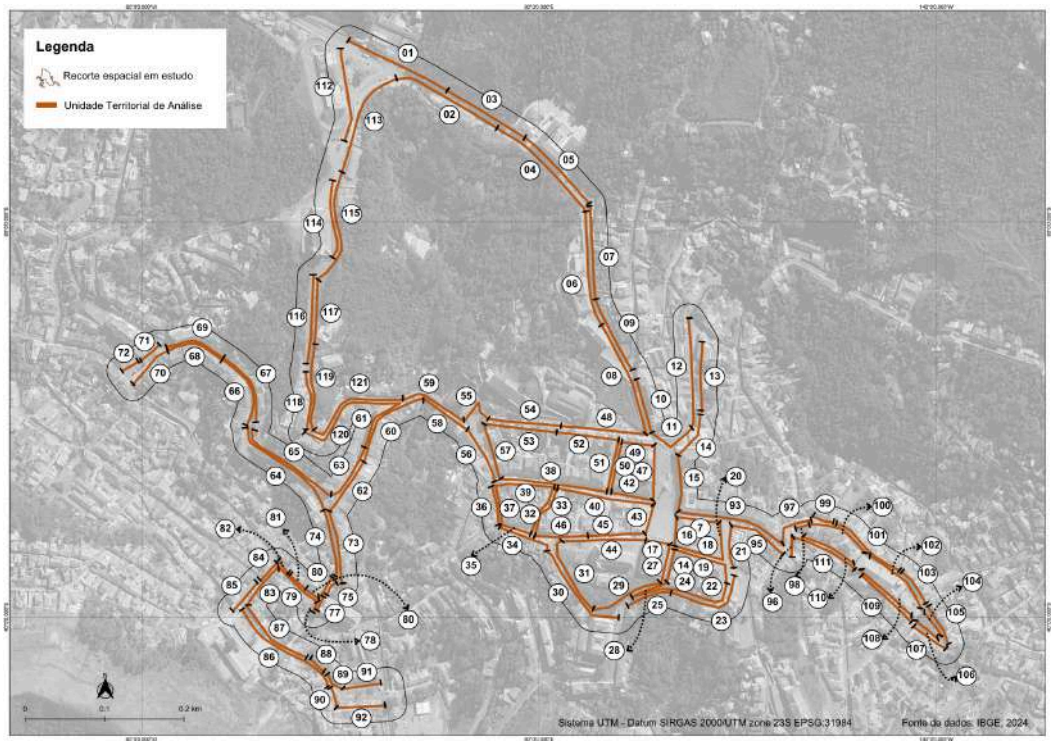


Figura 1: Localização da área de estudo, com destaque aos segmentos de calçada.
Fonte: Elaboração própria.

2.3 Adaptação da escala de avaliação

Um dos parâmetros do ICCH, proposto por Matos *et al.* (2021), é o acesso ao transporte coletivo, avaliado com base na distância de 500 metros como ideal para o alcance de pontos de embarque e desembarque. Este valor está associado à suposição de que o pedestre percorre essa distância em até cinco minutos, o que pressupõe uma velocidade de 1,7 m/s (WRI Brasil, 2017). Contudo, considerando a limitação de mobilidade imposta pelo envelhecimento, foi necessário ajustar essa métrica. Com base na NBR 9050:2020, foi adotada a velocidade de 0,4 m/s como parâmetro de caminhada para pessoas idosas. Assim, em cinco minutos, o deslocamento é de apenas 120 metros. A partir dessa velocidade, foram redefinidas - de forma proporcional - as escalas de avaliação do parâmetro, mantendo os intervalos temporais originais de 5, 10 e 15 minutos, mas recalculando as distâncias compatíveis com a realidade do público idoso (Quadro 1).

Quadro 1: Escalas de avaliação do parâmetro "acesso ao transporte coletivo" - ICCH.

Velocidade de caminhamento	Classificação	Escala de avaliação
1,7 m/s	Péssimo	Inexistência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância de até 1000 metros.
	Ruim	Existência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância superior a 750 e igual ou inferior a 1000 metros (mais de 10 minutos de caminhada).
	Bom	Existência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância superior a 500 e igual ou inferior a 750 metros (entre 5 e 10 minutos de caminhada).
	Ótimo	Existência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância de até 500 metros (5 minutos de caminhada).
0,4 m/s	Péssimo	Inexistência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância de até 360 metros.
	Ruim	Existência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância superior a 240 e igual ou inferior a 360 metros (mais de 10 minutos de caminhada).
	Bom	Existência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância superior a 120 e igual ou inferior a 240 metros (entre 5 e 10 minutos de caminhada).
	Ótimo	Existência de ponto de embarque/desembarque de transporte público a uma distância de até 120 metros (5 minutos de caminhada).

Fonte: Adaptado de Matos *et al.* (2021).

2.4 Procedimentos de análise

A análise do parâmetro "acesso ao transporte coletivo" seguiu a metodologia proposta por Matos *et al*. (2021), com adaptações para atender à realidade do público idoso, conforme descrito no item anterior. Para tanto, foram utilizadas ferramentas geoespaciais no ambiente do *software* QGIS, que permitiram a medição das distâncias entre os pontos médios de cada um dos segmentos de calçadas aos Pontos de Embarque e Desembarque (PEDs) mais próximos. Essa abordagem visa garantir a padronização das análises comparativas entre os diferentes cenários de caminhabilidade simulados. Ressalta-se que essas análises foram realizadas no dia 4 de outubro de 2024.

3. RESULTADOS

A aplicação do parâmetro "acesso ao transporte coletivo", conforme os critérios originais definidos por Matos *et al*. (2021), revelou uma cobertura ampla da rede de transporte coletivo na área estudada (Figura 2a). Em 117 dos 120 segmentos de calçada analisados (equivalente a 97,5%), o PED mais próximo encontra-se a uma distância percorrível em até cinco minutos de caminhada a velocidade de 1,7 m/s, o que lhes confere a classificação "ótimo". Essa distância de 500 metros é frequentemente adotada por organizações internacionais, como o *World Resources Institute* (WRI), a *National Association of City Transportation Officials* (NACTO) e a *United Nations Human Settlements Programme* (ONU-Habitat), como referência de "acesso conveniente", por favorecer a integração modal, o estímulo ao uso do transporte público e a redução da dependência do automóvel particular (NACTO, 2016; WRI, 2019; ONU-Habitat, 2023). Os três segmentos restantes, embora extrapolem essa distância, permanecem dentro da faixa de até 750 metros e foram classificados como "bom".

Contudo, a reavaliação do mesmo parâmetro a partir da velocidade média de caminhada de pessoas idosas (0,4 m/s) revela um cenário distinto (Figura 2b). Apenas 57 dos 120 segmentos (47,5%) mantêm a classificação "ótimo", indicando uma queda de 50% na acessibilidade ideal. Outros 46 trechos (38,3%) situam-se entre 120 e 240 metros dos PEDs, o que permite acesso em até dez minutos e os enquadra como "bons". No entanto, 17 segmentos (14,2%) exigem deslocamentos superiores a 15 minutos. Destaca-se que 6 dos segmentos com classificações "péssimo" e 'ruim" piores pertencem às Ruas Teixeira Amaral e São Francisco de Paula que apresentam inclinação longitudinal superior a 30%. Esse valor ultrapassa o limite recomendado pela NBR 9050:2020, que estabelece uma inclinação máxima de 8,33% para rampas acessíveis e de até 12,5% em trechos excepcionais com justificativa técnica. Nessas situações, em que há, também, a ausência de infraestrutura de apoio adequada, como corrimãos, patamares de descanso e superfícies antiderrapantes, o deslocamento torna-se, também, inseguro e exaustivo.

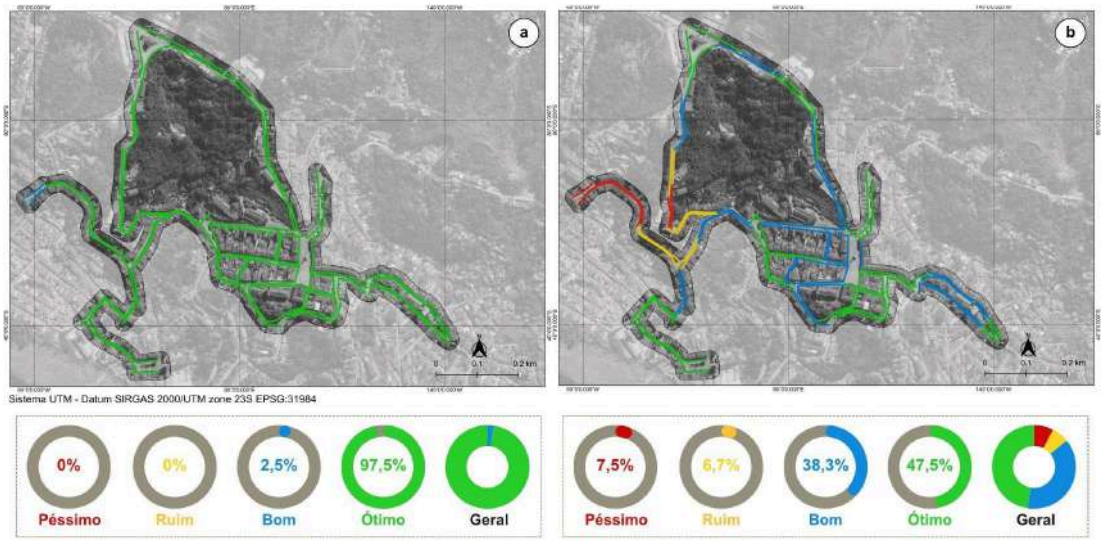


Figura 2: Análise do parâmetro "acesso ao transporte coletivo" considerando: (a) velocidade de 1,7m/s e (b) 0,4 m/s.
Fonte: Elaboração própria.

A reconfiguração dos resultados a partir da velocidade média de caminhada de pessoas idosas evidencia que indicadores baseados em médias populacionais ocultam desigualdades funcionais importantes. Como demonstram Rosso *et al*. (2011), métodos padronizados de avaliação urbana tendem a mascarar barreiras cruciais à circulação de idosos, deixando de capturar restrições impostas por fatores como topografia, ritmo de marcha e ausência de pontos de descanso ou apoio. Matos *et al*. (2023) ampliam esse debate ao afirmar que somente a existência física da infraestrutura é insuficiente: o ambiente urbano precisa dialogar com os corpos que o habitam. Quando essa sensibilidade é negligenciada, o espaço urbano desconsidera diferenças funcionais e reforça desigualdades históricas, ao invisibilizar sujeitos e suas necessidades. Essa invisibilidade tem implicações diretas sobre o acesso a direitos. Embora a gratuidade no transporte coletivo esteja garantida por lei a pessoas com 65 anos ou mais, conforme o Estatuto da Pessoa Idosa (Lei nº 14.423/2022), seu usufruto depende da capacidade física de superar trajetos íngremes e mal equipados. Nesses casos, o que deveria ser um direito universal, transforma-se em privilégio funcional.

As consequências vão além da mobilidade. Vecchio *et al*. (2022) argumentam que políticas públicas orientadas à equidade devem ir além da expansão da infraestrutura física e considerar estratégias de redesenho sensível ao território e às vulnerabilidades, como a inserção de equipamentos de apoio ao longo dos trajetos. Sob a ótica da justiça territorial, Martens (2016) reforça que a equidade em mobilidade não se mede apenas pela disponibilidade técnica de oferta, mas pela possibilidade real de deslocar-se com dignidade, em sintonia com as capacidades de cada indivíduo. Nesse contexto, o transporte coletivo, reconhecido pela literatura como vetor de pertencimento e vitalidade na velhice, só cumpre sua função social quando é acessível (Gomes; Camacho, 2017). Como destacado por Metz (2010), a garantia legal do transporte deve ser acompanhada por infraestrutura tangível, sensível às limitações corporais, sensoriais e temporais dos usuários. Do contrário, o transporte público deixa de ser mecanismo de inclusão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa realizada neste estudo evidenciou que a adoção de métricas padronizadas — como a distância de 500 metros até um ponto de transporte — oculta desigualdades significativas quando aplicada a populações com mobilidade reduzida. Quando a velocidade média de caminhada de pessoas idosas é considerada, a proporção de trechos com acessibilidade ideal cai pela metade, revelando um planejamento urbano que, embora aparentemente eficiente, é excludente na prática. Em cidades patrimonializadas como Ouro Preto, essa realidade é ainda mais acentuada. Planejar nesses contextos exige romper com a lógica tecnocrática da cidade neutra, que mascara desigualdades funcionais e privilegia determinados pedestres em detrimento de outros. É necessário reconhecer que caminhar devagar, com cautela e apoio, não pode ser um fator de exclusão, mas um parâmetro legítimo de projeto urbano. A implementação de indicadores de acessibilidade ajustados, como os apresentados neste estudo, deve orientar políticas públicas que articulem mobilidade, saúde e envelhecimento. Sob a ótica da justiça espacial, isso significa garantir que o direito à

cidade seja sustentado pela equidade no desenho e na manutenção da infraestrutura urbana. Assim, planejar para quem caminha devagar é garantir o direito de todos à cidade — um gesto político de inclusão.

Agradecimentos
Os autores agradecem à CAPES pelo fomento à pesquisa, aos programas de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes da UFMG e em Engenharia Ambiental da UFOP. Além das contribuições dos Departamentos de Engenharia Urbana (DEURB) e Engenharia Civil (DECIV) da Escola de Minas da UFOP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvares, P. M. F.; P. P. Coelho e H. A. Souza (2016) Os desafios da mobilidade urbana nas cidades históricas: o contexto da elaboração do plano de mobilidade urbana da cidade de Ouro Preto - MG. *In: Anais [...]*. Maceió: [s.n.].

Borges, E. L.; C. G. Martins; D. M. Silveira; A. F. Lopes e G. C. Lima (2024) Análise das velocidades de travessia seguindo as especificidades das pessoas idosas: um estudo de caso para Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil). *In: Anais do 10º Congresso PLURIS* (Guimarães, PT). Guimarães: [s.n.].

Clares, J. W. B.; M. C. Freitas e C. L. Borges (2014) Fatores sociais e clínicos que causam limitação da mobilidade de idosos. *Acta Paulista de Enfermagem*, v. 27, p. 237–242.

Fhon, J. R. S.; M. C. D. Silva; J. C. A. Santos; A. C. R. Rodrigues e D. C. A. Almeida (2012) Síndrome de fragilidade relacionada à incapacidade funcional no idoso. *Acta Paulista de Enfermagem*, v. 25, p. 589–594.

Gomes, F. e A. Camacho (2017) O idoso e a mobilidade urbana: uma abordagem reflexiva para a enfermagem. *Revista de Enfermagem UFPE On-Line*, Recife, PE.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) Censo demográfico 2010. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/ (acesso em 05/10/2024).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) Prévia do censo demográfico 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/ (acesso em 10/11/2024).

Martens, K. (2016) Transport justice: designing fair transportation systems. *London: Routledge*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305398785_Transport_Justice_Designing_Fair_Transportation_Systems (acesso em 29/06/2025).

Matos, B. A.; A. L. R. S. Santos e M. G. Silva (2021) Caminhabilidade nas cidades históricas: um estudo para o Centro Urbano Histórico de Glaura, em Ouro Preto (MG). *In: Anais do XVIII Congresso Rio de Transportes* (Rio de Janeiro, RJ). Rio de Janeiro: [s.n.].

Matos, B. A.; D. A. Lessa; M. G. Silva; J. M. Oliveira e A. L. R. S. Santos (2022) Índice de caminhabilidade para centros urbanos históricos: aplicação no centro histórico de Ouro Preto, Minas Gerais. *In: Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET* (Fortaleza, CE). Fortaleza: [s.n.].

Matos, B. A.; A. H. N. Ribeiro; C. A. Montero; J. V. P. Guedes e C. F. F. Lobo (2023) Mobilidade e transporte coletivo: evidências e padrões de deslocamento dos idosos na região metropolitana de Belo Horizonte (MG). *In: Anais do 37º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET* (Santos, SP). Santos: [s.n.].

Metz, D. (2010) Transport policy for an ageing population. Center for Ageing and Public Health, London School of Hygiene and Tropical Medicine. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*.

NACTO – National Association of City Transportation Officials (2016) Transit street design guide. [S.l.: s.n.]. Disponível em: https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide (acesso em 29/06/2025).

Olbrich, S.; M. J. Nitsche; J. Olbrich Neto e N. Mori (2010) Sedentarismo: prevalência e associação de fatores de risco cardiovascular. *Revista Ciência em Extensão*.

OMS – Organização Mundial da Saúde (2007) Guia global das cidades amigas das pessoas idosas. Genebra: OMS.

Rosso, A. L.; A. H. Auchincloss e Y. L. Michael (2011) The urban built environment and mobility in older adults: a comprehensive review. *Journal of Aging Research*, v. 2011, p. 816106. DOI: 10.4061/2011/816106.

UN-Habitat (2021) 11.2 Transport system. In: How the world is making public transport more accessible: progress review on SDG 11.2. Disponível em: https://unhabitat.org (acesso em 29/06/2025).

Vecchio, G.; I. Tiznado‐Aitken; B. Castillo e S. Steininger (2024) Fair transport policies for older people: accessibility and affordability of public transport in Santiago, Chile. *Transportation*, v. 51, n. 2, p. 689–715.

World Resources Institute – WRI (2019) From mobility to access for all: expanding urban transportation choices in the global south. Washington, D.C.: WRI. 48 p.

WRI Brasil (2017) 20 ações para impulsionar o transporte ativo no Brasil. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/ (acesso em 04/11/2024).

Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos (ana.santos5@aluno.ufop.edu.br), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes (Geotrans), Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil
Daniela Antunes Lessa (daniela.lessa@ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Civil (DECIV), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil
Bárbara Abreu Matos (barbara.matos@ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia Urbana (DEURB), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil
Mateus Gonçalves da Silva (mateus.goncalves@aluno.ufop.edu.br), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil

PLANEJAMENTO URBANO E MOBILIDADE ATIVA: AVALIAÇÃO DA CAMINHABILIDADE NA AV. CÂNDIDO HARTMANN (CURITIBA) COM O ICAM 2.0

Sucupira, G. T., Gonçalves, J. C. K. D., Wonsovicz, L. , Kcheve, C. B., Jacovacs, M. E., Timos, M. E., Gardemann, M. B.
Universidade Federal do Paraná - UFPR

RESUMO
Com o intuito de avaliar a mobilidade ativa em áreas urbanas, este trabalho analisou a caminhabilidade ao longo da Avenida Cândido Hartmann, em Curitiba (PR), aplicando o Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0). O trecho selecionado conecta dois pontos de destaque na cidade, o Parque Barigui e a Praça da Ucrânia, escolhidos pela sua relevância para o lazer, turismo e deslocamento de pedestres. O resultado global obtido pelo iCam 2.0 classificou o trajeto como suficiente, apontando como destaque positivo as categorias Calçada e Mobilidade. Também identificou oportunidades de aprimoramento, especialmente nos indicadores associados às categorias Atração e Ambiente. Já as categorias Segurança Viária e Segurança Pública apresentaram os piores resultados, demonstrando fragilidades que poderiam ser corrigidas prioritariamente. O estudo reforça o papel de ferramentas como o iCam 2.0, pois sua aplicação evidência como avaliações sistemáticas podem direcionar transformações no espaço urbano, promovendo ambientes mais acessíveis, seguros e voltados às pessoas.

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Curitiba, apesar dos avanços no planejamento urbano, ainda lida com a dominância de veículos motorizados como meio de transporte, o que intensifica as emissões de gases de efeito estufa e compromete a qualidade de vida urbana (SEEG, 2023), além do impacto no uso de recursos e na dinâmica social das cidades (GEHL, 2014). Nesse contexto, a promoção da caminhabilidade torna-se estratégica para criar cidades mais seguras, saudáveis e socialmente inclusivas (LIAO *et al*., 2020). O deslocamento a pé tem o benefício de reduzir emissões e igualmente fortalece vínculos comunitários,ampliando o acesso democrático ao espaço urbano. Esse deslocamento exige condições adequadas de infraestrutura, conforto e segurança (GEHL, 2013; SPECK, 2016; WHO, 2018).

Entretanto, como destacam Jorge, Bonatto e Dalfior (2022), caminhar em vias públicas pode ser um desafio em contextos urbanos marcados por ameaças à segurança, o que evidencia a relação entre qualidade do espaço público, forma urbana e percepção de risco — fatores que devem ser considerados na avaliação da caminhabilidade. Assim, torna-se indispensável lançar mão de instrumentos de diagnóstico capazes de quantificar dimensões físicas, ambientais e sociais, subsidiando intervenções que favoreçam deslocamentos a pé com menor exposição a riscos (SPECK, 2016; GAGLIONE *et al*., 2022).

Neste sentido, este trabalho integra os resultados das ações desenvolvidas pelo projeto *Caminhos de Curitiba* (2024) e adota o Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0) como ferramenta metodológica para classificar e avaliar as condições dos elementos que influenciam a caminhabilidade em um trajeto situado em área de forte interesse turístico na cidade de Curitiba – PR. O iCam 2.0, desenvolvido pelo ITDP Brasil (2019), combina 15 indicadores organizados em seis categorias: calçadas, mobilidade, atração urbana, segurança viária, segurança pública e ambiente. Cada segmento é classificado em quatro níveis: insuficiente (<1), suficiente (1 a 2), bom (2 a 3) e ótimo (=3).O cálculo é realizado a partir da média aritmética simples entre as pontuações das categorias analisadas, ou seja, sem que uma categoria possua maior valor com relação a outra (ITDP, 2019). Os dados apresentados integram uma iniciativa de pesquisa e extensão iniciada em 2024, cujos desdobramentos vêm sendo divulgados em diferentes plataformas, incluindo a página oficial do projeto no Instagram.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta se divide em três etapas: planejamento e delimitação da área, coleta de dados e, por fim, análise dos dados com a metodologia iCam 2.0.

2.1. Delimitação da área de avaliação

A avaliação do Índice de Caminhabilidade, objetivo deste trabalho, foi realizada em um percurso localizado no bairro Bigorrilho de Curitiba, conectando o Parque Barigui, maior parque de Curitiba, conhecido por sua paisagem e ampla infraestrutura, à Praça da Ucrânia, espaço cultural de convívio, marcado pela realização de

feiras típicas e manifestações populares. O trajeto é composto inteiramente pela Avenida Cândido Hartmann, conforme representado na Figura 1.

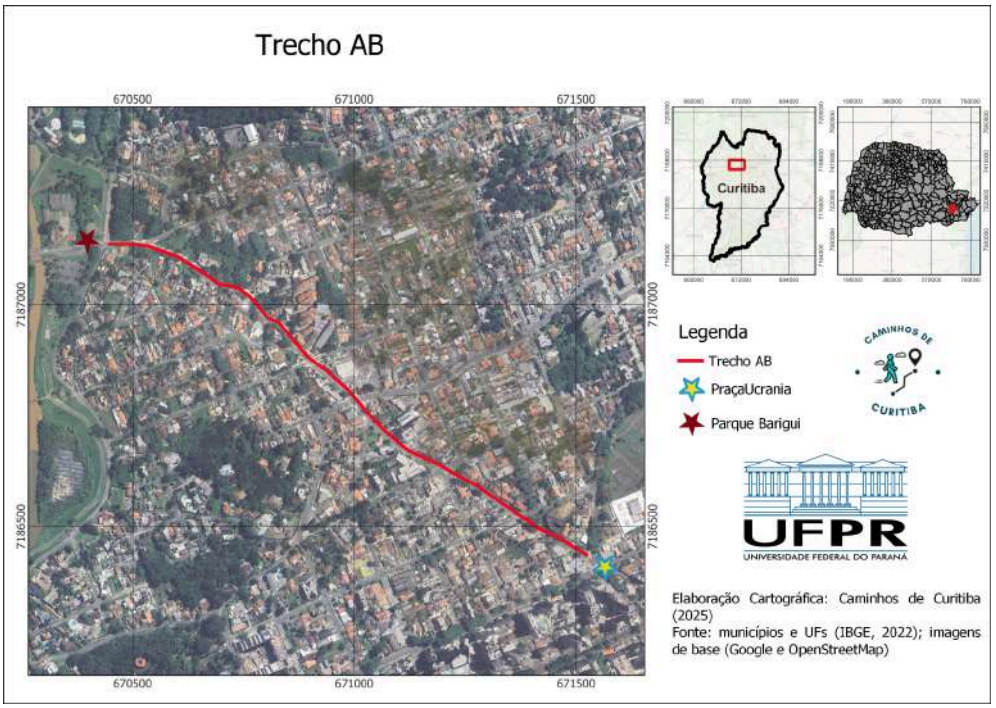


Figura 1: Representação georreferencial do percurso avaliado

A definição do Trecho AB considerou sua relevância para curitibanos e turistas, conectando o Parque Barigui, que tem alta frequência de visitantes (SMMA, 2016), à Praça da Ucrânia, recentemente revitalizada e palco de eventos culturais. A escolha do trajeto de análise (Avenida Cândido Hartmann) se deu através do aplicativo Google Maps, uma ferramenta de localização utilizada frequentemente por pedestres, sejam moradores ou turistas. Com cerca de 1,5 km (distâncias obtidas pelo Google Maps), o percurso favorece deslocamentos a pé para lazer e convívio social. Assim, a análise da caminhabilidade neste trecho se justifica pela combinação de alta atratividade, intensa circulação pedonal e relevância turística, aspectos que ampliam a importância de estratégias voltadas à qualificação dos deslocamentos não motorizados nesta área.

2.2. Coleta de dados

A coleta de dados em campo foi realizada entre fevereiro e abril de 2025. A maioria das variáveis foi registrada durante o dia, com exceção das observações da iluminação pública, que ocorreram no período noturno.

3. RESULTADOS

Após serem sistematizados em planilhas e processados conforme as diretrizes do ITDP, os dados de caminhabilidade foram mapeados no software QGIS. Na ferramenta, a rota foi georreferenciada e os resultados do índice iCam foram categorizados por segmento de rua. Essa categorização, baseada nos pontos de coleta e no desempenho por trecho, serviu para identificar os pontos mais críticos do percurso.

O resultado global do iCam 2.0 para o trajeto foi 1,04, classificado como suficiente pela metodologia do ITDP. O resultado do índice também pode ser avaliado para cada segmento (quadra), conforme apresentado na Figura 2. Destaca-se que as linhas em laranja indicam pontuação suficiente, enquanto as linhas em vermelho correspondem a pontuação insuficiente.

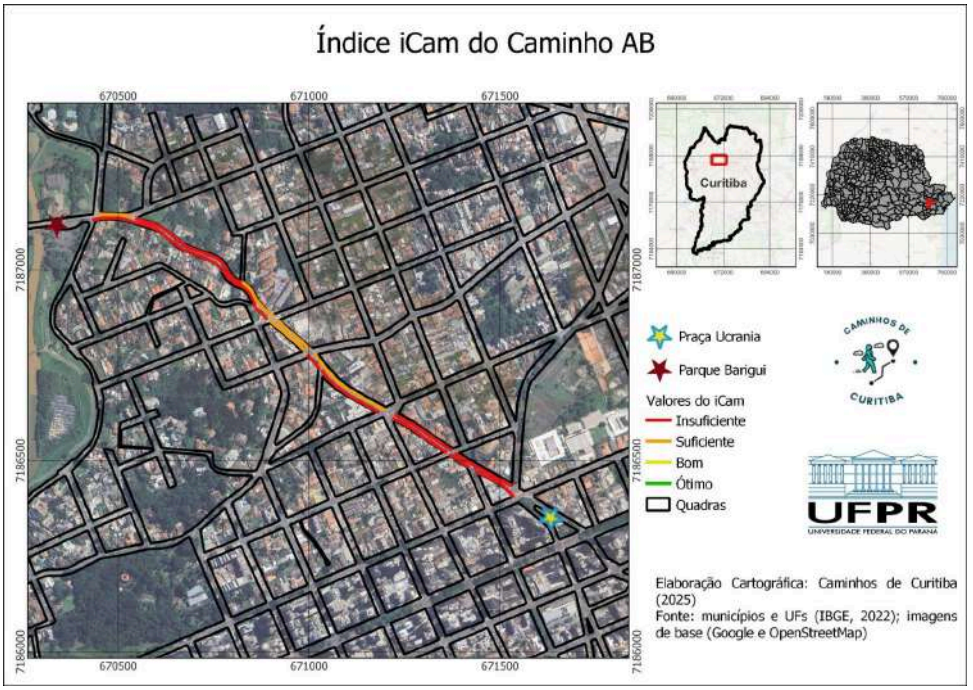


Figura 2: Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0) para cada quadra do trajeto entre o Parque Barigui e Praça da Ucrânia

Com base nos resultados das seis categorias da ferramenta, Calçada e Mobilidade obtiveram as melhores pontuações, se enquadrando como SUFICIENTE, junto das categorias Atração e Ambiente, com pontuações próximas a esse nível. Esses resultados se devem às calçadas com largura favorável, porém com pavimentação deficitária. As categorias de Segurança viária e Segurança pública foram destaques negativos, classificadas como insuficientes, o que evidencia fragilidades importantes na proteção e bem-estar dos pedestres (Figura 3).

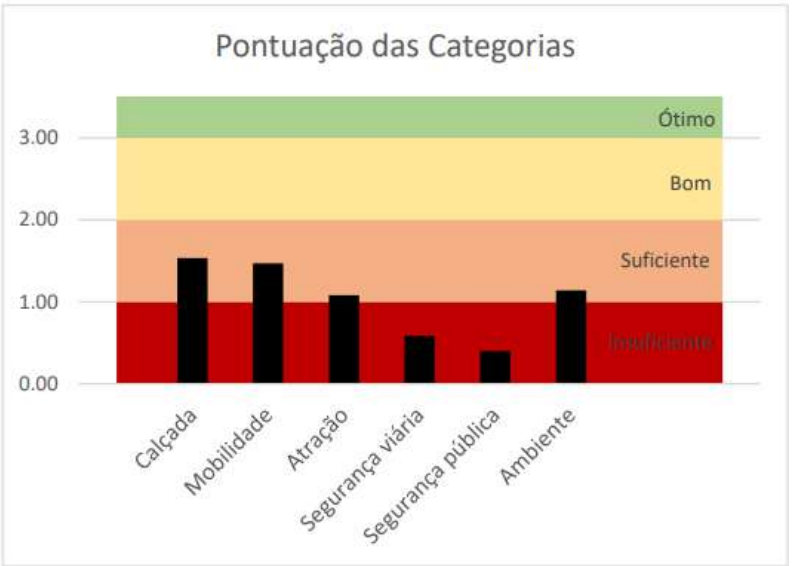


Figura 3: Apresentação dos resultados por categoria - percurso Parque Barigui e Praça da Ucrânia

A avaliação dos indicadores (Figura 4) mostra que os três mais bem avaliados foram Distância a pé ao transporte (categoria Mobilidade), Coleta de lixo e limpeza (categoria Ambiente) e Largura (categoria Calçada). Em contrapartida, os de menor satisfação foram Fluxo de pedestres diurno e noturno (categoria Segurança Pública), Uso público diurno e noturno (categoria Atração) e Travessias (categoria Segurança Viária). Essa deficiência é significativa, pois, segundo o ITDP (2019), os fatores ligados à atração e à

sensação de segurança e conforto são decisivos para a escolha e a intensidade de uso de um percurso pelos pedestres.

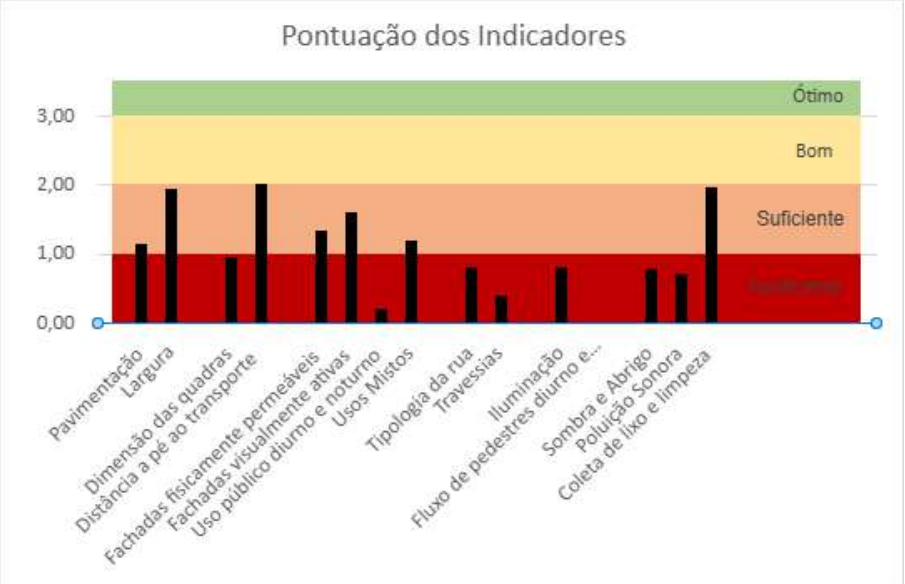


Figura 4: Apresentação dos resultados por indicadores - percurso Praça Osório ao Passeio Público

A análise conjunta desses resultados expõe um desafio de dupla natureza: uma infraestrutura urbana desfavorável ao pedestre e uma dinâmica social limitada pela baixa vitalidade urbana. O baixo índice em Travessias é um indicativo de um modelo de planejamento urbano que prioriza o transporte motorizado em detrimento da escala humana. Essa abordagem se alinha à análise de Jacobs (2011), que apontou a desconsideração pela vida urbana e o desequilíbrio infraestrutural que transformou as ruas em "alimentadoras de automóveis", reduzindo os espaços de convivência. No contexto brasileiro, esse desequilíbrio viário permanece como um desafio. Conforme apontam Stringhini e Kneib (2025), embora a Lei Federal de Mobilidade Urbana (Nº 12.587/2012) assegure a prioridade aos modos ativos de transporte, o predomínio do veículo motorizado individual ainda é uma realidade, o que se reflete nas condições inadequadas das travessias para pedestres.

Ademais, os baixos resultados de Fluxo de pedestres e Uso público diurno e noturno estão intrinsecamente ligados e apontam para uma baixa atratividade e dinâmica no local. A presença reduzida de pessoas nas ruas, especialmente em diferentes horários, dificulta a formação do "círculo virtuoso" descrito pelo ITDP (2019), onde a presença constante de pedestres funciona como um elemento de vigilância natural, atraindo mais pessoas e aumentando a sensação de segurança.

Essa deficiência no uso público corrobora o fenômeno do esvaziamento de áreas urbanas, discutido por Vasconcelos e Costa (2023). A alternativa para essa questão, como indica o ITDP (2019), reside na promoção de uma maior diversidade de usos e funções urbanas. Um ambiente com comércio, serviços, moradia e lazer integrados tende a reduzir a necessidade de longos deslocamentos e a estimular a ocupação contínua dos espaços públicos, tornando-os mais funcionais e seguros para quem caminha. Os resultados negativos indicam uma dinâmica de reforço mútuo: a infraestrutura focada em carros contribui para travessias com maior risco, o que, somado à baixa diversidade de usos, resulta em ruas pouco movimentadas e com menor percepção de segurança, desestimulando a presença de pedestres.

4. CONCLUSÃO

A aplicação do Índice de Caminhabilidade (iCam 2.0) no trecho da Avenida Cândido Hartmann, que conecta

o Parque Barigui à Praça da Ucrânia, permitiu identificar aspectos positivos e fragilidades na infraestrutura voltada à mobilidade ativa em uma área de relevância urbana e turística de Curitiba. No entanto, no presente estudo, foi avaliado apenas um dos "caminhos" de conexão entre os dois pontos turísticos, assim sendo interessante a aplicação da metodologia em diferentes trechos que ligam os dois locais a fim de verdadeiramente avaliar a conexão através do deslocamento a pé entre o Parque Barigui e a Praça da Ucrânia. O resultado global classificado como suficiente reflete a presença de condições mínimas para o deslocamento a pé, especialmente em função da boa largura das calçadas e da relativa conectividade com o transporte público. Entretanto, os baixos desempenhos nas categorias Segurança Viária e Segurança Pública evidenciam a necessidade de intervenções que priorizem o pedestre e fortaleçam a construção de um ambiente caminhável e de qualidade.

As descobertas deste estudo podem ser utilizadas para definir as áreas críticas onde ações para melhorar os critérios relacionados à caminhabilidade devem ser priorizadas. A análise evidencia a importância da promoção de ações de planejamento urbano focadas na experiência do pedestre como o aumento da atratividade, segurança e acessibilidade dos espaços públicos. A continuidade do monitoramento e a replicação da metodologia podem subsidiar políticas públicas mais eficazes e direcionadas ao fortalecimento das condições para o deslocamento a pé..

Agradecimentos
Reconhece-se o apoio institucional e o financiamento da Itaipu ParqueTec, que foram essenciais para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GAGLIONE, F.; C. GARGIULO, F. ZUCARO e C. COTTRILLA (2022). Urban accessibility in a 15-minute city: a measure in the city of Naples, Italy. *Transportation Research Procedia* v. 60, p. 378–385. DOI /10.1016/j.trpro.2021.12.049

GEHL, J. (2014) *Cidades para pessoas*. 2.ed. São Paulo, SP: Perspectiva.

ITDP BRASIL (2019). *Manual de aplicação do iCam 2.0*. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento.

JACOBS, Jane. Morte e vida de grandes cidades. 3a ed. São Paulo: Martins Fontes, 2011.

JORGE, Liziane de Oliveira; BONATTO, Daniella do Amaral Mello; DALFIOR, Brenda Miurim. Caminhabilidade, comportamento e segurança: uma avaliação das ocorrências de furto e roubo à pessoa em vias públicas de Vitória/ES. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, n. 22, v. 6, p. 527–547, 2022.

LIAO, B.; P. E. W.Van Den Berg, P. J. V.Van Wesemael e T. A. Arentze (2020). Empirical analysis of walkability using data from the Netherlands. *Transportation Research Part D*: Transport and Environment. v. 85. DOI 10.1016/j.trd.2020.102390.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2018). *Environmental noise guidelines for the European region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. Disponível em: https://www.who.int Acesso em: 03 jul. 2025.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE. Parque e bosques - Barigui. Disponível em: Acesso em: 13 jul. 2025.

SEEG (2023) *Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa*. Observatório do Clima. Infográficos 2023. Acesso em: 03 jul. 2025. Disponível em: https://seeg.eco.br/infograficos/

STRINGHINI, Ana Beatriz Ferreira; KNEIB, Erika Christine. MELHORAR A CAMINHABILIDADE E SEGURANÇA DO PEDESTRE: A BUSCA POR ROMPER PARADIGMAS A PARTIR DE UMA INTERVENÇÃO DE URBANISMO TÁTICO EM GOIÂNIA, BRASIL. Revista Políticas Públicas & Cidades, [S. l.], v. 14, n. 2, p. e1809, 2025. DOI: 10.23900/2359-1552v14n2-83-2025. Disponível em: https://journalppc.com/RPPC/article/view/1809. Acesso em: 14 jul. 2025.

VASCONCELLOS, M. C. de J., e Y. N. P. da COSTA. (2023) Reabilitação de edificações em áreas centrais: contribuições do research by design para o edifício Sulamérica (Recife). In: *XV Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo*, Lisboa-Recife, Junio-Septiembre. Disponível em: https://upcommons.upc.edu/handle/2117/404317. Acesso em: 5 jul. 2025.

PLANNING CYCLING INFRASTRUCTURE BASED ON THE 15-MINUTE CITY CONCEPT: AN IFCA APPROACH

Marcelo Monari[1], Antônio Nélson Rodrigues da Silva[2], Lucas B. M. de Assis[2], Paulo C. L. Segantine[2]
[1]Federal University of São Carlos, [2]University of São Paulo

ABSTRACT
Although the 15-minute City (15mC) concept has gained prominence in current discussions on sustainable urban planning, practical evidence indicates that its large-scale implementation still lacks systematization. This work addresses this gap by proposing a GIS-based iFCA (integrated Floating Catchment Area) approach to guide the planning of cycling infrastructure towards a 15mC. A case study was conducted in Ibitinga-SP, Brazil. Three categories of Trip Attractors (TAs) were selected for the mapping of accessibility indices and for estimating the centralities of road segments within the cycling network: Primary Health Care (PHC) centers, and public Middle and/or High Schools. The application of the proposed approach enabled the identification of those census tracts in Ibitinga-SP with greater or lesser adherence to a 15mC. It also highlighted road segments with a higher concentration of cycling routes that facilitate access to the studied TAs, which should be prioritized for the development of cycling infrastructure.

1. 15-MINUTE CITY OVERVIEW

The 15-minute City (15mC) concept has stood out in current discussions on smart and sustainable urban planning, presenting itself as a possible solution to mitigate not only greenhouse gas emissions (Moreno *et al*., 2021), but also the inequity in access to essential urban opportunities and services (intensified and exposed by the COVID-19 pandemic). In a 15mC, the population is able to reach their main daily travel destinations within 15 minutes on foot or by bicycle (Logan *et al*., 2022), ensuring that neighborhoods are self-sufficient and decentralizing urban functions and services (Bocca, 2021).

Despite the obvious benefits arising from this city model, such as reducing dependence on automobiles, planning and evaluating a 15mC still represents a challenge for most urban and transport planners, since, as advocated by some authors in the literature, there is still no real systematization of the process (Kamruzzaman, 2022). Currently, although over one hundred cities worldwide claim to embrace the 15mC concept, more than half of them are classified by Teixeira *et al*. (2024) as *late majority* or *laggards*. Those are cities that have adopted little or no practices associated with the concept in their action plans, respectively. Furthermore, only two of those cities are located in the Global South (Teixeira *et al*., 2024), which suggests a lack of methods and techniques to support the planning in question in emerging countries.

This work addresses this gap, being part of an initial effort to operationalize 15mC planning and evaluation in Latin American cities. In this context, the objective of the present paper is to propose an approach to plan cycling infrastructure towards a 15mC, through an integrated variant of the Floating Catchment Area (iFCA) method that has been increasingly used to measure the level of access to Trip Attractors (TAs) (Bauer and Groneberg, 2016). Furthermore, given the rare existence of Origin-Destination (OD) surveys in Latin American cities, the approach in question is based exclusively on open data and free software.

To exemplify the application of the proposed approach, a case study was conducted in Ibitinga-SP, a small Brazilian city with a population of around 60 thousand inhabitants. Three different categories of TAs were selected for mapping accessibility indices and estimating the centralities (relative importance) of the road segments in the cycling network: Primary Health Care (PHC) centers, and public Middle and/or High Schools. At the end of the work, the following research questions must be answered:

- Which regions of Ibitinga-SP have the highest and lowest levels of access, within 15 minutes, to the three categories of TAs studied?
- What are the most important road segments in promoting access to each category of TAs, that is, whose provision of cycling infrastructure should be prioritized?

2. METHOD

This section presents the research method, which is subdivided into the following topics: (i) mathematical formulation for applying the iFCA approach, (ii) Origin-Destination centrality, and (iii) case study data. QGIS software was used for geoprocessing spatial data.

2.1. Integrated Floating Catchment Area (iFCA)

According to Bauer and Groneberg (2016), the mathematical formulation for applying the iFCA approach can be summarized by Equations 1 to 4 below.

$$A_{i,k} = \sum_{j \in (t_{ij} \leq C_{glob})} \frac{S_{j,k} \times f_{adj}(t_{ij}) \times f_{con}(t_{ij})}{\sum_{i \in (t_{ij} \leq C_{glob})} P_{i,k} \times f_{adj}(t_{ij}) \times Prob_{demand_{ij,k}}} \quad (1)$$

$$f_{adj}(t_{ij}) = \frac{1 + e^{\frac{-(median_k) \times \pi}{\sigma_k \times \sqrt{3}}}}{1 + e^{\frac{(t_{ij} - median_k) \times \pi}{\sigma_k \times \sqrt{3}}}} \quad (2)$$

$$f_{con}(t_{ij}) = \frac{1 + e^{\frac{-(C_{glob}/2) \times \pi}{\sigma_{glob} \times \sqrt{3}}}}{1 + e^{\frac{(t_{ij} - C_{glob}/2) \times \pi}{\sigma_{glob} \times \sqrt{3}}}} \quad (3)$$

$$Prob_{demand_{ij,k}} = \frac{S_{j,k} \times f_{adj}(t_{ij})}{\sum_{z \in (t_{iz} \leq C_{glob})} S_{z,k} \times f_{adj}(t_{iz})} \quad (4)$$

where $A_{i,k}$ is the access level of demand at origin i to the category k of TAs; $S_{j,k}$ is the capacity of the TA of category k located at j; $P_{i,k}$ is the potential demand at origin i for TAs of category k; t_{ij} is the travel time from i to j; $f_{adj}(t_{ij})$ and $f_{con}(t_{ij})$ are the adjusted and constant decay functions applied to t_{ij}, respectively; C_{glob} is global catchment size (15 minutes); σ_k and $median_k$ are the sample standard deviation and median of travel times t_{ij}, respectively; σ_{glob} is the standard deviation that results in $f_{con}(C_{glob}) = 0.01$; $Prob_{demandij,k}$ is the probability of demand at i choosing a category-k TA at j, given nearby alternatives at locations z within 15 minutes; $S_{z,k}$ is the capacity of the TA of category k located at z; and t_{iz} is the travel time from i to z.

2.2. Origin-Destination centrality

The mathematical formulation for estimating Origin-Destination (OD) centralities of the road segments can be summarized by Equations 5 to 8 below (McDaniel *et al*., 2014).

$$C_{e,k} = \sum_{i \in I, j \in J | t_{ij} \leq C_{glob}} \theta_{ij}(e) \times M_{i,k} \times M_{j,k} \quad (5)$$

$$\theta_{ij}(e) = \begin{cases} 1, & \text{if link e is used in } \theta_{ij} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$M_{i,k} = \frac{P_{i,k}}{\sum_{i \in I} P_{i,k}} \quad (7)$$

$$M_{j,k} = \frac{S_{j,k}}{\sum_{j \in J} S_{j,k}} \quad (8)$$

where $C_{e,k}$ is the centrality of road segment e in relation to category k of TAs; θ_{ij} is the shortest path from i to j; $M_{i,k}$ and $M_{j,k}$ are the multipliers for origin i and destination j, respectively, in relation to category k of TAs; and I and J are the sets of all origins and destinations, respectively.

2.3. Case study data

Figure 1 presents the case study data. The map on the left shows the Digital Elevation Model (DEM) of the studied region (INPE, 2008); and the cycling network of Ibitinga-SP, which was downloaded from the collaborative mapping platform *OpenStreetMap* (OSM) and then properly classified according to its Level of Traffic Stress – LTS (Mekuria *et al*., 2012). Road segments classified as LTS 3 or 4 (high stress) were assigned a speed of 5 km/h, assuming that cyclists would get off their bikes and cover them on foot (Willberg *et al*., 2023). The same reasoning was applied to those segments whose upslope is steeper than 5% (AASHTO, 1999). The remaining low-stress segments (LTS 1 or 2) were assigned cycling speeds between 16 and 40 km/h, according to their respective slope rates (Monari *et al*., 2022).

The maps on the upper right of Figure 1 show the TAs of interest to the research. The georeferencing and estimation of the capacity of each TA (number of health professionals or enrolled students) were conducted through consultations with the Brazilian National Registry of Health Establishments (CNES, 2024) and data

from the 2023 Brazilian School Census (Brazilian Ministry of Education, 2024). As for the maps on the lower right of Figure 1, they show the spatial distribution of demand for each service studied. For health services, it was assumed that the entire cycling population is able to access PHC centers. PHC is the first level of contact individuals have with the healthcare system, and bicycles can improve access to PHC centers (especially in areas where public transport is limited or expensive), supporting timely visits and follow-ups (Huerta-Munoz and Källestål, 2012). Therefore, the potential cycling demand in each census tract was estimated by weighting the resident populations belonging to different age groups by the respective percentages of participation in daily bicycle use (Transporte Ativo and LAMOB-UFRJ, 2021). For schools, the following potential demands were assumed: population aged 10 to 14 for Middle School; and aged 15 to 19 for High School (IBGE, 2022).

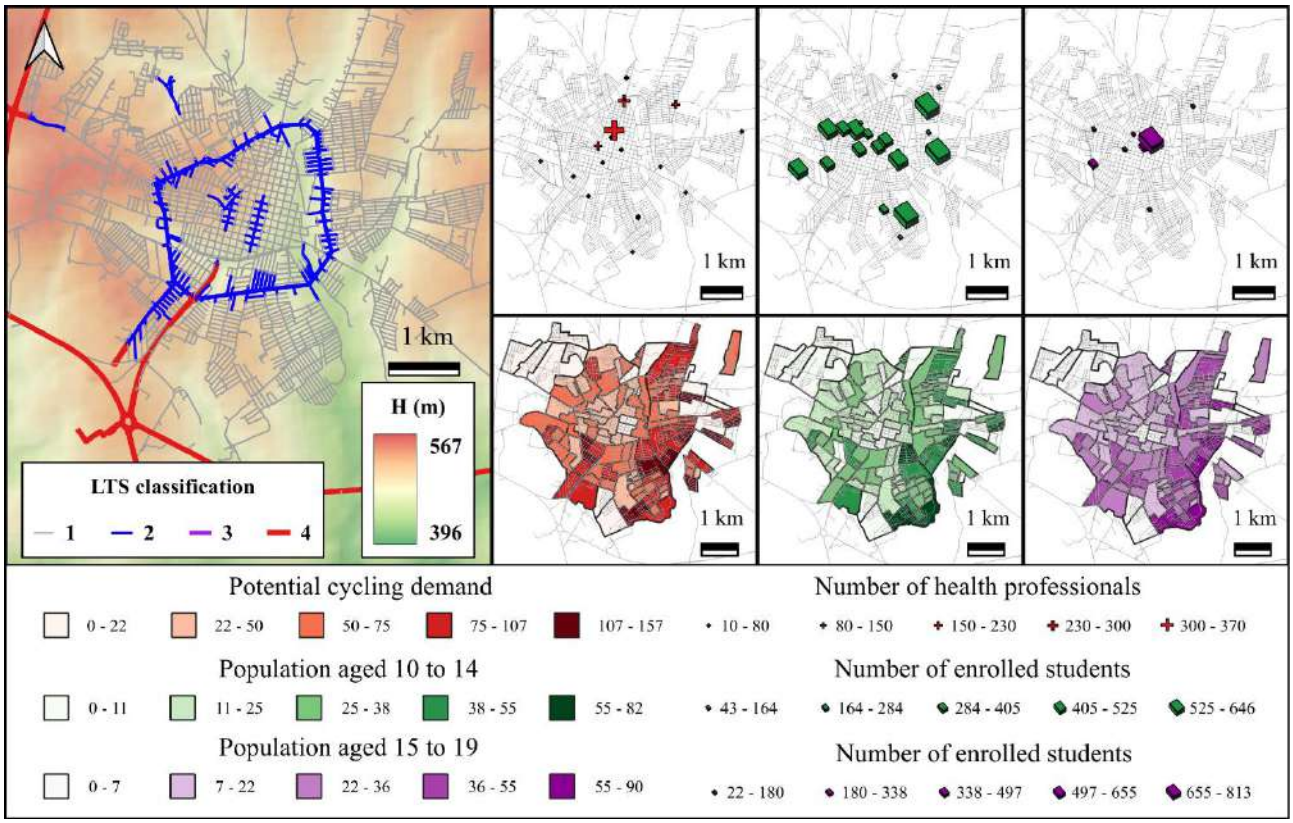


Figure 1: Case study data

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 summarizes the case study results: upper maps show normalized 15-minute access (0-10) to the three pre-defined TA categories, while lower maps show OD centralities of road segments promoting access to them.

Addressing the first research question, some census tracts have the highest normalized levels of access despite the TA category, most of them located in the central region of Ibitinga-SP. Specifically for PHC centers, the high levels of access observed in some peripheral sectors are explained by the low population density, which reduces demand for bicycles. This leads to a supply capacity that meets demand, indicated by a high Provider-to-Population Ratio (PPR). Nevertheless, the following average accessibility indices are estimated for the city as a whole: 1.54 for PHC centers, 1.27 for Middle Schools, and 1.05 for High Schools. Furthermore, almost 99% of the potential cycling demand in Ibitinga-SP has access levels to PHC centers limited to 2 (20% of the maximum normalized value). An equally limited level of access is observed for 93.5% of the population aged 10 to 14; and 97% of those aged 15 to 19, who could potentially use bicycles to travel to Middle and High Schools, respectively.

Addressing the second research question, it is noted that, on average, the road segments in Ibitinga-SP integrate less than 1% of cycling routes that promote access to the studied TA categories. However, maximum centrality values of 23.9%, 15.5%, and 34.7% were observed for PHC centers, Middle Schools, and High Schools, respectively. The first and last TA categories show more clearly defined bikeways compared to Middle

Schools, whose more heterogeneous spatial distribution across the city results in more dispersed and distinct potential cycling routes.

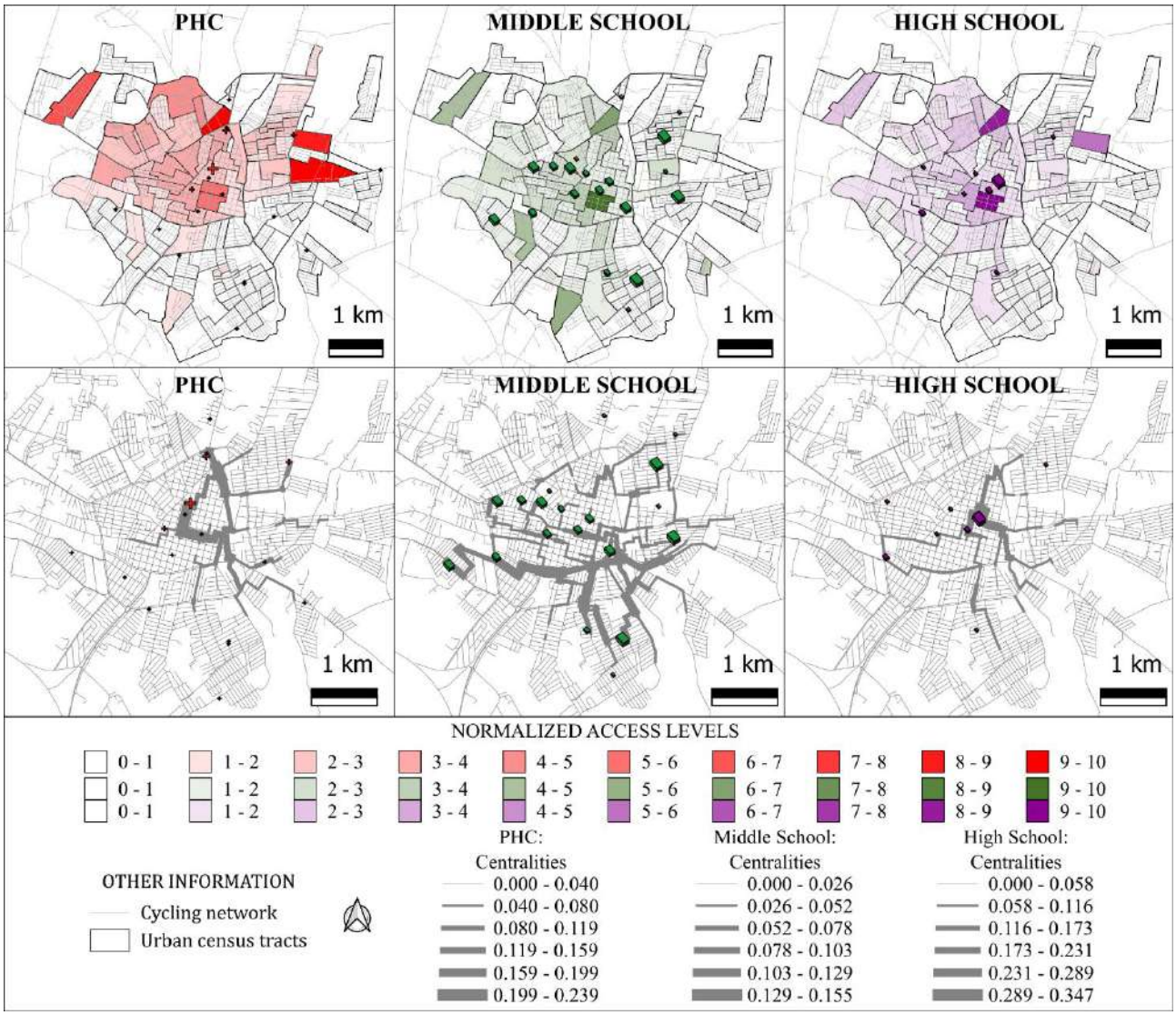


Figure 2: Case study results

4. FINAL CONSIDERATIONS

This study explored 15mC cycling planning using an iFCA approach, offering clear visual and numerical results to guide cycling infrastructure decisions. In Ibitinga-SP, for example, initial efforts could focus on implementing bike lanes along selected segments of collector roads that exhibit high centrality in relation to both Middle and High Schools.

Future studies are encouraged to incorporate other types of TAs into the analysis, such as workplaces, commercial areas, cultural facilities, and others. This broader approach would allow for: (i) more targeted recommendations regarding the provision of cycling infrastructure, based on a multicriteria assessment; and (ii) the development of an action plan derived from the output maps, by ranking road segments and defining priority interventions to achieve a low-stress cycling network. Additionally, methodological improvements could include: (i) external validation through bicycle traffic counts; and (ii) sensitivity analysis of the parameters, applied to decay functions and different temporal windows (such as 10, 20, and 30 minutes).

Finally, since routes were calculated for all TAs in each category, the relevance of this approach in the case of schools could be questioned, given that student allocation typically follows a government-defined, neighborhood-based logic. However, mapping the 15mC condition, especially when combined with more

detailed studies on students' bicycle usage, could help inform a more rational and equitable allocation model. This perspective may offer a more meaningful alternative to the simplistic reliance on Euclidean distance between origins and destinations.

Acknowledgments
The authors thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Financing Code 001, and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq-Brazil).

REFERENCES

AASHTO (1999) *Guide for the Development of Bicycle Facilities* (3. ed.). Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Bauer J. and D. A. Groneberg (2016) Measuring spatial accessibility of health care providers-introduction of a variable distance decay function within the floating catchment area (FCA) method. *PLoS One*, v. 11, p. 1–17. DOI: 10.1371/journal.pone.0159148

Bocca, A. (2021) Public space and 15-minute City: A conceptual exploration for the functional reconfiguration of proximity city. *Journal of Land Use, Mobility and Environment*, v. 14, n. 3, p. 395–410. DOI: 10.6092/1970-9870/8062

Brazilian Ministry of Education (2024) *Censo Escolar 2023*. Available at: https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/censo-escolar/resultados. Access: December 30, 2024.

CNES – Brazilian National Register of Health Establishments (2024) *Consultas a estabelecimentos*. Available at: https://cnes.datasus.gov.br. Access: December 30, 2024.

Huerta-Munoz, U. and C. Källestål (2012) Geographical accessibility and spatial coverage modeling of the primary health care network in the Western Province of Rwanda. *International Journal of Health Geographics*, v. 11, p. 1–11. Available at: https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/1476-072X-11-40.pdf. Access: June 18, 2025.

IBGE – Brazilian Institute of Geography and Statistics (2022) Brazilian National Demographic Census 2022 [*Data set*]. Rio de Janeiro: IBGE. Available at: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html. Access: December 30, 2024.

INPE – Brazilian National Institute for Space Research (2008) TOPODATA [*Data set*]. São José dos Campos: INPE. Available at: http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php. Access: December 30, 2024.

Kamruzzaman, L. (2022) Typologies of 20-minute Neighbourhoods, active transport use, and spatial spillovers. *Transport Findings*, March. DOI: 10.32866/001c.33158

Logan, T. M.; M. H. Hobbs; L. C. Conrow; N. L. Reid; R. A. Young and M. J. Anderson (2022) The X-minute City: Measuring the 10, 15, 20-minute city and an evaluation of its use for sustainable urban design. *Cities*, v. 131, p. e103924. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103924

McDaniel, S.; M. Lowry and M. Dixon (2014) Using Origin-Destination Centrality to Estimate Directional Bicycle Volumes. *Transportation Research Record*, n. 2430, p. 12–19. DOI: 10.3141/2430-02

Mekuria M. C.; P. G. Furth and H. Nixon (2012) *Low-Stress Bicycling and Network Connectivity*. Mineta Transportation Institute Report.

Monari, M.; P. C. L. Segantine and I. Silva (2022) Avaliação da usabilidade do MDE TOPODATA para mensurar a acessibilidade de ciclistas: um estudo de caso para uma cidade pequena. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 74, n. 3. DOI: 10.14393/rbcv74n3-65117

Moreno, C.; Z. Allam; D. Chabaud; C. Gall and F. Pratlong (2021) Introducing the "15-Minute City": Sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities. *Smart Cities*, v. 4, n. 1, p. 93–111. DOI: 10.3390/smartcities4010006

Teixeira, J. F.; C. Silva; S. Seisenberger; B. Büttner; B. McCormick; E. Papa and M. Cao (2024) Classifying 15-minute Cities: A review of worldwide practices. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 189, p. e104234. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104234

Transporte Ativo and LAMOB-UFRJ (2021) *Perfil Nacional do Ciclista Brasileiro 2021*. Rio de Janeiro: LAMOB-UFRJ. Available at: https://ta.org.br/perfil/ciclista21.pdf. Access: December 30, 2024.

Willberg, E.; C. Fink and T. Toivonen (2023) The 15-minute city for all? Measuring individual and temporal variations in walking accessibility. *Journal of Transport Geography*, v. 106, p. e103521. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103521

Marcelo Monari (marcelo.monari@ufscar.br)
Federal University of São Carlos, Department of Civil Engineering, Rod. Washington Luís, Km 235 – São Carlos, SP, Brazil
Antônio Nélson Rodrigues da Silva (anelson@sc.usp.br)
Lucas Brandão Monteiro de Assis (lucasbrandao@usp.br)
Paulo Cesar Lima Segantine (pclsegantine@usp.br)
University of São Paulo, São Carlos School of Engineering, Av. Trabalhador Sãocarlense, 400 – São Carlos, SP, Brazil

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA ASSERTIVIDADE DE SISTEMAS DE TEMPO REAL NO TRANSPORTE PÚBLICO: ESTUDO DE CASO EM PORTO ALEGRE/RS

Giovana Facchini[1, 2], **Guilherme Rocha Bittencourt**[1]
[1]Consórcio Viva Sul, [2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
O presente estudo propõe um método para avaliar a assertividade das previsões de chegada de ônibus em tempo real em Porto Alegre. A metodologia propõe coletas em campo com dois tipos de consulta no aplicativo: única e múltipla, simulando o comportamento real dos usuários. Os dados foram comparados com os horários reais de passagem, considerando intervalos de assertividade propostos de forma a refletir a tolerância dos usuários. O estudo de caso aplicado permitiu verificar a metodologia proposta como um instrumento replicável para gestores avaliarem a qualidade de sistemas previsão de chegada de forma independente, apoiando a regulação e a melhoria dos serviços.

1. INTRODUÇÃO

A crescente digitalização dos sistemas de transporte coletivo urbano tem impulsionado a adoção de tecnologias de informação em tempo real, especialmente os sistemas de previsão de chegada de ônibus. Os sistemas de *Real-Time Passenger Information* (RTPI) vêm se consolidando como ferramentas essenciais tanto para os operadores quanto para os usuários, promovendo uma experiência de viagem mais eficiente e confiável. A disseminação dessas informações de chegada, por meio de aplicativos móveis, sites ou painéis nas paradas, tem potencial para reduzir a incerteza associada às viagens, melhorar a percepção de confiabilidade do serviço e, consequentemente, impactar positivamente a satisfação dos passageiros e a gestão operacional. Diversos estudos têm demonstrado os benefícios da informação em tempo real para os usuários. Pesquisas como as de Watkins *et al*. (2011) e Brakewood *et al*. (2014) comprovam que, quando percebida como confiável, essa informação reduz significativamente a ansiedade, o tempo de espera percebido e melhora a experiência geral no transporte coletivo. Por outro lado, previsões imprecisas ou inconsistentes podem gerar efeitos negativos, como frustração, perda de confiança no sistema e, em casos mais críticos, a migração dos usuários para modos mais previsíveis, como o transporte individual (Jabbari *et al*., 2017).

Apesar dos aprimoramentos nos modelos de previsão, que incluem desde métodos estatísticos até modelos baseados em inteligência artificial, como árvore de decisão, redes neuras, floresta aleatória e máquina de vetores de suporte (Li *et al*., 2018; Sihag *et al*., 2022), a literatura evidencia que a maior parte dos estudos permanece concentrada no desenvolvimento e na validação dos algoritmos a partir de bases internas de dados operacionais, como registros de GPS, telemetria e histórico de viagens, com foco em métricas como erro médio e robustez do modelo (Sun *et al*., 2025; Rashvand *et al*., 2023). No entanto, essas métricas técnicas, embora úteis para avaliar o desempenho agregado dos modelos, nem sempre refletem de forma fiel a experiência real dos usuários. Estudos como o de Cats & Loutos (2015) demonstram que modelos podem apresentar bons indicadores médios de desempenho e, ainda assim, gerar erros sistemáticos, como subestimação recorrente dos tempos de espera, comprometendo significativamente a confiabilidade percebida pelos passageiros.

No que se refere à definição de métricas de confiabilidade, poucos estudos adotaram parâmetros operacionais formalizados que definem objetivamente quando uma passagem de ônibus pode ser considerada adiantada, pontual ou atrasada. Nos sistemas operados pela WMATA, em Washington D.C., por exemplo, é adotado como critério de pontualidade a chegada do ônibus em até 2 minutos antes ou até 7 minutos depois do horário programado (Arhin & Noel, 2013), enquanto outras agências norte-americanas utilizam um critério mais rígido de 1 minuto antes a 5 minutos depois (Arhin *et al*., 2014). Já estudos realizados em Atenas a partir de entrevistas com os passageiros mostram que atrasos superiores a 5 ou 10 minutos começam a ser percebidos como inaceitáveis (Daskalakis & Stathopoulos, 2008). No contexto brasileiro, não foram encontrados estudos equivalentes. Entretanto, Ferraz *et al.* (2024) indicam que o parâmetro de avaliação para a confiabilidade do sistema de transporte coletivo são viagens não realizadas ou viagens realizadas com adiantamento superior a 2 minutos ou atraso superior a 4 minutos.

Diante disso, este artigo tem como objetivo propor um procedimento metodológico para avaliação da assertividade das informações em tempo real, por meio da aplicação de uma pesquisa utilizando um aplicativo de RTPI em um município brasileiro (Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul). A proposta contempla, além da construção da metodologia, o desenvolvimento de métricas objetivas que possam ser adotados para classificar se uma previsão pode ser considerada assertiva, atrasada ou adiantada. Assim, o artigo visa preencher uma lacuna existente tanto na prática operacional quanto na literatura, oferecendo um instrumento

que permita verificar a qualidade das informações prestadas de forma independente pelos órgãos gestores ou empresas operadoras, sem a necessidade de acesso aos dados internos dos fornecedores de sistemas RTPI. Trata-se, portanto, de uma ferramenta de apoio à regulação, fiscalização, melhoria dos processos de gestão dos serviços e promoção da transparência na relação entre operadores, desenvolvedores de sistemas e a sociedade.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

2.1. Procedimentos de Coleta

O procedimento metodológico proposto nesse trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação da assertividade das informações efetivamente acessíveis ao usuário no momento da consulta, sem acesso aos dados internos do sistema, o que torna o procedimento replicável para gestores públicos, operadores ou pesquisadores interessados em validar e comparar a qualidade da informação oferecida. Dessa forma, o procedimento proposto parte de duas premissas baseadas no comportamento típico dos usuários:

- **Consulta Única:** Reflete o comportamento de usuários que realizam uma única verificação no aplicativo e aguardam a chegada do veículo, ou seja, guardam o celular e não realizam novas consultas no trajeto até a parada de ônibus (PO) ou enquanto aguardam o veículo na PO.
- **Consulta Múltipla:** Simula o comportamento de usuários que realizam atualizações sucessivas na previsão, buscando acompanhar possíveis alterações no tempo estimado enquanto aguardam na PO.

A definição das janelas temporais para cada consulta busca representar essas situações. Assim, foram adotadas duas diferentes faixas de previsão: (i) veículos com previsão de chegada entre 5 e 15 minutos para a consulta única, simulando o comportamento do usuário que realiza a consulta antes de se deslocar até a PO e (ii) veículos com chegada entre 4 e 7 minutos para a primeira consulta múltipla, para os casos em que o usuário já está na PO ou muito próximo. O procedimento de coleta para cada consulta é apresentado na Figura 1.

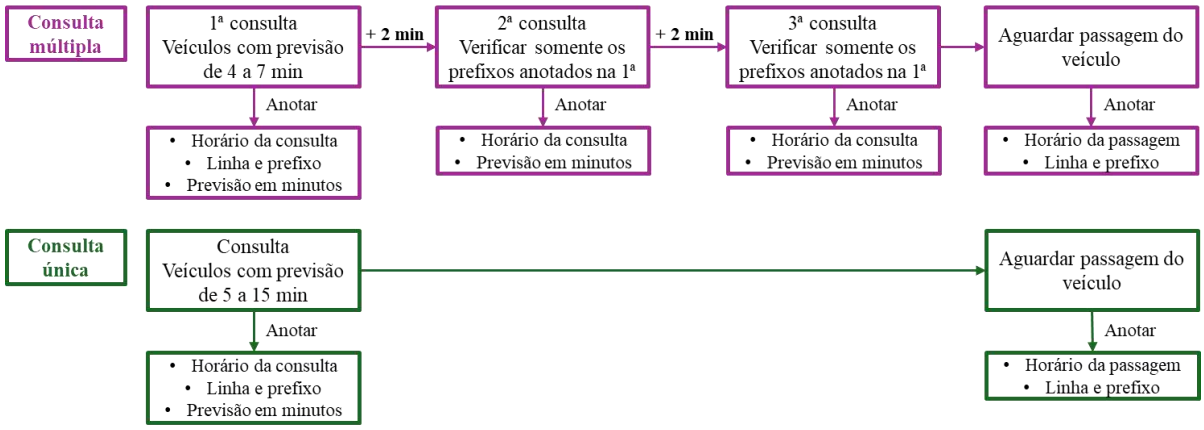


Figura 1: Procedimento de coleta da consulta múltipla e consulta única

Para realização da coleta, foram elaborados dois diferentes instrumentos de pesquisa, conforme os cabeçalhos apresentados na Figura 2. O campo "Observações (OBS)" estava disponível aos pesquisadores para preenchimento de exceções, sendo elas: (NP) veículos que não passaram pela PO, mesmo com previsão no aplicativo; (NA) veículos sem previsão no aplicativo no momento da consulta; ou ainda outras exceções como troca de veículo, linha incorreta etc. O caso (NA) poderia ocorrer em duas situações distintas: (i) na consulta única, não constava previsão na janela de 5 a 15 min, mas o ônibus passou pela PO; (ii) na consulta múltipla, a previsão não estava disponível na 2ª ou 3ª consulta (ou ambas), mas foi realizada a primeira consulta e o veículo passou pela PO. Na primeira situação, o pesquisador deveria preencher os campos da coluna Passagem, sem preencher os campos de Consulta. Na segunda, o pesquisador deveria preencher o horário da consulta na qual não foi encontrada a previsão e deixar o campo de Previsão em branco. Ainda, para a consulta múltipla, era possível que nem todos os campos de previsão fossem preenchidos, já que um veículo poderia passar no ponto de parada antes do tempo necessário para a 3ª coleta. Nesse caso, os campos de Horário e Previsão da 3ª coleta ficariam em branco, diferenciando do caso NA. Todos os pesquisadores receberam essas orientações e foram previamente treinados sobre as funcionalidades e usabilidade do aplicativo para correto preenchimento do instrumento de pesquisa.

PESQUISA ÚNICA

Data: _____ Local: _____ Sentido: _____ Pesquisador: _____

Linha	Prefixo	CONSULTA (5 - 15 min)		PASSAGEM			OBS
		Horário	Previsão	Horário	Linha	Prefixo	

PESQUISA MÚLTIPLA

Data: _____ Local: _____ Sentido: _____ Pesquisador: _____

Linha	Prefixo	1ª CONSULTA (7 - 4 min)		2ª CONSULTA		3ª CONSULTA		PASSAGEM			
		Horário	Previsão	Horário	Previsão	Horário	Previsão	Horário	Linha	Prefixo	OBS

Figura 2: Instrumentos de pesquisa

2.2. Procedimentos de Análise

Os dados coletados na pesquisa permitem aferir qual a hora prevista para passagem de determinado veículo na PO pesquisada. Dessa forma, a principal análise a ser realizada consiste basicamente em confrontar o horário de passagem com o horário previsto. Antes disso, deve ser feita uma análise preliminar das linhas e prefixos, verificando se houve erros de digitação ou inconsistências como prefixo consultado diferente do prefixo de passagem (o que pode ocorrer em exceções, como em trocas de veículos após quebras). No caso de inconsistência, a observação deve ser descartada. Entretanto, se o prefixo trocado corresponde a previsão corretamente, a observação pode ser considerada pois a viagem de fato ocorreu na mesma linha.

A partir dos horários previstos e horários de passagem, pode obter-se a diferença em minutos entre esses dois marcos. Com isso, é necessário a definição do que pode ou não ser considerado como assertivo. Tarar *et al.* (2021) considerou que um resultado positivo entre a diferença do horário previsto e o horário de passagem indica um veículo adiantando, enquanto um resultado negativo nessa diferença indica um veículo atrasado. Entretanto, essa análise foi considerada muito limitada, pois pequenas diferenças de relógio já não considerariam diversas previsões como assertivas. Além disso, entende-se que os usuários possuem uma certa tolerância quanto aos atrasos e adiantamentos.

Dessa forma, inicialmente propôs-se um intervalo de assertividade de menos dois até mais dois minutos considerando as características operacionais de Porto Alegre e os tempos previstos para adiantamentos e atrasos no cumprimento de viagens. É importante ressaltar que o Edital de Concorrência Pública de Concessão do município não previu esse intervalo. Este intervalo levou em consideração o histórico de pesquisas locais realizadas para levantamento do cumprimento de partidas, somado ao entendimento que um intervalo de mais ou menos um minuto seria muito sensível à precisão de relógio. Entretanto, autores como Ferraz *et al*., (2024) qualificam diferentemente o atraso e o adiantamento pela percepção do passageiro, assim como um Benchmark realizado por agências estadunidenses e aplicativos de RTPI (TransitApp, 2024). De fato, a qualidade da informação ao passageiro é mais impactada pelo erro de previsão no adiantamento, visto que pode significar na perda na passagem do ônibus no ponto, do que no atraso.

Com base nestas observações, o intervalo de assertividade foi recalibrado para ambas as consultas. No caso da consulta múltipla, o intervalo foi alterado para -1 min até 3 min, reduzindo a tolerância de adiantamentos e aumentando a tolerância para atrasos. Esse intervalo é similar ao utilizado pelo Benchmark (-1 min até 2 min 30 s). Já no caso da consulta única, com previsões de passagem de 5 até 15 min, foi utilizado um intervalo de -2 min até 4 min aumentando a tolerância tanto para adiantamentos quanto para atrasos, por se tratar de uma previsão cuja localização do veículo é mais distante do ponto consultado, sendo o mesmo intervalo previsto por Ferraz *et al.* (2024) e similar ao do Benchmark (-1 min 30 s até 4 min). Com essa definição, foi possível calcular o percentual de previsões assertivas para cada uma das pesquisas, somando-se todas as previsões com diferença de horário previsto e real desses intervalos e dividindo-se pelo total de consultas.

3. APLICAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA

3.1. Descrição do Estudo de Caso

O estudo para validação da metodologia proposta foi realizado no município de Porto Alegre. O sistema de ônibus constitui o principal modo de transporte público da Cidade. O sistema é dividido em 4 bacias operacionais (Sul, Norte, Leste e Transversal) que operam, no total, 275 linhas nos dias úteis, 183 aos sábados e 155 aos domingos. A frota é composta por 1.345 ônibus, incluindo 12 veículos elétricos. Todos os veículos contam com sistemas biométricos de controle de acesso, rastreamento por GPS e câmeras de videomonitoramento, integrados à gestão da operação.

A aplicação da metodologia foi realizada em quatro dias distintos, sendo dois dedicados ao método de consulta única e outros dois ao método de consulta múltipla, ambos com coletas no período das 06 h às 22 h. As coletas foram realizadas em duas POs da Zona Sul de POA e abrangeram os dois sentidos operacionais das linhas — ida e volta. Em função da organização dos turnos dos pesquisadores e para maior aproveitamento do volume operacional dos picos, o sentido ida foi majoritariamente pesquisado pela manhã, enquanto o sentido volta concentrou maior número de observações pela tarde/noite. A escolha das POs levou em conta a oferta de linhas e viagens, de forma a garantir no mínimo 400 observações por coleta (95% de confiança e 5% de significância). Além disso, as paradas não deveriam estar localizadas muito próximas às cabeceiras (terminais), uma vez que essas regiões apresentam frequentemente um *delay* na atualização das previsões em tempo real.

3.2. Resultados da Aplicação

Foram realizadas 461 consultas únicas válidas e 512 consultas iniciais na pesquisa múltipla, totalizando 1.532 consultas considerando as três verificações consecutivas no aplicativo. Na consulta única, houve somente um caso NP e nenhuma ocorrência de NA. Já na consulta múltipla, foram verificados 30 casos NA, sendo 11 desses na 2ª consulta e 19 na 3ª consulta, sem ocorrências de NP. Os casos NA observados se concentraram em alguns períodos que foram entendidos como oscilação de sinal do aplicativo ou do celular do pesquisador. A Tabela 1 apresentada os resultados obtidos. Na pesquisa única, 80,7% das previsões foram consideradas assertivas dentro do intervalo proposto ($-2 \leq t \leq +4$), sendo que 6,8% foram previsões onde o veículo passou até 2 min antes do horário previsto e 64,2% onde o veículo passou até 4 min após o horário previsto. Além disso, o percentual da amostra para atrasos maiores do que 5 min (13,7%) mostrou erros significativos recorrentes na pesquisa única, fato que foi levado ao fornecedor do aplicativo para estudo e correção.

Nos resultados obtidos para a pesquisa múltipla (intervalo de previsão entre 4 e 7 min), 83,8% das previsões foram consideradas assertiva no intervalo proposto ($-1 \leq t \leq +3$). As previsões onde o veículo passou em até 3 min depois do horário previsto representaram 60,2% e 5,7% das previsões o veículo passou 1 min antes do previsto. O percentual de viagens previstas que passaram exatamente no horário previsto (0 min) foi superior no caso da pesquisa múltipla, indicando que consultas mais próximas da passagem do veículo são mais precisas e justificando o intervalo de assertividade mais crítico para a consulta múltipla. Esse resultado também pode ser visto analisando a evolução entre a 1ª e a 3ª consulta múltipla, sendo essa última a mais próxima da real passagem do veículo com 20,5% das passagens no horário exato previsto. Considerando os resultados globais, a 3ª consulta foi 1% mais assertiva que as anteriores.

O mapa de calor disponível na Tabela 1 com escala de verde (maior incidência) até vermelho (menor incidência) indica que a maior concentração da amostra (em verde) é condizente com o intervalo de assertividade proposto, salvo as coletas com diferenças maiores do que 5 minutos na pesquisa única. Ainda, verificou-se menor incidência (vermelho) de previsões adiantadas, mais prejudiciais para a confiabilidade do passageiro usuário do aplicativo e de encontro à métrica proposta que penaliza mais os adiantamentos.

Tabela 1: Resultados da Consulta Única e Consulta Múltipla

Consulta Única

Consulta versus Passagem

Diferença (min)	qtd	%	
>5	63	13,7%	
5	22	4,8%	
4	48	10,4%	
3	76	16,5%	
2	82	17,8%	
1	90	19,5%	80,7%
0	45	9,8%	
-1	21	4,6%	
-2	10	2,2%	
-3	3	0,7%	
-4	0	0,0%	
-5	0	0,0%	
<-5	0	0,0%	
NP	1	0,2%	
Total	**461**		

Consulta Múltipla

Acumulado - Consulta versus Passagem

Diferença (min)	qtd	%	
>5	60	3,9%	
5	45	2,9%	
4	90	5,9%	
3	207	13,5%	
2	320	20,8%	
1	397	25,9%	83,8%
0	275	17,9%	
-1	87	5,7%	
-2	18	1,2%	
-3	4	0,3%	
-4	2	0,1%	
-5	0	0,0%	
<-5	0	0,0%	
NA	30	5,8%	
Total	**1.535**		

Por consulta x Passagem

	1ª	*2ª*	*3ª*
-1'	5,7%	5,7%	5,7%
0'	16,0%	17,2%	20,5%
1', 2', 3'	61,7%	60,5%	58,2%
Total	83,4%	83,4%	84,4%

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo a proposição de uma metodologia para avaliação da assertividade das previsões de chegada de ônibus em tempo real utilizando um aplicativo de RTPI, considerando a experiência do usuário como referência central. Para isso, foi desenvolvido um procedimento de coleta em campo com dois tipos de consulta ao aplicativo, simulando os comportamentos dos usuários. Para avaliar a assertividade das previsões, a metodologia propôs intervalos calibrados para refletir a experiência dos usuários. Na consulta múltipla, foi adotado o intervalo de -1 min a 3 min, baseado na literatura encontrada e na real experiência dos usuários, além de possuir uma tolerância menor para veículos adiantados em relação aos atrasados. Já na consulta única, que faz a verificação de veículos mais distantes do ponto de pesquisa, o intervalo definido foi de -2 min a 4 min, considerando a maior incerteza dessas previsões.

O instrumento de pesquisa e os intervalos propostos foram validados em um estudo de caso em Porto Alegre. Os resultados obtidos em ambas as consultas foram de encontro às premissas adotadas. Ainda, a aplicação da metodologia em um estudo de caso reforça o valor da abordagem proposta como ferramenta para gestores públicos e operadores avaliarem a qualidade das informações prestadas por sistemas RTPI, constituindo-se em um instrumento replicável e confiável, permitindo o estabelecimento de níveis de assertividade para diferentes aplicativos e comparando-os diretamente ou ao longo do tempo.

O estudo de caso limitou-se a pontos de pesquisa na Zona Sul de POA, de forma que é importante ressaltar que para o cálculo de assertividade global de um determinado aplicativo, é necessária a realização de coleta em pontos de pesquisa distribuídos na cidade, para garantir homogeneidade na pesquisa. Além disso, para estudos futuros, recomenda-se a realização de pesquisas com usuários de ônibus para definir com maior precisão os limites de tempo considerados aceitáveis para aguardar o ônibus, refinando ainda mais os intervalos de assertividade adotados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arhin, S.; T. Noel (2013) Evaluation of Bus Transit Reliability in the District of Columbia. Journal of Transportation Technologies, v. 3, n. 3, p. 265–274. DOI: 10.4236/jtts.2013.33028

Arhin, S.; T. Noel; G. Ribbiso; C. Anderson-Hall e K. Khisty (2014) Bus stop on-time arrival performance and criteria in a dense urban environment. Journal of Traffic and Transportation Engineering, v. 1, n. 1, p. 54–66. DOI: 10.17265/2328-2142/2014.01.005

Brakewood, C.; S. Barbeau e K. Watkins (2014) An experiment evaluating the impacts of real-time transit information on bus riders in Tampa, Florida. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 69, p. 409–422. DOI: 10.1016/j.tra.2014.09.003

Cats, O. e G. Loutos (2015) Real-Time Bus Arrival Information System: An Empirical Evaluation. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, v. 19, n. 1, p. 1–14. DOI: 10.1080/15472450.2015.1011638

Daskalakis, N. G. e A. Stathopoulos (2008) Users' perceptive evaluation of bus arrival time deviations in stochastic networks. Journal of Public Transportation, v. 11, n. 4, p. 1–16. DOI: 10.5038/2375-0901.11.4.1

Ferraz, S. P. e C. R. Torres (2024) Transporte Público Coletivo Urbano. Campinas: Editora UNICAMP, 1ª ed., 248 p. ISBN: 85-268-0722-2.

Empresa Pública de Transportes e Circulação (EPTC) (2015) Edital de licitação do Sistema Ônibus de Porto Alegre. Porto Alegre.

Jabbari, P.; Y. Ge; J. Tao e D. MacKenzie (2017) Effects of a Public Real-Time Multi-Modal Transportation Information Display on Travel Behavior and Attitudes. *Journal of Public Transportation*, v. 20, n. 2, p. 40–57.

Li, Y.; C. Huang e J. Jiang (2018) Research of Bus Arrival Prediction Model Based on GPS and SVM. Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), p. 5758–5763. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407843

Rashvand, N.; S. S. Hosseini; M. Azarbayjani e H. Tabkhi (2023) Real-Time Bus Arrival Prediction: A Deep Learning Approach for Enhanced Urban Mobility. *Proceedings of the 13th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES 2024)*, p. 123–132. DOI: 10.5220/0012365500003639

Sihag, G.; M. Parida e P. Kumar (2022) Travel Time Prediction for Traveler Information System in Heterogeneous Disordered Traffic Conditions Using GPS Trajectories. Sustainability, v. 14, n. 16, p. 10070.

Sun, Y.; J. C. Spall; W. Wong e X. Zhao (2025) Real-time Bus Travel Time Prediction and Reliability Quantification: A Hybrid Markov Model. *arXiv preprint*, arXiv:2503.05907. DOI: 10.48550/arXiv.2503.05907

TransitApp. (2024). ETA Accuracy Benchmark – documentação de benchmark no GitHub. GitHub. Disponível em: https://github.com/TransitApp/ETA-Accuracy-Benchmark. Acesso em: 27 jun. 2025.

Watkins, K. E.; B. Ferris; A. Borning; G. S. Rutherford e D. Layton (2011) Where is My Bus? Impact of mobile real-time information on the perceived and actual wait time of transit riders. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 45, n. 8, p. 839–848. DOI: 10.1016/j.tra.2011.06.010

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA INTELIGENTE: ANÁLISE COM MÉTODO CONVENCIONAL E BASEADO EM IA NO CONTEXTO DOS PLANOS DE MOBILIDADE URBANA

Isabella Mayara Abreu da Hora, Isabella Martins de Almeida, Matheus Henrique de Sousa Oliveira,
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia

RESUMO
A revisão bibliográfica representa uma etapa importante de qualquer estudo acadêmico, uma vez que fundamenta teoricamente a pesquisaEste artigo propõe uma análise comparativa entre métodos convencionais de revisão bibliográfica e abordagens baseadas em inteligência artificial (IA), aplicadas à literatura científica sobre os desafios na elaboração dos Planos de Mobilidade Urbana (PMUs). A partir de dados extraídos da base Web of Science, entre 2014 e 2024, foram utilizados os softwares Bibliometrix/Biblioshiny no ambiente RStudio e a plataforma SCIspace para investigar tempo de execução, profundidade analítica, facilidade de uso e capacidade de identificação de lacunas. Os resultados mostram que a integração das duas abordagens representa um avanço metodológico significativo, com implicações práticas para pesquisadores e gestores da área de transportes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um bom trabalho acadêmico tem como ponto de partida uma revisão bibliográfica sólida, capaz de contextualizar o problema, identificar lacunas no conhecimento e embasar metodologicamente o estudo (Lakatos e Marconi, 2003; Lima e Mioto, 2008; Rôças e Bonfim, 2018). Tradicionalmente, essa etapa é conduzida por meio de métodos sistemáticos e manuais, muitas vezes apoiados por ferramentas como o Excel, Bibliometrix e o Biblioshiny, que operam em ambientes estatísticos como o RStudio.

Nos últimos anos, ferramentas baseadas em inteligência artificial (IA) têm ganhado espaço no meio acadêmico, oferecendo novas possibilidades para a realização de revisões bibliográficas mais ágeis e exploratórias. Plataformas como SCIspace identificam temas emergentes, conexões ocultas e lacunas de forma automatizada otimizando revisões em grandes volumes de publicações.

Frente a dificuldade da entrega de planos de mobilidade brasileiros e da dificuldade em se fazer cumprir propostas apresentadas em planos de mobilidade desde a criação da Lei n 12587/2012 (BRASIL, 2012; BRASIL, 2015; BRASIL, 2024), este artigo, propõe-se utilizar essas duas abordagens: a convencional e a baseada em IA, na análise da produção científica relacionada aos desafios enfrentados em elaborar e/ou executar Planos de Mobilidade Urbana. Ao avaliar as características, vantagens e limitações de cada método, o estudo busca contribuir para o aprimoramento das práticas de revisão bibliográfica e para a identificação de desafios de diagnósticos e análises no campo do planejamento urbano.

2. METODOLOGIA

Para analisar os desafios relacionados aos Planos de Mobilidade Urbana, adotou-se uma abordagem utilizando dois métodos para a avaliação bibliográfica: um procedimento convencional baseado em bibliometria com auxílio do software RStudio e pacotes como o Bibliometrix/Biblioshiny, e um procedimento baseado em IA utilizando a plataforma SCIspace, com a seguinte dinâmica (Figura 1)

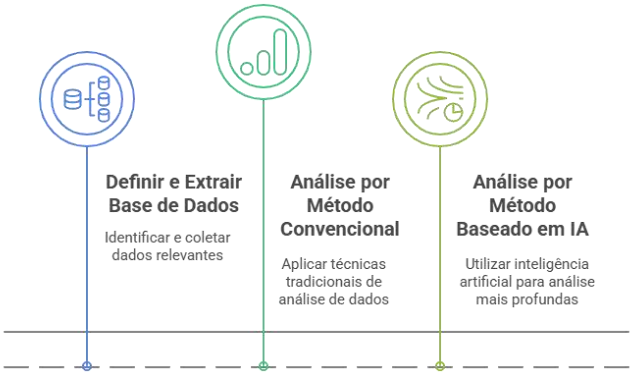


Figura 1: Etapas para análise do tema. Autores com NapkinIA

2.1. Coleta de Dados - Definição dos critérios e extração das bases

O processo de extração de dados ocorreu em junho de 2024 utilizando a base da Web of Science. As palavras-chave utilizadas foram "Urban Mobility Plan*" OR "Sustainable Urban Mobility Plan*" OR "Urban Transport Planning" AND "Implementation barrier*" OR "Challenge*" OR "Limitation*" OR "Obstacle*" OR "Critical factor*" OR "Policy barrier*" OR "Governance issue*" OR "Data limitation*" AND "Efficiency" OR "Performance" OR "Effectiveness" OR "Evaluation" OR "Monitoring" OR "Assessment", com essa combinação foram encontrados 40 trabalhos. Aplicando filtros temporais, com menos 10 anos (2014-2025), restaram 23 artigos. A partir disso, os dados foram extraídos para serem analisados.

Os dados foram exportados em formato .bib e utilizados nos dois métodos analíticos: o convencional e o baseado em IA.

Como critério de comparação entre os dois métodos, levou-se em consideração alguns critérios, como: Tempo de processamento; profundidade das informações; qualidade dos resultados; domínio da ferramenta; e capacidade de identificação de lacunas.

2.2. Procedimento convencional: análise bibliométrica via RStudio

Para as análises pretendidas, os dados foram analisados no formato .bib, permitindo sua utilização nos pacotes Bibliometrix e Biblioshiny no ambiente RStudio (Aria e Cuccurullo, 2017).

As análises realizadas na ferramenta incluem: frequência de palavras-chave; autores mais produtivos, evolução temporal das publicações; localização geográfica das contribuições.

2.3. Procedimento baseado em IA: análise via SCIspace

Para a utilização da ferramenta do SCIspace foi necessário encontrar os trabalhos em sua íntegra, ou seja, os artigos por completo, o que permite extrair da ferramenta análises mais profundas, baseadas no conteúdo do documento. Para isto, foram processados os mesmos dados do escopo inicial, que totalizaram 23 artigos.
Com isso, foram dados comandos de prompts para a IA com o objetivo de obter informações semelhantes da análise com RStudio.

3. RESULTADOS

Nesta seção busca-se explorar os principais achados pelo RStudio que permitem analisar, tendências, lacunas e outras informações relevantes no que diz respeito a publicações e situações de impacto sobre o tema.

3.1. Análise descritiva dos dados

Para os dois métodos a análise utilizou o total dos 23 artigos. A ferramenta de IA utilizada não identificou os principais periódicos sobre este tema, no entanto a análise apresentada pela RStudio apresenta em formato gráfico (Figura 2) o agrupamento de artigos por periódico, análise importante para identificação de periódicos de impactos sobre a discussão do assunto estudado.

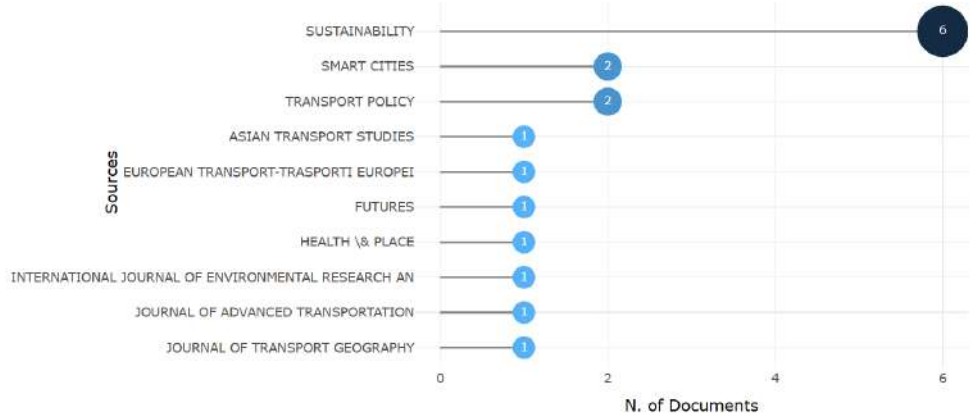


Figura 2: Principais Periódicos Identificados. Autores com RStudio

Na análise dos principais autores, a IA reconheceu como os principais autores, apenas os autores que foram identificados por meio da declaração de contribuição de autoria, através do índice do CrediT, foram eles: Hediye Tuydes-Yaman; Gulcin Dalkic-Melek; Kristiana Chakarova e Asli Sezer Ozcelik. Já a ferramenta do RStudio os classifica de acordo com o número de trabalhos publicados, além de ser possível avaliar o impacto local desses autores, também é possível visualizar o número total de citações acumuladas por cada autor ao longo dos anos, conforme Figura 3:

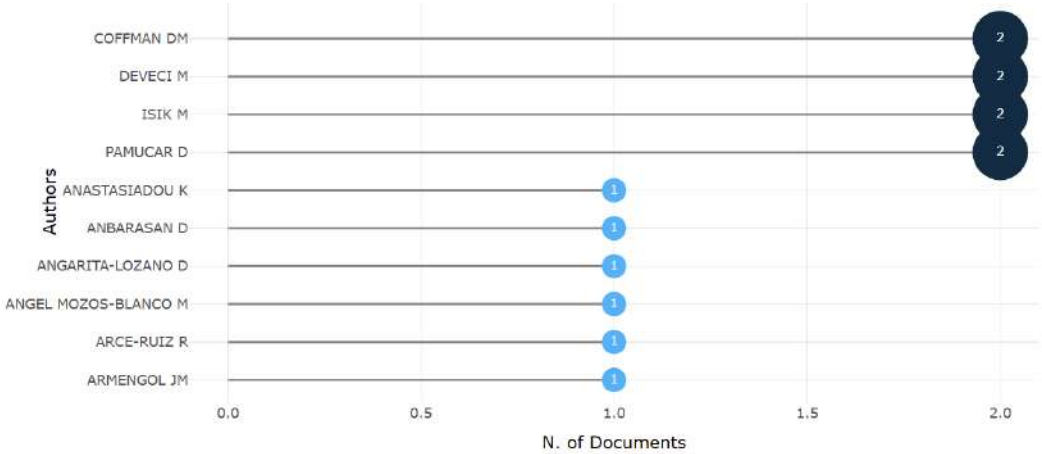


Figura 3: Principais Autores identificados. Autores com RStudio

Observam-se divergências nos resultados: a IA baseia-se no índice CrediT; já o RStudio considera volume e impacto das publicações.

3.2. Identificação de lacunas

Na análise das lacunas sobre o tema, é possível identificar através do gráfico gerado pelo RStudio (Figura 4) que embora o transporte urbano se destaque como eixo estruturante da pesquisa, existem lacunas significativas relacionadas aos impactos climáticos e ambientais. Os temas “cities”, “climate change” e “impacts”, situados como Basic Themes, indicam alta relevância, mas em termos, menor grau de desenvolvimento, apontando a necessidade de aprofundar metodologias que integrem políticas de mobilidade urbana às metas climáticas. Além disso, tópicos como “transit”, “travel” e “benefits” aparecem como Emerging or Declining Themes, sugerindo oportunidades de revitalizar discussões sobre os benefícios sociais e econômicos do transporte coletivo, especialmente no contexto pós-pandemia, por exemplo.

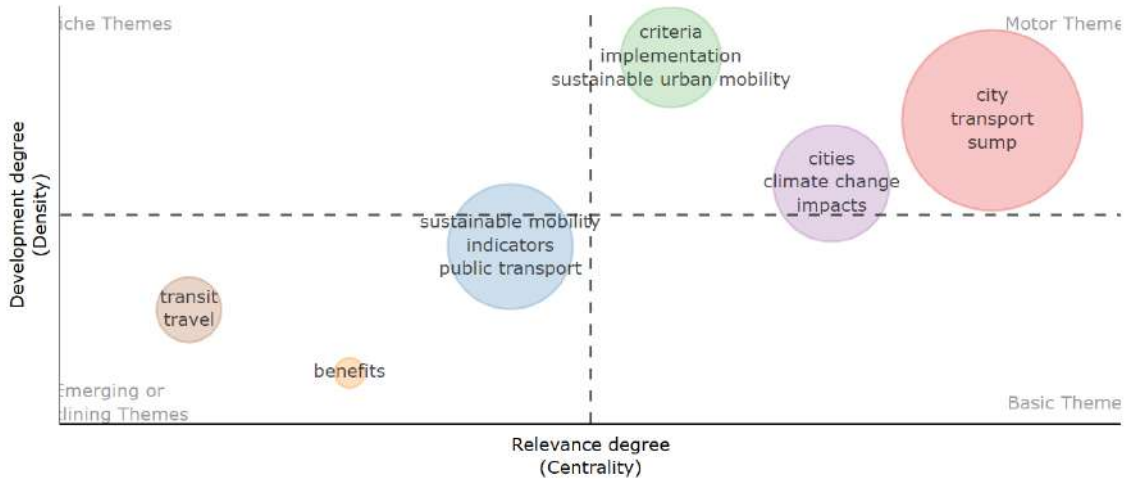


Figura 4: Mapa Temático. Autores com RStudio

Enquanto o SCIspace identifica que há diversas lacunas complementares aos trabalhos existentes que são importantes de serem identificadas, entre elas:

- (i) modelagem de preferências do usuário com variáveis latentes;

- (ii) avaliações utilizando novas ferramentas e métricas de acordo com a realidade local;
- (iii) análise de fatores além de tempo/preço, como segurança, conforto e valores culturais.

Nota-se que, nos resultados obtidos através da IA os resultados são mais completos e possuem aprofundamento sobre o tema mais abrangente, já na análise convencional o RStudio apresenta os resultados de forma objetiva e pontual que deve ser interpretada em cada caso.

3.3. Métodos Comparados

A análise dos resultados a partir dos critérios pré-estabelecidos permite avaliar o nível de resposta para cada abordagem, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Análise dos critérios adotados em relação ao tipo de abordagem.

Critério	RStudio	SCISpace
Tempo de processamento	Moderada	Baixa
Identificação de Lacunas	Baixa	Alta
Complexidade da ferramenta	Moderada/alta	Baixa
Riqueza em detalhes	Baixa	Alta
Questões Especificas	Baixa	Alta
Capacidade de Interpretação	Alta	Baixa

A IA destacou-se na análise de conteúdo textual, permitindo interpretações mais subjetivas e temáticas. Já o método tradicional, com base em metadados, demonstrou maior precisão quantitativa e replicabilidade.

4. DISCUSSÃO

A partir dos resultados, pode-se afirmar que utilizar o RStudio dispende de um conhecimento intermediário do programa e de comandos principais para extração de resultados como: mapas temáticos, palavras mais citadas, locais de publicação, autores frequentes.

Por outro lado, a ferramenta de IA se apresenta em uma interface mais simples e intuitiva, os comandos podem ser aplicados de forma menos convencional, e sem necessidade de conhecimento em linguagem computacional, como no RStudio, conferindo a ferramenta mais acessibilidade e a utilização por qualquer público. Além disso, o RStudio oferece resultados mais visuais.

A IA apresentou maior profundidade na análise temática, facilitando a extração de achados científicos e metodologias. Para as palavras-chave utilizadas, destacam-se dentre os principais resultados, algumas similaridades referentes às lacunas encontradas por meio de inteligência artificial. No trabalho de Baltazar et. al (2024) e Dong et. al (2025), sabe-se que ambos os estudos destacam a falta de estruturas abrangentes que integrem várias dimensões, como aspectos ambientais e de governança, no planejamento da mobilidade, particularmente no contexto de países em desenvolvimento e autoridades locais, além disso, identificou-se que os autores sugerem que as avaliações existentes não capturam adequadamente as complexidades dos desafios da mobilidade urbana e as perspectivas dos cidadãos. Com isso, em Lozano et. al (2025) e Baltazar et. al (2024), pôde-se encontrar uma ênfase comum na necessidade de metodologias aprimoradas que levem em conta tanto os fatores psicológicos subjetivos quanto os atributos objetivos na compreensão das preferências e comportamentos do usuário no planejamento de transporte.

Ainda com o uso de IA, foi possível identificar rapidamente nestes trabalhos os principais desafios na elaboração de planos de mobilidade, como: falta de monitoramento abrangente; detalhes insuficientes nas propostas; Problemas de qualidade e adaptação; Duplicação de objetivos e Inconsistências legais e estruturais. Vale mencionar que a ferramenta de IA escolhida, limitou-se a análise textual completa dos trabalhos (pdfs completos), já que a análise do método convencional utiliza o resumo das principais informações extraídas da base de dados escolhida, que inclui: autores, títulos, resumo, local de publicação, filiação dos autores, ano de

publicação entre outros.

4. CONCLUSÃO

Em síntese, os dois métodos apresentaram abordagens complementares e a combinação dos dois amplia a capacidade de diagnóstico da literatura científica.

Notou-se para análises bibliográficas, que a ferramenta de IA foi complementar as extrações obtidas nas análises convencionais, sendo importante aliada para a análise de grande volume de dados. No caso da temática pesquisada, essas ferramentas auxiliam na análise de diagnósticos de políticas públicas e planos de mobilidade de impacto, bem como no conhecimento de estudos e pesquisas realizadas em vários países do mundo.

Ressalta-se ainda como resultado, que a integração das ferramentas significou um ganho potencial para entendimento do escopo e trabalhos relacionados, realizando a triagem e as análises iniciais do escopo, com o RStudio e o aprofundamento da análise com IA, isso representa um passo importante para entender os desafios e lacunas do tema na literatura internacional de forma mais sistemática e eficiente.

Conclui-se que a integração dos métodos facilita o diagnóstico de lacunas e aprimora a revisão bibliográfica. Vale ressaltar ainda, que a IA não substitui a análise humana, mas representa um auxílio para criação de fichas catalográficas de análise bibliográfica de escopos robustos que precisam analisar e estudar assuntos e situações específicas de análise. Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a comparação com outras IA a fim de observar se os achados encontrados são de fato semelhantes em outras ferramentas, permitindo maior credibilidade nos resultados obtidos.

Agradecimentos

Caso haja necessidade de se fazer referência a alguma instituição de apoio à pesquisa, deve-se fazê-lo sob a forma de um agradecimento, nesta parte do texto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angarita-Lozano, D.; Hidalgo-Guerrero, D.; Díaz-Márquez, S.; Morales-Puentes, M.; MendozaMoreno, M.A. Multidimensional Evaluation Model for Sustainable and Smart Urban Mobility in Global South Cities: A Citizen-Centred Comprehensive Framework. Sustainability 2025, 17, 4684. https://doi.org/10.3390/su17104684

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, 11(4), 959-975.

Baltazar, J., Bouillass, G., Vallet, F., Puchinger, J. e Perry, N. (2024) Integrating environmental issues into the design of mobility plans: Insights from French practices. Transport Policy 155 (2024) 1–14. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.06.019

BRASIL (2015). O desafio da mobilidade Urbana Disponível em:< https://www2.camara.leg.br/a-camara/estruturaadm/altosestudos/pdf/desafio_mobilidade_conle.pdf>

BRASIL (2024). DADOS ABERTOS: Painel de Monitoramento de Dados Abertos do Poder Executivo Federal. Disponível em: < https://www.gov.br/cgu/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis/arquivos/sobre_pda.pdf>

BRASIL. Lei Federal nº 12.587/12. Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, Brasília/DF, 03 janeiro de 2012.

LAKATOS, E. M. e MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

Lima, T. C. S. e Mioto, R. C. T. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. Rev. katálysis 10 (spe) • 2007 • https://doi.org/10.1590/S1414-49802007000300004

Rôças, G e Bonfim, A. M. (2018) Do embate à construção do conhecimento: a importância do debate científico. Ciênc. educ. (Bauru) 24 (1) • Jan-Mar 2018 • https://doi.org/10.1590/1516-731320180010001

Zhiwu Dong, Z., Chen, C., Ouyang, J., Yan, X., Liao, C., Chen, X. e Lee, D. (2025). Understanding commuter preferences for shared autonomous electric vehicles in first-mile-last-mile scenario. Transportation Research Part D 140 (2025) 104621. https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104621

Isabella Mayara Abreu da Hora (isabelladahora@pet.coppe.ufrj.br)
Isabella de Almeida Martins (isabellamartins@pet.coppe.ufrj.br)
Matheus Henrique de Sousa Oliveira (matheus@pet.coppe.ufrj.br)
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Departamento de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030 Ilha do Fundão – Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-594

STREET NETWORK SUSCEPTIBILITY TO FLOODING BASED ON THE HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND) MODEL: A CASE STUDY IN SALVADOR, BRAZIL

Marcella Sgura Viana[1], **Jorge Ubirajara Pedreira Junior**[1], **Julio Pedrassoli**[2], **Karla Esquerre**[1]
[1]Universidade Federal da Bahia, [2]Western Michigan University

ABSTRACT
This paper assesses the susceptibility of street network connectivity to flooding in Salvador, Brazil, using the HAND (Height Above Nearest Drainage) model overlaid with OpenStreetMap street network data. Three flood thresholds (HAND ≤ 1m, ≤ 3m, and ≤ 5m) were defined to simulate network degradation by removing street segments intersecting flood-prone areas. Degree centrality was calculated for each network scenario and spatially aggregated at the neighborhood level to quantify connectivity loss. Results reveal severe impacts in specific areas, such as the neighborhood of Santa Luzia, which experienced a 44.8% reduction in degree centrality under the HAND ≤ 1m scenario. Additionally, high-impact clusters of connectivity loss emerged in the Itapagipe Peninsula and the valley zones surrounding the Rio Vermelho neighborhood. The study offers actionable insights to support urban flood preparedness and the design of targeted response strategies in structurally fragile and socially exposed areas.

1. INTRODUCTION

In recent years, there has been a significant increase in the number of natural disasters worldwide, especially those related to climate change, such as flash floods, wildfires, and storms. The Sixth IPCC Assessment Report (AR6) confirms that global temperatures have already risen by 1.1°C above pre-industrial levels, intensifying such events (IPCC, 2023). Specifically, urban flood events severely impact mobility, compromising the integrity of transport infrastructure, especially in the peripheral regions of large Brazilian cities. The heavy rains and flooding in Rio Grande do Sul in May 2024 highlighted the fragility of transport infrastructure not only in urban areas but also across the regional and state road networks: essential infrastructure was partially or completely damaged. Flooded roads and bridges isolated several cities. Nearly 140 stretches of 60 highways were completely or partially closed. Major power and water outages affected more than 1.4 million people across the region. About 48 cities were left without telecommunications or internet services. Flights at Porto Alegre's main international airport, Salgado Filho International Airport, were suspended until October (ACAPS, 2024).

The vulnerability of transportation infrastructure results from the interaction between topography, poor drainage infrastructure, and unplanned urban occupation. To assess these impacts, graph theory-based approaches have proven promising (Morelli, 2021). Graph Theory, established by Euler's work in the 18th century, has evolved significantly over the 20th century with fundamental contributions from studies such as Bollobás (1998) and Newman (2010). This theory provides a mathematical framework to model relationships between entities through nodes (vertices) and connections (edges), enabling the analysis of the topology and functionality of complex networks. Urban infrastructure networks, such as transport, energy, and communication, are classically represented as graphs, given their interconnected structure and dependence on connectivity between elements.

In the specific case of road infrastructure, modeling the network as a graph allows for quantifying features such as connectivity (degree of linkage between nodes), continuity (ease of movement between pairs of nodes), accessibility (average proximity to other nodes), and centrality (structural importance of each node or edge). Newman (2010) emphasizes that these metrics enable the assessment of structural vulnerability, robustness to failures, and network efficiency. In the context of natural disasters such as floods, the degradation of connectivity may compromise evacuation routes and emergency logistics.

Recent studies have demonstrated the effectiveness of the degree centrality metric in assessing connectivity losses in networks subjected to flooding. Degree centrality measures the number of direct connections (edges) that a given node has with other nodes in the network and is typically normalized by dividing this value by the total number of nodes, allowing comparability across networks of different sizes. For example, Ma et al. (2022) used this metric to measure the functional collapse of urban communities after flood events, while Zhu et al. (2025) highlighted the role of degree centrality in the resilience of integrated bus and subway networks in Zhengzhou (China). Additionally, analyses such as those by Wang et al. (2019) underline that high-degree

nodes are the first to fail during urban floods, causing exponential degradation of connectivity.

Considering this background, the present study aims to assess the connectivity of the street network in Salvador, Brazil, under different flood risk thresholds derived from the HAND (Height Above Nearest Drainage) model (Nobre et al., 2011a). The model's strengths lie in its conceptual simplicity, low computational demand, and reliance on freely available elevation data such as the digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The HAND model is particularly suited for identifying flood-prone areas in populated urban settings, without the need for rainfall data or complex calibration procedures.

Evidence from previous studies reinforces the reliability of the HAND model. Thalakkottukara et al. (2024) showed that HAND-based flood maps were comparable to those produced by the more resource-intensive HEC-RAS 2D model in Michigan (USA). Tools like InundatEd (Chaudhuri et al., 2021) integrate the HAND model into web-GIS platforms for rapid scenario generation. In Brazil, the model has been effectively applied in cities such as São Luiz do Paraitinga (Santos et al., 2021). These applications support the use of the HAND model in this study, allowing for lightweight and reproducible simulations across multiple flood risk thresholds.

2. MATERIALS AND METHOD

The methodological approach adopted in this study comprised geospatial data processing, network modeling, and spatial analysis. First, the street network of the municipality of Salvador was extracted from the OpenStreetMap database using the OSMnx library for Python (Boeing, 2017), which allows the acquisition and modeling of street networks. This extraction included all streets accessible to both vehicles and pedestrians, as provided by this openly available data source.

Then, the HAND raster used in this study was obtained from the global dataset produced by Donchyts et al. (2016). This global-scale dataset was computed using high-resolution elevation data, primarily the one arc-second (~30m) version of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), complemented by the 90m Viewfinder Panoramas DEM to fill gaps in high-latitude regions where SRTM data is unavailable. To enable large-scale processing, the authors developed a homogenized, equal-area version of the HydroBASINS catchments, which was used to delineate drainage networks using a D8 flow direction method. The HAND values were computed using the PCRaster software on the Google Compute Engine parallel platform, resulting in a consistent and high-resolution global HAND product suitable for hydrological and hazard assessment applications. This precomputed raster was clipped to the study area and used as the basis for defining flood risk thresholds.

Using the HAND raster as a reference, three flood risk thresholds were established (HAND $\leq$ 1m, $\leq$ 3m, and $\leq$ 5m), simulating varying levels of exposure to flood-related degradation. For each threshold, a degraded version of the original street network was generated by removing all edges that intersected HAND pixels with values equal to or lower than the specified cutoff. These degraded graphs represented scenarios of potential disconnection due to flooding.

Finally, for each version of the network, the degree centrality of all nodes was computed. Once computed, the node-level degree centrality values were spatially aggregated by administrative neighborhood, allowing for the calculation of the average degree centrality per neighborhood in each of the four network scenarios (original, HAND $\leq$ 1m, HAND $\leq$ 3m, and HAND $\leq$ 5m). An exploratory analysis was then conducted to evaluate the reduction in average degree centrality resulting from each degradation scenario, using the original network as a baseline.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 presents the spatial distribution of average degree centrality (DC) degradation across Salvador's neighborhoods under the three HAND-based flood risk scenarios ($\leq$1m, $\leq$3m, and $\leq$5m). The maps reveal a

progressive intensification of network connectivity loss as the HAND threshold increases, with darker tones indicating neighborhoods experiencing higher reductions in node connectivity. The HAND ≤1m scenario already shows substantial disruptions in specific areas, which are further exacerbated under the 3m and 5m thresholds. These patterns highlight spatial disparities in susceptibility to flooding and the structural vulnerability of the street network in low-lying regions.

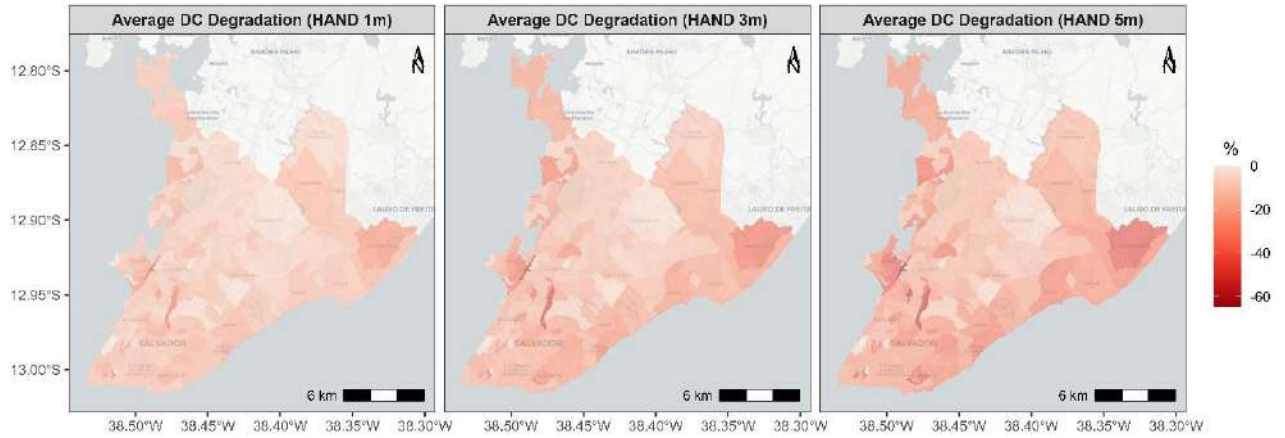


Figure 1: Maps of average degree centrality (DC) degradation for different HAND values in Salvador

Table 1 summarizes the ten neighborhoods with the highest average degree centrality (DC) reduction under the HAND ≤ 1m scenario, along with their population and population density. Santa Luzia stands out as the most affected area, with a 44.8% reduction in connectivity, followed by Calabar (38.4%) and Retiro (36.5%). The standard deviation of connectivity loss across all neighborhoods increases with the flood threshold: 7.3 % for HAND ≤ 1m, 10.2 % for HAND ≤ 3m, and 12.0 % for HAND ≤ 5m, indicating growing spatial heterogeneity in network degradation as flood exposure intensifies.

Table 1: Top 10 neighborhoods with the highest degree centrality loss regarding the HAND ≤ 1m threshold

Neighborhood	Population	Population density (inhab./ha)	DC reduction (1m Degradation)	DC reduction (3m Degradation)	DC reduction (5m Degradation)
Santa Luzia	5642	150,3	44,8 %	59,7 %	64,4 %
Calabar	6046	430,1	38,4 %	43,9 %	51,4 %
Retiro	754	6,7	36,5 %	52,1 %	56,2 %
Santa Mônica	4677	165,9	29,6 %	41,2 %	56,1 %
Chame-Chame	2187	148,6	29,0 %	31,0 %	48,5 %
Aeroporto	0	0,0	28,6 %	39,2 %	46,9 %
Calçada	3961	55,8	28,3 %	37,9 %	43,1 %
Massaranduba	16294	294,8	26,3 %	38,7 %	48,2 %
Saramandaia	9879	317,2	24,2 %	34,3 %	39,7 %
Baixa de Quintas	1459	61,1	23,2 %	34,8 %	36,6 %

Legend: DC: degree centrality

The analysis of connectivity loss under the HAND ≤ 1m scenario reveals a critical spatial cluster in the Itapagipe Peninsula, one of the most vulnerable areas in the city. Neighborhoods such as Santa Luzia (-44.8%), Calçada (-28.3%), Massaranduba (-26.3%), and Uruguai (-22.4%) experienced the most severe reductions in average degree centrality. These neighborhoods occupy coastal land that was progressively reclaimed from the bay through successive infill projects, leaving a terrain that, despite its artificial elevation, remains barely above sea level and therefore acutely vulnerable to inundation.

A second critical cluster was identified in the consolidated urban area near the Rio Vermelho valley. The neighborhoods of Chapada do Rio Vermelho (-21.2%), Vale das Pedrinhas (-20.2%), and Santa Cruz (-20.2%) form a contiguous zone of high susceptibility, suggesting a shared vulnerability likely related to valley-floor settlement patterns and limited redundancy in street connections. These findings highlight the relevance of topographic depressions and hydrological corridors in shaping urban flood risk.

In addition to these clusters, several isolated neighborhoods emerged with significantly high levels of connectivity loss, suggesting localized infrastructure weaknesses. Calabar (-38.4%), Retiro (-36.5%), Santa Mônica (-29.6%), Aeroporto (-28.6%), Chame Chame (-29.0%), Saramandaia (-24.2%), Baixa de Quintas (-23.2%), Tororó (-22.2%), and Periperi (-21.8%) exhibited marked declines in node degree centrality. These cases suggest that even outside major clusters, some neighborhoods possess inherently vulnerable street networks.

Conversely, the central-northern area of the city, commonly referred to as the “Miolo” and located between the BR-324 highway and Luís Viana Filho Avenue, showed comparatively lower reductions in centrality. The combination of local catchment configurations, terrain elevation, and the spatial arrangement of the street network in this region appears to result in limited exposure to network disruption. These findings suggest that, under the HAND-based thresholds adopted in this study, the structural impact of flooding on network connectivity in this area is not particularly significant.

To further explore the relationship between network vulnerability and demographic characteristics, Figure 2 presents scatterplots comparing the reduction in degree centrality under the HAND 1m scenario with total population (left) and population density (right). These plots reveal that some of the most affected neighborhoods are not necessarily the most populous, but can be densely populated, such as Calabar, which could pose serious challenges in evacuation scenarios due to high concentrations of people in structurally compromised areas. In such contexts, high density may exacerbate evacuation difficulties by increasing congestion, delaying response times, and overwhelming limited access routes.

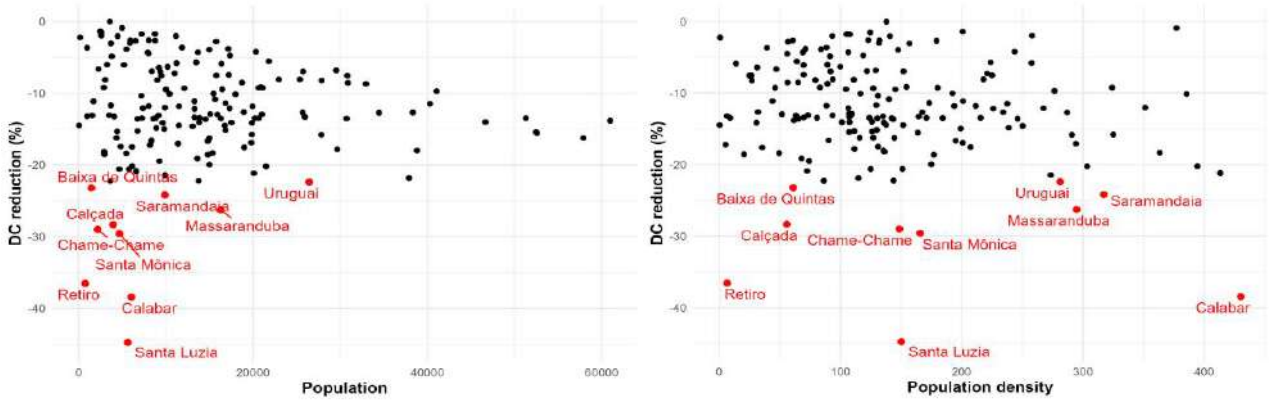


Figure 2: Scatterplots of degree centrality (DC) reduction (%) vs. population indicators

4. CONCLUSIONS

This study presented a methodological approach based on complex network theory and geospatial data to assess the potential impacts of flooding on the road network connectivity of Salvador, Brazil. Using the HAND model to simulate three risk scenarios (1m, 3m, and 5m), it was possible to clearly identify the effects of network degradation on the structure of the urban street system.

The main contribution of this study lies in the articulation of urban data science, network topology, and spatial analysis, leveraging open data and accessible computational tools. This approach is replicable in other

Brazilian cities and serves as a valuable diagnostic instrument for anticipating the effects of climate change. It offers practical support for decision-making in urban planning, transport infrastructure, and mobility policy.

Future research should focus on integrating social and economic indicators into the topological analysis, thereby broadening the scope of vulnerability assessments. It is also recommended to apply the methodology to other urban regions with distinct territorial configurations, to test additional network metrics, such as robustness and global efficiency, and to incorporate real-time precipitation data and monitoring systems to refine the simulated scenarios.

In the short term, this type of analysis can support civil defense agencies and transport authorities in prioritizing investments in critical areas, designing contingency plans, and improving evacuation routes in flood-prone neighborhoods.

REFERENCES

ACAPS, (2024). Briefing Note: Brazil – Floods in Rio Grande do Sul. Available at: https://www.acaps.org/fileadmin/Data_Product/Main_media/20240514_ACAPS_Briefing_note_Brazil_-_Floods_in_Rio_Grande_do_Sul.pdf. Acessed: July 7, 2025.

Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126–139. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004

Bollobás, B. (1998). Modern graph theory (Vol. 184). Springer Science & Business Media.

Chaudhuri, C., Gray, A., & Robertson, C. (2021). InundatEd-v1. 0: A height above nearest drainage (HAND)-based flood risk modeling system using a discrete global grid system. *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3295-3315.

Donchyts, G., Winsemius, H., Schellekens, J., Erickson, T., Gao, H., Savenije, H., & van de Giesen, N. (2016). Global 30m height above the nearest drainage. DOI: 10.13140/RG.2.1.3956.8880.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Available in <https://www.unep.org/resources/report/climate-change-2023-synthesis-report.>. Accessed: June 21, 2025.

Ma, L., Huang, D., Jiang, X., & Huang, X. (2022). Analysis of influencing factors of urban community function loss in China under flood disaster based on social network analysis model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 11094. DOI: 10.3390/ijerph191711094

Morelli, A. B., & Cunha, A. L. (2021). Measuring urban road network vulnerability to extreme events: An application for urban floods. *Transportation Research part D: Transport and Environment*, 93, 102770. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102770

Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford University Press.

Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M. et al 2011a. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology,* 404, 13–29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051

Santos, E. D. S., Pinheiro, H. S. K., & Gallo, H. (2021). Height above the nearest drainage to predict flooding areas in são Luiz do Paraitinga, são Paulo. *Floresta e Ambiente*, 28(2), e20200070. DOI: 10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0070

Thalakkottukara, N. T., Thomas, J., Watkins, M. K., Holland, B. C., Oommen, T., & Grover, H. (2024). Suitability of the height above nearest drainage (HAND) model for flood inundation mapping in data-scarce regions: a comparative analysis with hydrodynamic models. *Earth Science Informatics*, 17(3), 1907-1921. DOI: 10.1007/s12145-023-01218-x

Wang, W., Yang, S., Stanley, H. E., & Gao, J. (2019). Local floods induce large-scale abrupt failures of road networks. *Nature communications*, 10(1), 2114. DOI: 10.1038/s41467-019-10063-w

Zhu, T., Li, H., Wu, Y., Jiang, Y., Pan, J., & Dai, Z. (2025). Resilience Assessment of Urban Bus–Metro Hybrid Networks in Flood Disasters: A Case Study of Zhengzhou, China. *Sustainability*, 17(10), 4591. DOI: 10.3390/su17104591

Jorge Ubirajara Pedreira Junior (jorge.ubirajara@ufba.br)
Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia - Rua Aristides Novis, 2 – Salvador (BA), Brasil

TRACK ELEVATION: UM PROCESSO ESCALÁVEL PARA OBTENÇÃO DE PERFIS ALTIMÉTRICOS UTILIZANDO MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO *OPEN SOURCE*

Luciana M. Cardoso[1], **Rafael Z. Frantz**[1], **Luiz Antônio Rasia**[1], **Sandro Sawicki**[1], **Fabrícia Roos-Frantz**[1]
[1]Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ)

RESUMO
As cidades enfrentam desafios na busca do desenvolvimento urbano sustentável e tem as Tecnologias de Informação e Comunicação como aliadas para resolver os problemas urbanos. Em relação a mobilidade urbana os maiores problemas são o aumento de acidentes de trânsito, congestionamentos e a poluição atmosférica, estes problemas afetam negativamente a população e a economia. Este artigo apresenta o *Track Elevation*, um processo escalável para a obtenção de perfis altimétricos utilizando Modelos Digitais de Elevação *Open Source* e técnicas de otimização, com o objetivo de viabilizar a aplicação deste processo em larga escala e com baixo custo. Os resultados obtidos pela aplicação do processo, quando comparados a dados reais de GPS demonstram que o processo proposto possui potencial para ser implementado como uma ferramenta de um sistema inteligente, impactando positivamente no planejamento de linhas de ônibus para reduzir o consumo de combustível e emissões de poluentes.

1. INTRODUÇÃO

Uma cidade inteligente utiliza tecnologia e capital humano para promover desenvolvimento sustentável em diferentes dimensões como: economia, meio ambiente, sociedade, governança, mobilidade e transporte, planejamento urbano e territorial (International, 2019). Apesar de ser uma prioridade no planejamento urbano brasileiro e de haver políticas públicas para garantir o acesso universal às cidades, a mobilidade urbana enfrenta sérios problemas, como o aumento dos acidentes de trânsito, congestionamentos e poluição atmosférica (Carvalho, 2016). Estes fatores afetam negativamente a população e a economia, de tal modo que, em 2021, segundo Potenza et al. (2023) o setor de transportes foi responsável pela emissão de 203,8 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2).

Nas cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes 28% dos deslocamentos são feitos por transporte público coletivo, sendo o ônibus o meio de transporte mais utilizado representando 85,7% das viagens desse modal (ANTP, 2018). Embora esse modal seja considerado sustentável, as emissões geradas por suas frotas, são em sua grande maioria movidas a diesel e não devem ser negligenciadas. As principais influências no consumo de combustível e emissões estão relacionadas as características do veículo, as condições climáticas, a trajetória, a geometria, a inclinação da rodovia, ao tráfego e a operação (Zhang, 2023). Para que um sistema de mobilidade inteligente seja eficaz é essencial a utilização das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) para coletar sugestões dos cidadãos, ou coletar dados de operação de transporte para otimizar os fluxos de tráfego ou as rotas de transporte público. Os aspectos mais importantes de uma mobilidade inteligente são a redução da poluição, dos congestionamentos e dos custos de operação, bem como, a melhoria do tráfego e o aumento da segurança (Benevolo, Dameri e D'auria, 2016). A inclinação do terreno exerce influência significativa no consumo energético, no uso de combustível e nas emissões do transporte público. Nesse contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como os sensores orbitais, as tecnologias *Light Detection and Ranging* (LiDAR), e os Modelos Digitais de Elevação (MDE) se configuram como ferramentas úteis para a otimização de sistemas de mobilidade inteligente, nas quais a confiabilidade das previsões obtidas depende da resolução dos dados geoespaciais empregados. A ampla cobertura dos modelos MDE combinada à crescente disponibilidade de dados geoespaciais *Open Source* tornam seu uso particularmente relevantes para aplicações no planejamento da mobilidade urbana (Graser, Asamer e Ponweiser, 2015; Martin et al., 2023).

Diversos estudos têm explorado o uso de tecnologias onde dados geoespaciais são aliados ao planejamento do transporte e contribuem para soluções mais sustentáveis. Wang et al. (2021) propuseram um método para a geração automática de redes rodoviárias 3D complexas e em grande escala utilizando dados SIG *Open Source* como, imagens de satélite, dados de elevação e informações bidimensionais (2D) do eixo central das vias. Em outro trabalho, os autores Lei e Lei (2024) desenvolveram uma abordagem para integrar automaticamente redes viárias extraídas de imagens de satélite com dados vetoriais de SIG, visando à atualização de bases cartográficas. Para isso, combinaram redes neurais do tipo Res-UNET com modelos de otimização, o que permitiu maior precisão na fusão dos dados. Gonzalez, Jayakumar e Iagnemma (2016) desenvolveram seu estudo no campo da modelagem de relevo utilizando Modelos Digitais de Terreno (MDT) como base para uma metodologia que combina a dimensão fractal e a amplitude de elevação na segmentação do terreno, usando o

algoritmo *K-means*, o objetivo foi garantir a estacionariedade dos variogramas locais, aprimorando, assim, a interpolação por Krigagem ordinária. Em relação à estimativa do consumo energético de ônibus, Magrath e Brady (2017) propuseram um modelo físico que considera variáveis como velocidade, carga de passageiros, inclinação da via e eficiência do sistema. O estudo utilizou quatro fontes de dados de altitude o OMNIplus, GPS, DS-SRTM e DSM-BUND, foi utilizada interpolação linear, para correção de ruídos, aos dados do DSM-BUND. Já Graser, Asamer e Ponweiser (2015) destacaram a importância da qualidade dos modelos MDE e dos métodos de amostragem vizinho mais próximo, bi linear e bi cúbico na estimativa do consumo energético de veículos elétricos. O estudo foi conduzido em duas regiões contrastantes Viena e Imst na Áustria, evidenciando que a energia necessária para vencer desníveis topográficos é um fator crítico para a acurácia dessas estimativas. Por fim, Martin et al. (2023) investigaram cinco métodos distintos para estimar a inclinação de vias em Sistemas Avançados de Transporte por ônibus com foco em custo, escalabilidade e precisão; as abordagens avaliadas incluíram ainda, o uso de acelerômetros veiculares, interpolação bi linear de dados de modelos MDE, análise de perfil altimétrico a partir de modelos MDE com aplicação de filtros de suavização (média móvel, *Savitzky-Golay* e interpolação *spline*), execuções repetidas com regressão linear para redução de ruído e a combinação de múltiplas execuções com as técnicas de suavização estatística.

Um sistema de mobilidade inteligente deve proporcionar suporte tecnológico à tomada de decisões estratégicas. Para isso, é necessário primeiramente, obter os perfis altimétricos das linhas de transporte público urbano, pois a inclinação do terreno tem uma forte influência no desempenho dos veículos. Conhecer o perfil altimétrico é essencial para enfrentar problemas do transporte público, tais como a otimização das linhas de ônibus, a redução do consumo de combustível e a diminuição das emissões de gases poluentes. A geração desses perfis altimétricos pode ser viabilizada por meio do uso dos sistemas SIG. Utilizar estas tecnologias, contribui para se ter sistemas de transporte público mais eficientes e cidades mais sustentáveis. Diante desse contexto, neste artigo, apresentamos o *Track Elevation*, um processo escalável para calcular perfis altimétricos e localizar, sobre esses perfis, as paradas das linhas de ônibus utilizando modelos MDE. As coordenadas geográficas foram extraídas com o auxílio da versão gratuita do *software Google Earth* e combinadas a dados de elevação provenientes de arquivos *raster* georreferenciados (*GeoTIFF*) com resolução espacial de 30 m, conforme a disponibilidade dos modelos MDE da região, obtidos por meio da API *OpenTopography*. Para reduzir o ruído altimétrico, foi empregado a interpolação bi linear, suavização das curvas utilizando o filtro *Savitzky-Golay* e interpolação *spline*. A validação do processo proposto foi realizada por meio da comparação entre os resultados gerados pelo *Track Elevation* e os dados coletados em campo com auxílio de receptores GPS, utilizando métricas estatísticas como o Erro Quadrático Médio, Erro Médio Absoluto, Erro Máximo, Desvio Padrão Ponto-a-Ponto e a Redução de Ruído. Dessa forma, o *Track Elevation* representa uma alternativa viável, de baixo custo, com alto potencial de escalabilidade, aplicável em diversas cidades, especialmente naquelas que enfrentam limitações técnicas e financeiras para obter perfis altimétricos das vias urbanas. O restante do artigo é dividido da seguinte forma: a Seção 2 introduz o *Track Elevation* e suas etapas, a Seção 3 demonstra o uso prático do *Track Elevation* em um estudo de caso real e a Seção 4 conclui o artigo.

2. VISÃO GERAL DO *TRACK ELEVATION*

Nesta seção apresentamos nosso processo para construção de perfis altimétricos, composto por cinco etapas principais, são elas: o Georreferenciamento Viário, a Extração de Dados, o Processamento dos Dados, o Processamento Altimétrico, a Modelagem do Perfil. Cada etapa contribui para a formação de um conjunto de dados estruturado. O processo tem como entrada um arquivo no formato KML (*Keyhole Markup Language*) e gera como saída múltiplos arquivos em formato CSV (*Comma-Separated Values*), um dos arquivos gerados contém informações do nome do ponto, latitude, longitude, altitude obtida via MDE, altitude suavizada e distância acumulada, enquanto que o outro contém as métricas de avaliação, incluindo Erro Médio Absoluto, Erro Quadrático Médio, Erro Máximo, Desvio Padrão Ponto a Ponto, Derivada Média da Curva e Derivada da Inclinação, onde são comparados o perfil gerado pelos modelos MDE e o perfil suavizado. Além disso, um arquivo PNG é gerado com visualizações gráficas comparativas dos perfis altimétricos. Este processo foi implementado em *Python*, e o código-fonte está disponível para download: https://github.com/gca-research-group/processo-para-obter-perfis-altimetricos

Georreferenciamento Viário: o objetivo dessa etapa é traçar, no *software Google Earth*, a representação espacial da linha de ônibus, obtendo dados georreferenciados e padronizados. As paradas do percurso e os pontos de mudança de direção ao longo da linha (referências) devem ser identificados através da ferramenta

marcador de ponto. Os pontos devem ser nomeados de forma padronizada, seguindo uma estrutura onde, o número correspondente à ordem do ponto ao longo da linha seja o primeiro elemento do nome, seguido do tipo do ponto ("Parada" ou "Ref"). Por exemplo: "1 Parada", "2 Ref", "3 Ref", "4 Parada". Essa nomeação sequencial facilita a organização e o controle dos dados para a análise posterior.

Extração de Dados: nesta etapa são gerados os dados de entrada necessários para a próxima etapa (Processamento dos Dados). Após a finalização da identificação de todos os pontos da linha de ônibus, esses elementos ficam listados na seção "Meus Lugares". O trajeto vetorizado deve ser exportado no formato KML com o nome "linha" e salvo na pasta "assets/dados_entrada" dentro do diretório do código-fonte. Esse arquivo KML representa a saída desta etapa e será a entrada da etapa seguinte, sendo indispensável que esteja corretamente salvo para a continuidade do processo.

Processamento de Dados: a etapa atual tem como finalidade transformar os dados do arquivo KML da etapa anterior em um arquivo CSV com os pontos do trajeto da linha nomeados e com suas respectivas, latitudes e longitudes. Os dados são processados com o apoio das bibliotecas *xml.etree.ElementTree*, *pandas*, *csv*, *geopy*, *nunpy*, *scipy.interpolate.interp1d*. Essas bibliotecas garantem que os dados sejam ordenados pela numeração presente no nome, calculam as distâncias geodésicas acumuladas e inserem pontos intermediários a cada 20 m por interpolação linear entre coordenadas. Os pontos intermediários simulam o estaqueamento conforme preconiza o DNIT (2010), resultando em uma representação mais precisa do perfil da linha de ônibus. Ao final desta etapa é gerado um arquivo CSV, que constitui a saída desta etapa e será utilizado na próxima etapa.

Processamento Altimétrico: o objetivo dessa etapa é obter e processar os dados de elevação. Estes dados são obtidos por meio da API da plataforma *OpenTopography* e as bibliotecas *requests*, *rasterio*, *numpy* e *scipy* são utilizadas para o processamento altimétrico. Inicialmente, delimitou-se uma área ao redor da coordenada inicial da linha de ônibus por meio do cálculo de uma *bounding box*, correspondendo a uma janela geográfica de aproximadamente 0,2° de latitude por 0,2° de longitude. A partir dessa área, realiza-se o download do MDE gratuito disponível, priorizando-se as fontes conforme cobertura e resolução de 30 m: *AW3D30*, *AW3D30_E*, *SRTMGL1* e *SRTMGL1_E*. Como as coordenadas dos pontos raramente coincidem com o centro de um pixel no arquivo *GeoTIFF*, as elevações ao longo da linha foram estimadas por interpolação bi linear, que considera os quatro pixels mais próximos para calcular uma média ponderada da altitude. Em bibliotecas como o *rasterio*, a interpolação bi linear é aplicada automaticamente tornando o processo eficiente para aplicações geoespaciais. Os dados de saída desta etapa são mantidos em memória para ser acessados na etapa posterior.

Modelagem do perfil: nesta etapa o perfil altimétrico é modelado, através de técnicas de suavização e interpolação, também são extraídas métricas para avaliação da qualidade do ajuste. As bibliotecas *logging*, *math*, *numpy*, *pandas*, geopy.*distance*, *scipy.interpolate*, *scipy.signal* são necessárias para implementar essa etapa do processo. Primeiramente, utiliza-se o arquivo CSV com os pontos interpolados para calcular as distâncias acumuladas entre eles e gerar o perfil altimétrico bruto com base nos dados do MDE, Em seguida aplica-se o filtro *Savitzky-Golay*, configurado com uma janela deslizante correspondente a 15% do comprimento total da linha de ônibus, e limite de inclinação de 8% entre pontos consecutivo, valor máximo de inclinação recomendado pelo DNIT (2010) e *splines* cúbicas para suavizar o perfil. Em seguida, são calculadas as Métricas de Erro Médio Absoluto, Erro Quadrático Médio, Erro Máximo, Desvio Padrão Ponto a Ponto, Derivada Média da Curva e Derivada da Inclinação, para quantificar a diferença entre os dados brutos e os suavizados. Os dados de saída desta etapa são os arquivos CSV finais com todos os dados obtidos durante o processo e as métricas de avaliação, além do gráfico PNG de comparação.

3. ESTUDO DE CASO

Nesta seção é demostrado a aplicação do *Track Elevation* em uma linha de ônibus urbano localizada no município de Ijuí, região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. A linha possui 4,69 km de extensão, com oito paradas e dezoito pontos de referência. Ijuí abrange uma área de aproximadamente 689,1 km² e conta com uma população estimada em cerca de 83 mil habitantes. A validação do *Track Elevation* foi realizada através da comparação dos perfis elevatórios gerados com dados coletados através de dispositivo GPS e os perfis elevatórios gerados pela aplicação do *Track Elevation*, que utiliza modelos MDE com resolução espacial de 30 m. As latitudes e longitudes dos pontos foram determinadas a partir dos pontos georreferenciados na primeira etapa do processo, enquanto as altitudes dos pontos de GPS foram obtidas em campo com base nessas

mesmas coordenadas. Como ambas as fontes utilizam as mesmas coordenadas geográficas e passaram pelo mesmo processo de filtragem de ruídos, é possível realizar uma comparação direta entre os valores altimétricos.

Inicialmente, foi aplicado o processo *Track Elevation*, traçando-se o trajeto da linha de ônibus com as oito paradas e dezoito pontos de referência numerados em ordem sequencial ao longo do percurso, após obter o arquivo KML, este é usado como dados de entrada para efetuar o Processamento de Dados e posteriormente o Processamento Altimétrico e a Modelagem dos Perfis para então, obter-se as Elevações *Track Elevation* que são o perfil altimétrico dos dados não suavizados e as Elevações *Track Elevation* suavizadas que são o perfil altimétrico dos dados suavizados. Para os dados coletados por GPS, foi necessário, inicialmente, identificar os pontos de latitude e longitude correspondentes às paradas e aos pontos de referência utilizados no processo *Track Elevation*. Em seguida, foram obtidos os dados de elevação desses pontos, além de pontos ao longo do trajeto com espaçamento de 20 m entre si. Essa etapa teve como objetivo garantir maior uniformidade espacial no conjunto de dados, permitindo uma comparação adequada entre o perfil altimétrico gerado em campo e aquele produzido pelo processo. Os dados do GPS passaram por um pré-processamento onde foram corrigidas eventuais inconsistências nas coordenadas, os dados foram organizados em um arquivo no formato CSV, contendo os campos, nome, latitude, longitude e altitude registrada pelo GPS. Posteriormente esse arquivo passou somente pela última etapa de Modelagem do Perfil do processo gerando assim, as Elevações GPS que são o perfil altimétrico dos dados antes da suavização, e as Elevações GPS suavizadas que são o perfil dos dados suavizados. A Figura 1 mostra a comparação entre os perfis altimétricos obtidos após o processamento.

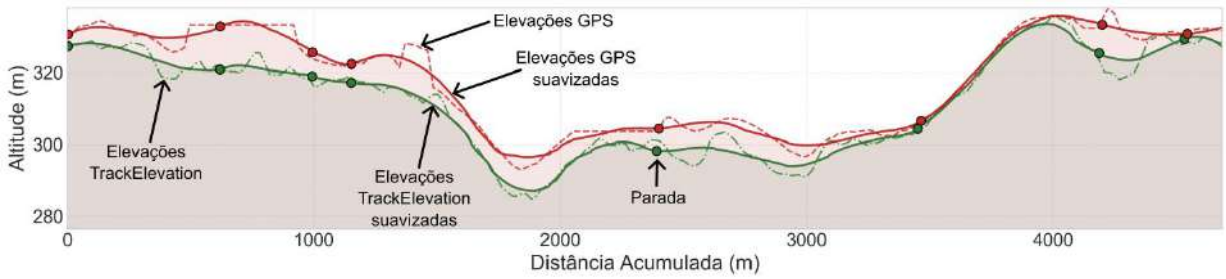


Figura 1: Comparação de perfis altimétricos calculados pelo *Track Elevation* e obtidos pelo GPS.

A avaliação do desempenho do processo foi realizada por meio de métricas estatísticas, conforme mostra a Tabela 1. As métricas permitiram quantificar a diferença entre os dados observados em campo com auxílio de GPS e os valores gerados pelo *Track Elevation*, oferecendo uma medida da confiabilidade do processo proposto em relação a tecnologias altimétricas já consolidadas. Foram utilizadas as métricas de Erro Quadrático Médio, Erro Médio Absoluto, Erro Máximo, Desvio Padrão Ponto a Ponto e Redução de Ruído.

Tabela 1: Métricas estatísticas

Tipo	Comparação	Erro Quadrático Médio (m)	Erro Médio Absoluto (m)	Erro Máx. (m)	Desvio Padrão Ponto a Ponto (m)	Redução de Ruído (%)
MDE	Original x Suavizado	3,92	1,48	5,58	1,98	1,68
GPS	Original x Suavizado	3,04	1,33	5,89	1,75	1,54
MDE e GPS	Suavizado	6,51	5,76	12,44	3,03	-

A partir das métricas estatísticas é possível verificar que os resultados dos erros são compatíveis com a precisão esperada para um processo que utiliza modelo MDE. O Erro Quadrático Médio foi de 3,92 m no processo com o MDE e de 3,04 m nos dados empíricos coletados via GPS. Quanto ao Erro Médio Absoluto, os resultados foram 1,48 m para o MDE e 1,33 m para o GPS. Esses valores indicam que o processo de suavização foi eficaz preservando as características essenciais do perfil altimétrico. Além disso, evidenciam que os dados coletados apresentam grande proximidade em relação aos valores obtidos a partir do modelo MDE. A redução de ruído, foi de 1,68% no MDE e 1,54% no GPS, apesar de pequena, esta atenuação foi suficiente para eliminar oscilações de alta frequência presentes nos dados brutos, sem comprometer a integridade do perfil altimétrico. Os resultados indicam que tanto os dados brutos obtidos através do processo, quanto os dados suavizados podem ser utilizados. Os maiores erros são encontrados quando os perfis suavizados do *Track Elevation*, e do GPS são comparados entre si, indicando que o Erro Quadrático Médio é de 6,51 m, o Erro Médio Absoluto é de 5,76 m, o Erro Máximo 12,44 m e o desvio-padrão ponto a ponto é de 3,03 m. Ainda assim, esses valores

são consideravelmente inferiores aos erros típicos associados a modelos MDE utilizados como referência, que possuem precisão de 30 m, o que sinalizou uma boa estabilidade no perfil suavizado resultante.

4. CONCLUSÕES

A utilização das TICs na mobilidade urbana de uma cidade inteligente é fundamental para o desenvolvimento sustentável. Neste artigo apresentamos um processo escalável para obtenção de perfis altimétricos utilizando modelos MDE *Open Source.* O processo proposto combina técnicas de georreferenciamento viário, interpolação bi linear, suavização com filtros *Savitzky-Golay* e *splines* cúbicas. Os resultados da comparação dos dados gerados pelo *Track Elevation* comparados com dados reais obtidos por GPS, demonstram boa concordância, o que valida o processo desenvolvido e evidência a eficiência deste como ferramenta de baixo custo e alta escalabilidade, especialmente para cidades com limitações técnicas ou financeiras. Apesar de erros maiores na comparação entre os perfis suavizados do *Track Elevation* e GPS, os valores permanecem inferiores à resolução original dos modelos MDE de 30 m, reforçam a robustez do processo. A integração desses perfis a sistemas inteligentes de transporte pode auxiliar nas decisões estratégicas, como otimização de linhas de ônibus e paradas, contribuindo assim, para cidades mais sustentáveis, a disponibilização do código-fonte *Open Source* (em *Python*) amplia o potencial de replicação e adaptação do processo.

Agradecimentos

Esta pesquisa é parcialmente financiada pela CAPES e pelo CNPq nos seguintes projetos: 311011/2022-5, 309425/2023-9, 402915/2023-2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTP (2018) *Sistema de informações da mobilidade urbana*. São Paulo: ANTP.

Benevolo, C.; P. R. Dameri e B. D'Auria (2016) Smart mobility in smart city: Action taxonomy, ICT intensity and public benefits. In: *Empowering organizations: Enabling platforms and artefacts*. Springer International Publishing, p. 13–28. DOI: 10.1007/978-3-319-23784-8_2.

DNIT (2010) *Manual de implantação básica de rodovia. Instituto de Pesquisas Rodoviárias* – IPR. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT.

Carvalho, C. H. R. de (2016) *Mobilidade urbana sustentável: conceitos, tendências e reflexões*.

Gonzalez, R.; P. Jayakumar e K. Iagnemma (2016) An efficient method for increasing the accuracy of mobility maps for ground vehicles. *Journal of Terramechanics*, v. 68, p. 23–35. DOI: 10.1016/j.jterra.2016.09.002.

Graser, A.; J. Asamer e W. Ponweiser (2015) The elevation factor: Digital elevation model quality and sampling impacts on electric vehicle energy estimation errors. In: *International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, p. 81–86. DOI: 10.1109/MTITS.2015.7223240.

International O. F. S. (2019) *ISO 37120: Sustainable development of communities: Indicators for city services and quality of life*. Genebra.

Lei, Z. e T. L. Lei (2024) Large-scale integration of remotely sensed and GIS road networks: A full image-vector conflation approach based on optimization and deep learning. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 113, p. 102174. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2024.102174.

Magrath, J. e M. Brady (2017) Evaluating different methods for determining road grade best suited to advanced bus transportation systems. In: *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, p. 108–113. DOI: 10.1109/SOLI.2017.8120979.

Martin, B.; D. Spiess; S. Würtz; U. Göhner e A. Rupp (2023) Case study on the impact of the road gradient, passenger loading and recuperation power limitations on the energy consumption of battery electric buses. In: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, p. 1–8. DOI: 10.1109/VPPC60535.2023.10403295.

Potenza, R.; A. O. Santos; T. R. Costa; M. L. Fernandes; J. P. Ribeiro e C. A. Lima (2023) *Análise Das Emissões de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações Para as Metas Climáticas Do Brasil 1970–2021*. SEEG: Brasília, Brasil.

Wang, H.; Y. Wu; X. Han; M. Xu e W. Chen (2021) Automatic generation of large-scale 3D road networks based on GIS data. *Computers & Graphics*, v. 96, p. 71–81. DOI: 10.1016/j.cag.2021.02.004.

Zhang, Z.; E. Demir; R. Mason e C. Di Cairano-Gilfedder (2023) Understanding freight drivers' behavior and the impact on vehicles' fuel consumption and CO2 emissions. *Operational Research*, v. 23, n. 4, p. 59. DOI: 10.1007/s12351-

Luciana M. Cardoso (luciana.c@sou.unijui.edu.br)
Rafael Z. Frantz (rzfrantz@unijui.edu.br)
Luiz Antônio Rasia (rasia@unijui.edu.br)
Sandro Sawicki (sawicki@unijui.edu.br)
Fabrícia Roos-Frantz (frfrantz@unijui.edu.br)
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), Espaço Mais Inovação, Rua Lulu Ilgenfritz, 480, São Geraldo, Ijuí - RS, Brasil.

USO DE DADOS DE TELEFONIA MÓVEL APLICADOS À MOBILIDADE URBANA E A OBTENÇÃO DE MATRIZES ORIGEM-DESTINO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Henrique Costa Braga[1], **Guilherme de Castro Leiva**[1], **Thiago Magela Rodrigues Dias**[1], **Gray Farias Moita**[1], **Danayla Lorraine Pereira**[2]
[1]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
[2]Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias de Minas Gerais – SEINFRA-MG

RESUMO
Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre o uso de dados móveis de telefonia, especialmente *Call Detail Records* (CDRs), para a construção de matrizes origem-destino aplicadas à mobilidade urbana. A partir da base Scopus, 144 artigos foram analisados com apoio do VOSviewer, revelando crescimento expressivo da produção a partir de 2015, com destaque para China e EUA. A análise semântica das palavras-chave identificou três eixos temáticos principais: dados móveis, matrizes OD e mobilidade urbana. Foi evidenciado o caráter interdisciplinar e o potencial ainda pouco explorado na América Latina.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento urbano acelerado e o aumento da complexidade dos deslocamentos metropolitanos impuseram novos desafios à formulação de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana. Compreender os padrões de deslocamento da população torna-se cada vez mais essencial para o planejamento eficiente dos sistemas de transporte, a gestão do espaço urbano e a promoção da equidade no acesso aos serviços. Nesse contexto, as chamadas matrizes origem-destino (OD) configuram-se como ferramentas fundamentais para representar fluxos espaciais de pessoas ou bens entre diferentes zonas geográficas, subsidiando a elaboração de diagnósticos e intervenções técnicas.

Tradicionalmente, a construção dessas matrizes depende de métodos como pesquisas domiciliares ou contagens manuais, que, embora confiáveis, apresentam limitações significativas em termos de custo, abrangência temporal e capacidade de atualização. Como alternativa, cresce o interesse pelo uso de dados digitais passivos, especialmente aqueles oriundos de redes móveis de telefonia, como os *Call Detail Records* (CDRs). Esses registros, gerados automaticamente pelas operadoras quando ocorre certas atividades na rede celular, contêm informações sobre a localização dos dispositivos ao longo do tempo, permitindo inferir trajetórias e padrões de mobilidade com alta frequência e em larga escala. Nos últimos anos, diversas pesquisas vêm sendo realizadas em todo o mundo, explorando essa possibilidade tecnológica (Elias *et al*., 2016).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo identificar, selecionar e analisar, de forma estruturada, os estudos científicos mais relevantes publicados em periódicos científicos sobre o uso de dados de telefonia móvel para a construção de matrizes Origem-Destino no auxílio a estudos aplicados a mobilidade urbana. Esse tipo de revisão é importante para se mapear o estado da arte da área, além de evidenciar lacunas e orientar futuras investigações. A abordagem metodológica busca assegurar transparência, rigor e reprodutibilidade, conforme recomendado em pesquisas de base científica e tecnológica. (Ebidor; Ikhide, 2024; Phillips *et al*., 2024).

2. METODOLOGIA

Um dos métodos mais consagrados para condução de revisões sistemáticas é o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), amplamente utilizado, especialmente na área da saúde, por suas diretrizes detalhadas que abrangem desde a formulação da pergunta de pesquisa até a síntese dos resultados (Moher et al., 2009; Page et al., 2021). No entanto, sua complexidade pode torná-lo pouco prático para algumas áreas ou públicos, como a engenharia, demandando a necessidade de abordagens mais objetivas (Okoli, 2019). Assim, embora este trabalho se baseie nos princípios do PRISMA, sua aplicação foi adaptada a uma estrutura metodológica composta por sete etapas sequenciais, visando maior clareza e funcionalidade sem comprometer os fundamentos da revisão sistemática (Higgins; Green, 2011; Pedriali *et al*., 2021).

A primeira etapa da revisão consiste na formulação de uma pergunta de pesquisa clara e bem delimitada, fundamental para orientar todo o processo e construir uma estratégia de busca eficiente. Na segunda etapa, essa estratégia é elaborada com base na definição de descritores, sinônimos e operadores booleanos, sendo essencial seu registro para garantir a coerência e a reprodutibilidade dos resultados (Tranfield *et al*., 2003). A

terceira etapa envolve a seleção criteriosa das bases de dados científicas, priorizando aquelas com ampla cobertura e alto grau de indexação (Burnham, 2006). Em seguida, na quarta etapa, aplicam-se os critérios de inclusão e exclusão, que delimitam os estudos considerados, com base em parâmetros como tipo de publicação, idioma, período e relevância temática. A quinta etapa, a triagem inicial dos registros, baseada em títulos e resumos, pode ser realizada por múltiplos avaliadores para reduzir vieses (Kitchenham, 2004). Na sexta etapa os estudos selecionados são então lidos integralmente, dando início à extração sistemática dos dados relevantes.

Na etapa final, realiza-se a análise e síntese crítica dos resultados, que pode ser qualitativa — com identificação de categorias e lacunas — e quantitativa, por meio de métricas descritivas. Essa fase consolida o conhecimento disponível e evidencia contribuições relevantes para o avanço do tema. No presente trabalho, as etapas iniciais foram conduzidas em duas fases: uma exploratória (literal), destinada a mapear o campo e refinar a busca, e uma segunda abordagem definitiva (semântica), que utilizará os descritores e operadores booleanos previamente aprimorados.

A base de dados utilizada neste trabalho foi a Scopus, reconhecida como uma das mais abrangentes plataformas de resumos e citações da literatura científica revisada por pares, com mais de 27.950 publicações ativas indexadas, entre periódicos, anais e livros acadêmicos (Burnham, 2006; Aksnes & Sivertsen, 2019; Visser *et al*., 2021). Sua cobertura multidisciplinar é especialmente robusta em áreas como engenharias e ciências sociais aplicadas, superando, em certos aspectos, bases como a Web of Science, o que a torna particularmente adequada para pesquisas interdisciplinares e temas contemporâneos, como políticas públicas, novas tecnologias e mobilidade urbana — foco deste trabalho. O acesso foi viabilizado por meio do Portal de Periódicos da CAPES, com acesso remoto garantido pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), permitindo o uso completo da plataforma por pesquisadores vinculados a instituições participantes, mesmo fora do ambiente institucional.

Para complementar a análise e o tratamento dos dados obtidos, foi utilizado o software gratuito VOSviewer, desenvolvido pela Universidade de Leiden (Países Baixos) e amplamente empregado na visualização de dados bibliométricos (Van Eck, Waltman, 2010). No contexto deste trabalho, o VOSviewer foi aplicado para gerar mapas de coocorrência de palavras-chave, permitindo identificar temas recorrentes, agrupamentos semânticos (clusters) e padrões estruturais nos artigos selecionados. Sua interface facilita visualizações como mapas de densidade, sobreposição e redes, além da extração de tabelas quantitativas com informações sobre frequência de ocorrência e força de ligação entre termos, oferecendo assim uma perspectiva exploratória que complementa a leitura direta dos textos e contribui para a compreensão das principais tendências e conexões temáticas na literatura analisada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A literatura científica sobre mobilidade urbana baseada em dados móveis reconhece amplamente a palavra-chave *Call Detail Records* (CDR) como o principal termo para a reconstrução de padrões de deslocamento por dados móveis de telefonia (Gonzalez *et al*., 2008; Barboza, 2020). Dessa forma este foi o termo incialmente empregado para a pesquisa preliminar, associado ao natural termo decorrente da natureza desta pesquisa, que é matriz origem-destino, ou "*origin-destination matrix"*. Assim, utilizou-se preliminarmente na estratégia de busca literalmente apenas estas duas palavras-chaves, buscadas no título, ou no resumo, ou na própria relação de palavras-chave, sem nenhuma forma extra de filtragem, como por período ou natureza da publicação, mas acrescendo suas respectivas versões em siglas, por meio da expressão booleana literal apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Expressão booleana literal dos termos fundamentais

("call detail record" OR "CDR") AND ("origin-destination matrix" OR "OD matrix")

Pela pesquisa na base Scopus, encontrou-se 34 referências, entre artigos em periódicos, artigos de congressos e capítulos de livros, entre os anos de 2013 e 2025. Realizando uma verificação das palavras-chaves destas referências encontradas, utilizando como suporte para isto o programa VOSviewer, encontrou-se 343

diferentes termos. Delimitando apenas os que se repetiram em pelo menos 10% dos artigos, no caso com 4 ou mais ocorrências, encontrou-se 23 diferentes palavras-chaves, conforme ilustrado na Figura 1.

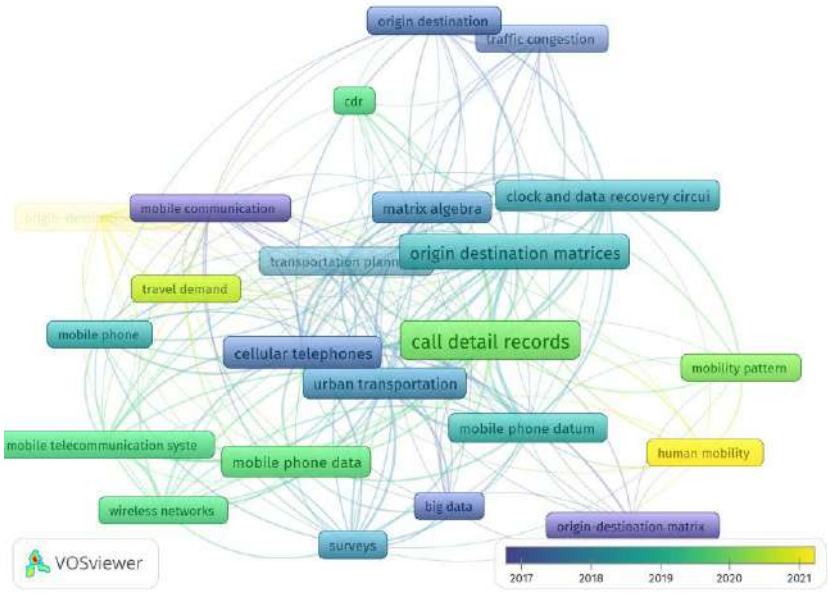


Figura 1: Representação do mapa de termos com suas ligações

Analisando estes dados, como obviamente esperado, percebe-se uma forte ênfase no uso de *call detail records* (CDRs) como fonte de dados para análise de mobilidade e transportes, seguido por *origin-destination matrices*. Entretanto, percebe-se claramente redundâncias e variações de termos similares, por exemplo:

- *origin destination, origin destination matrices, origin-destination matrix, origin–destination matrix;*
- *mobility pattern, mobility patterns; e*
- *mobile phone data, mobile phone datum*

Para uma análise mais robusta, estes termos equivalentes são então normalizados (manter um nome para o mesmo conceito), evitando uma errônea diluição e dispersão das ocorrências, eliminando duplicações e tornando mais evidente a importância relativa dos termos. Realizando este agrupamento semântico, os termos equivalentes são então somados, obtendo-se a Tabela 1.

Tabela 1: Destaques da análise com agrupamento semântico

Grupo semântico	Ocorrências agrupadas	Grupo semântico	Ocorrências agrupadas
call detail records	28	*mobile communication*	12
origin-destination matrix	26	*matrix algebra*	8
mobile data	23	*urban Transportation*	8
mobility	13		

Estes foram então divididos em três grupos maiores: 1 - dados móveis, big data e tecnologia; 2 - matrizes OD, e 3 - mobilidade urbana. Dessa forma, apresenta-se no Quadro 2 a nova expressão booleana semanticamente agrupada destes grupos, onde se observa a utilização do elemento curinga (*), visando cobrir ao máximo os termos relevantes à pesquisa.

Quadro 2: Expressão booleana semanticamente agrupada

("call detail record*" OR "CDR" OR "mobile phone data*" OR "cellular telephone*" OR "mobile communication" OR "mobile telecommunication system*") AND ("origin destination matri*" OR "origin-destination matri*" OR "OD matri*" OR "trip matri*" OR "matrix algebra" OR "transport modelling") AND ("mobility" OR "mobility pattern*" OR "human mobility" OR "travel demand" OR "urban transportation" OR "transportation planning" OR "transportation routes" OR "traffic congestion" OR "trajectories" OR "surveys" OR "urban planning")

A segunda expressão booleana, construída com base semântica (Quadro 2), foi então aplicada à base Scopus nos campos de título, resumo e palavras-chave, sem qualquer filtragem adicional, resultando inicialmente em

168 documentos com distribuição temporal entre 1996 e 2025. No entanto, optou-se por delimitar a pesquisa a partir de 2010, ano a partir do qual o uso de dados móveis de telefonia celular (CDR) se consolidou como ferramenta válida e amplamente adotada em estudos de mobilidade urbana, o que reduziu o número de artigos para 144. As Figuras 2 e 3 apresentam algumas análises métricas destes artigos.

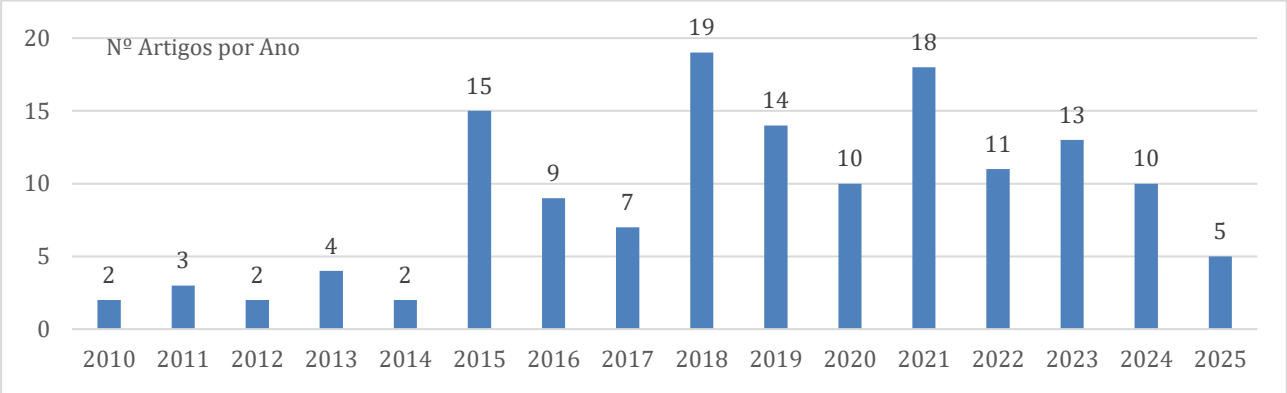


Figura 2: Distribuição temporal do total dos 144 documentos encontrados na busca

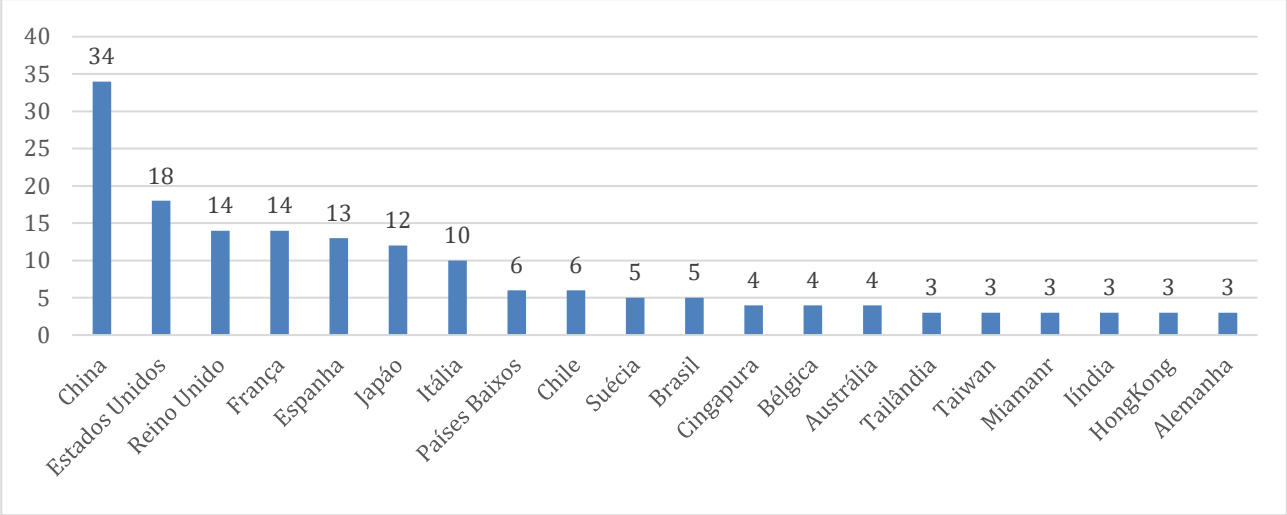


Figura 3: Distribuição das pesquisas pelos países de origem

Pela Figura 2 fica claro a existência de dois períodos distintos, um até o ano de 2014, com a média anual de 2,6 artigos por ano, e outro período de 2015 a 2024, cuja média anual é de 12,6 artigos por ano. Já pela Figura 3, se observa que o país que mais se destaca em quantidade de pesquisa é a China, com quase o dobro de publicações do 2º lugar – os Estados Unidos, sendo que do 3º ao 5º lugar estão países europeus. Na América Latina o Chile se destaca, sendo acompanhado pelo Brasil, mas distantes dos maiores centros pesquisadores, o que evidencia o grande espaço ainda aberto para pesquisas na área.

Nos resultados encontrou-se que as áreas do conhecimento da maioria dos pesquisadores são da Ciência da Computação (25,4%) e da Engenharia (24,3%), mas seguido de perto da Ciências Sociais (19,3%), e com o restante dividido em vários segmentos. Isto demonstra que, apesar do enfoque majoritário das pesquisas serem de pesquisadores das áreas de exatas, a área social aplicada é muito expressiva nestes estudos, o que faz todo sentido devido a natureza das implicações das pesquisas OD. O periódico de maior destaque foi "Transportation Research Procedia" (8 artigos), seguido por "Transportation Research Part C: Emerging Technologies" (6 artigos), "Transportation Research Record" (6 artigos) e "Lectures Notes in Computer Science" (5 artigos). Nenhum artigo de periódico nacional foi capturado na pesquisa.

4. CONCLUSÃO

A revisão sistemática foi conduzida em duas etapas — uma busca literal e outra semântica — voltadas à construção e ao refinamento das expressões booleanas. Evidenciou-se a consolidação dos *CDRs* como

ferramenta eficaz na construção de matrizes origem-destino aplicadas à mobilidade urbana, com um crescimento significativo das publicações a partir de 2015 e predominância de estudos oriundos da China, dos Estados Unidos e de alguns países europeus. As análises revelaram a centralidade de três eixos temáticos — dados móveis, matrizes OD e mobilidade urbana —, além de destacarem o caráter interdisciplinar do campo, ainda pouco explorado na América Latina, especialmente no Brasil.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e ao CEFET-MG pelo auxílio para elaboração do artigo e participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aksnes, D. W.; Sivertsen, G. (2019). A Criteria-based Assessment of the Coverage of Scopus and Web of Science. Journal of Data and Information Science, v. 4, n. 1, p. 1–21. DOI: 10.2478/jdis-2019-0001.

Barboza, M. H. C. (2020). Matrizes Origem-Destino a partir de dados de telefonia celular: um novo modelo de processamento. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 56 p. Dissertação de Mestrado.

Burnham, J. F. (2006). Scopus Database: a review. Biomedical Digital Libraries, v. 3, n. 1, p. 1–8. DOI: 10.1186/1742-5581-3-1.

Ebidor, L.; Ikhide, I. G. (2024). Literature Review in Scientific Research: an overview. East African Journal of Education Studies, v. 7, n. 2, p. 211-218. DOI: 10.37284/eajes.7.2.1909.

Elias, D.; Nadler, F.; Stehno, J.; Krösche, J.; Lindorfer, M. (2016). SOMOBIL – improving public transport planning through mobile phone data analysis. Transportation Reseach Procedia, v. 14, p. 4478-4485. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.370.

Gonzalez, M. C.; Hidalgo, C. A.; Barabási, A. L. (2008). Understanding individual human mobility. Nature, v. 453, n. 7196, p. 779–782. DOI: 10.1038/nature06958.

Higgins, J. P. T.; Green, S. (2011). Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. 5. ed. Chichester: John Wiley & Sons. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470712184>. Acesso em: 05/06/2025.

Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews. Joint Technical Report, Keele University and NICTA.

Li, X.; Zhou, Y.; Wang, S.; Zhang, Y. (2022). A review of mobility-driven urban studies: from data to models. Cities, v. 124. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103597.

Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D.G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA Statement. Open Medicine, v. 3, n. 2, p. 123-130.

Okoli, C. (2019). Guia para realizar uma revisão sistemática da literatura. Tradução de David Wesley Amado Duarte; Revisão técnica e introdução de João Mattar. eaD em Foco, v. 9, n. 1, art. e748. DOI: 10.18264/eadf.v9i1.748.

Page, M. J.; Mckenzie, J. E.; Bossuyt, P. M.; Boultron, I.; Hoffmann, T. C.; Mulrow, C. D. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 2021;372:n71. DOI: 10.1136/bmj.n71.

Pedriali, D.; Caetano, A.G.L.; Galhardi, A.C.; Arima, C.H. (2021). Condicionantes do emprego da revisão sistemática em Engenharia da Produção. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 3, p. 28421-28442. DOI: 10.34117/bjdv7n3-521.

Phillips, M.; Reed, J. B.; Zwicky, D.; Can Epps, A. S.; Buhler, A. G.; Rowley, E. M. *et al*. (2024). Systematic Reviews in the Engineering Literature: a scoping review. IEEE Access, vol. 12, p. 62648-62663. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3394755.

Tranfield, D.; Denyer, D.; Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British* Journal of Management, v. 14, n. 3, p. 207–222. DOI: 10.1111/1467-8551.00375.

Van Eck, N. J.; Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, v. 84, n. 2, p. 523–538. DOI: 10.1007/s11192-009-0146-3.

Visser, M. S.; Eck, N. J.; Waltman, L. (2021). Large-scale comparison of bibliographic data sources: Scopus, Web of Science, Dimensions, Crossref, and Microsoft Academic. Quantitative Science Studies, v. 2, n. 1, p. 20–41. DOI: 10.1162/qss_a_00112.

Henrique Costa Braga (henriquebraga@cefetmg.br)
Guilherme de Castro Leiva (guilherme.leiva@cefetmg.br)
Thiago Magela Rodrigues Dias (thiagomagela@cefetmg.br)
Gray Farias Moita (gray@cefetmg.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, 30510-000, Brasil.
Danayla Lorraine Pereira (danayla.lpereira@gmail.com)
Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias de Minas Gerais, MG, Cidade Administrativa – Rodovia Papa João Paulo II, 3777, Serra Verde, Belo Horizonte – MG, 31630-903, Brasil.

USO DO SOFTGIS NA AVALIAÇÃO DA CAMINHABILIDADE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Débora Meireles Amaral, Peolla Paula Stein, Anderson Magalhães de Oliveira
Universidade Federal do Sul da Bahia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

RESUMO
Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o uso do SoftGIS na análise da caminhabilidade. A caminhabilidade é compreendida como indicador multidimensional da qualidade do ambiente urbano para o deslocamento a pé, sendo estratégica para o planejamento sustentável. A metodologia adotada seguiu os critérios do protocolo PRISMA, com busca na base ScienceDirect e aplicação dos termos "SoftGIS AND walkability" e "SoftGIS AND caminhabilidade". Foram selecionados seis estudos publicados entre 2015 e 2021. Os resultados demonstram que o SoftGIS é eficaz na espacialização de percepções individuais sobre atributos urbanos, permitindo diagnósticos mais sensíveis e alinhados à experiência dos usuários. Observa-se a potencialidade do método na identificação de padrões de exclusão percebida, valoração do conhecimento local e apoio ao planejamento participativo.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento acelerado e desordenado das cidades, aliado à expansão da frota de automóveis, tem agravado os desafios da mobilidade urbana, como congestionamentos, emissões de poluentes e queda na qualidade de vida (Vieira e Morastoni, 2013; Veloso, 2021). Esses impactos se intensificam diante da ausência de infraestrutura adequada para modos de deslocamento sustentáveis, como o caminhar.

A caminhabilidade desponta como um conceito central nas agendas de planejamento urbano, representando a capacidade do ambiente construído de promover e sustentar deslocamentos a pé de maneira segura, confortável, acessível e eficiente (Gehl, 2013; Forsyth, 2015). Essa noção envolve múltiplas dimensões — físicas, funcionais e perceptivas — relacionadas à forma urbana, à densidade, à conectividade viária, à diversidade de usos do solo e à atratividade dos espaços (Frank *et al.*, 2010). Estudos recentes têm associado altos níveis de caminhabilidade a benefícios como a redução de doenças crônicas, o estímulo à coesão social, a vitalidade econômica de áreas centrais e a promoção da equidade territorial (Cerin *et al.*, 2017; Zuniga-Teran *et al*., 2017).

Apesar da consolidação de índices técnicos para mensurar a caminhabilidade, como o *Walkability Index* (Leslie *et al.*, 2007), há crescente reconhecimento de que esses indicadores não capturam plenamente as percepções dos usuários sobre o ambiente urbano, especialmente em contextos marcados por desigualdades espaciais e insegurança (Adams *et al.,* 2019). Nesse sentido, cresce o interesse por metodologias que incorporem dados subjetivos e experiências vividas aos processos de planejamento e diagnóstico urbano.

Entre essas metodologias, destaca-se o SoftGIS (*Geographic Information Systems based on soft data*), que combina técnicas de mapeamento digital com dados perceptivos fornecidos por usuários. Desenvolvido na Finlândia, o SoftGIS permite registrar e espacializar percepções individuais sobre atributos do espaço urbano, como segurança, acessibilidade, conforto e legibilidade (Kyttä *et al*., 2013; Vich *et al.*, 2018). Ao integrar experiências cotidianas aos sistemas de informação geográfica, essa abordagem contribui para diagnósticos mais sensíveis, ampliando a escuta cidadã e fortalecendo práticas de planejamento participativo (Bugs e Reis, 2017; Bugs, 2014). Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo mapear e analisar como o SoftGIS vem sendo utilizado na avaliação da caminhabilidade, com ênfase nas abordagens metodológicas, perfis populacionais e aplicações espaciais identificadas na literatura científica recente.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada foi uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com base no protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), visando mapear e analisar estudos que utilizam o SoftGIS na avaliação da caminhabilidade. A busca foi realizada na base ScienceDirect com os termos "SoftGIS AND walkability" e "SoftGIS AND caminhabilidade", aplicados no campo de busca geral (título, resumo e palavras-chave), filtrando-se artigos de pesquisa revisados por pares. A triagem resultou em 25 artigos, sem duplicatas. Após leitura de títulos, resumos e palavras-chave, 8 estudos foram excluídos.

Os 17 restantes foram analisados integralmente, culminando na seleção final de 6 artigos. Os dados extraídos incluíram objetivo, público-alvo, metodologia, técnicas utilizadas e principais achados. A Figura 1 apresenta o fluxograma dos resultados de busca na base ScienceDirect.

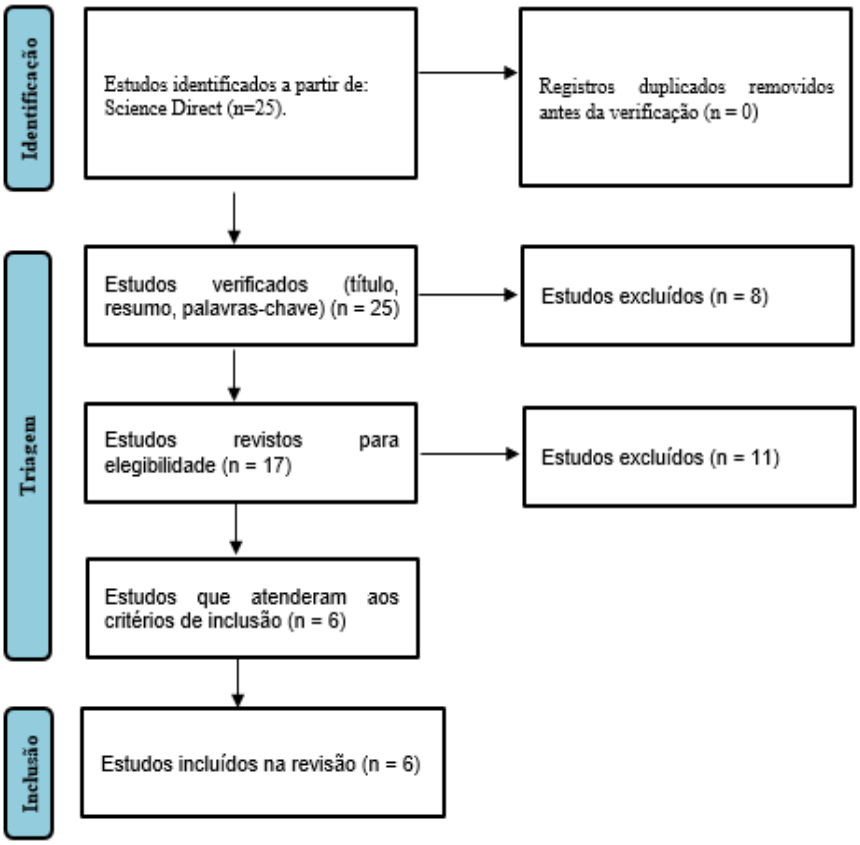


Figura 1: Fluxograma de resultados da busca da Revisão Sistemática de Literatura (fonte: elaborado pelos autores, adaptado de PRISMA 2020)

3. RESULTADOS

Os estudos analisados foram publicados entre 2015 e 2021, com aplicações em países como Finlândia, Alemanha, Espanha e Noruega. A diversidade geográfica aponta para a flexibilidade da metodologia SoftGIS em diferentes contextos urbanos e sociais. Em todos os casos, o foco esteve na compreensão de como os cidadãos percebem os espaços urbanos e como essas percepções podem ser incorporadas ao processo de tomada de decisão em políticas públicas de mobilidade, especialmente no que tange à caminhabilidade. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados encontrados nos artigos.

Os estudos analisados contemplaram uma ampla diversidade de perfis populacionais — moradores de bairros específicos, estudantes, idosos e membros da comunidade universitária — evidenciando que a caminhabilidade é uma experiência socialmente situada, sensível à idade, ao gênero, à rotina e à relação simbólica com o território. Essa heterogeneidade permite a construção de diagnósticos mais ricos e contextualmente fundamentados, como apontam Kyttä *et al.* (2013) ao discutirem o conceito de "caminhabilidade percebida" como componente-chave para o planejamento centrado nas pessoas.

A aplicação do SoftGIS mostrou-se particularmente eficaz na identificação de áreas percebidas como seguras ou desconfortáveis, acessíveis ou excludentes, revelando padrões de exclusão espacial frequentemente invisibilizados por indicadores objetivos (Kajosaari *et al.,* 2019; Hasanzadeh *et al.,* 2021). Esses achados corroboram o argumento de Bugs *et al.* (2016) de que metodologias participativas com suporte geotecnológico ampliam o escopo das análises urbanas ao incorporar a dimensão subjetiva das experiências cotidianas.

Tabela 1: Resumo dos estudos selecionados (Fonte: elaborado pelos autores)

Título	Autor/Ano	Cidade/País	População	Metodologia	Principais Resultados
Exploring ways of measuring walkability	Marianne Knapskog, Oddrun Helen Hagen, Aud Tennøy, Maja Karoline Rynning (2018)	Kristiansan, Bergen, Oslo - Noruega	Estudantes do ensino fundamental e médio	Entrevistas nas ruas às pessoas da área (funcionários, moradores e visitantes) sobre seus hábitos de viagem, o uso de espaços públicos, as qualidades da área e outros destinos importantes.	O uso do SoftGIS foi útil tanto para coletar e estruturar conjuntos de dados maiores, quanto para medir e analisar características como densidade, conectividade e atributos de uso do solo. A abordagem escolhida, entrevistas na rua, consumiu muito tempo, e houve dificuldade em obter respostas. Além disso, foi entrevistado um número limitado de pessoas.
The scales of the metropolis: Exploring cognitive maps using a qualitative approach based on SoftGIS software	Guillem Vicha, Oriol Marquet, Carme Miralles-Guasch (2018)	Barcelona, Espanha	Membros da comunidade universitária	Pesquisa por meio do SoftGIS. Mapeamento de seus destinos cotidianos (residência, trabalho, compras, socialização e lazer), para identificação de distâncias caminháveis.	Este estudo contribui para a pesquisa ao constar que os processos cognitivos podem permitir que grupos específicos da população percebam o mesmo contexto geográfico de maneiras diferentes.
School travel mode choice and the characteristics of the urban built environment: The case of Helsinki, Finland	Anna Broberg, Satu Sarjala (2015)	Helsinque, Finlândia	Estudantes do ensino fundamental e médio	Pesquisa por meio do SoftGIS. Mapeamento de rotas domésticas e diárias para as escolas.	Uso do SoftGIS permitiu entender que a densidade residencial e a combinação de uso do solo estavam consistentemente associadas à atividade física de transporte entre crianças e jovens. Foi possível perceber que o usos do solo comerciais, institucionais e de escritórios, diminuíram a probabilidade de caminhadas e ciclismo neste estudo.
Centricity and multi-locality of activity spaces: The varying ways young and old adults use neighborhoods and extra-neighborhood spaces in Helsinki Metropolitan Area	Kamyar Hasanzadeh, Marketta Kytta, Johanna Lilius, Samira Ramezani, Tiina Rinne (2021)	Helsinque, Finlândia	Adultos mais jovens de 25 a 40 anos e adultos mais velhos de 55 a 75 anos	Uso do SoftGIS. Combinação de mapas da internet com questionários.	As descobertas deste estudo podem ter implicações importantes para o planejamento urbano. Os resultados da comparação entre as duas faixas etárias mostraram que diferentes faixas etárias têm necessidades diferentes e uma solução única para todos pode não existir.

Residential dissonance and walking for transport	Anna Kajosaari, Kamyar Hasanzadeh, Marketta Kyttä (2019)	Helsinque, Finlândia	Jovens adultos de 25 a 40 anos	Uso do SofGIS através de uma pesquisa online para obtenção do índice de caminhabilidade	Associações significativas foram encontradas entre caminhar como meio de transporte, localização residencial e preferência por lugares que apoiam a caminhada. Os entrevistados que vivem nas áreas com a maior capacidade de caminhar caminharam mais do que aqueles que vivem em áreas com baixa capacidade de caminhar, enquanto os entrevistados que preferem bairros com alta capacidade de caminhar caminharam mais do que aqueles que preferem bairros com baixa capacidade de caminhar.
Neighbourhood preferences, active travel behaviour, and built environment: An exploratory study	Mohammad Haybatollahi, Michal Czepkiewicz, Tiina Laatikainen, Marketta Kyttä (2015)	Tampere, Finlândia	Habitantes com idade entre 15 e 74 anos	Uso do SoftGIS, através de questionário eletrônico e uso do mapa para localização	O estudo identificou 3 grupos de preferência de escolha de transporte. O grupo 1 apresentou maior preferência por transporte ativo, enquanto o grupo 3 teve maior preferência por transporte de carro. E foi identificado um grupo entre os grupos 1 e 3. Em relação à acessibilidade do destino, as descobertas indicaram que os viajantes ativos tiveram uma média maior de deslocamento a pé e de bicicleta do que os grupos que preferem o carro.

Além disso, os estudos demonstraram a força da triangulação metodológica, combinando o SoftGIS com análise estatística espacial, questionários digitais, entrevistas e mapas cognitivos. Tal abordagem é defendida por Vich *et al.* (2018), que destacam a complementaridade entre dados espaciais subjetivos e evidências quantitativas para formulação de políticas urbanas mais sensíveis à diversidade social. A articulação entre percepção e espaço contribui não apenas para a produção de diagnósticos mais precisos, mas também para a construção de agendas de planejamento mais democráticas (Bertolini, 2020).

Por fim, observa-se que o uso do SoftGIS fortalece a posição do cidadão como agente ativo no processo de planejamento, deslocando o foco da análise meramente técnica para uma escuta qualificada dos usuários do espaço. Tal perspectiva se alinha à proposta de um urbanismo orientado à vivência, no qual as práticas de deslocamento, permanência e apropriação territorial são consideradas dimensões fundamentais da justiça espacial (Silva e Oliveira, 2020).

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo mapear e analisar como o SoftGIS vem sendo utilizado na avaliação da caminhabilidade em contextos urbanos. A revisão sistemática cumpriu esse propósito ao identificar abordagens metodológicas, perfis populacionais e aplicações práticas que demonstram a eficácia do SoftGIS na incorporação de percepções espaciais subjetivas aos processos de planejamento.

Os estudos selecionados evidenciam que o SoftGIS amplia o diagnóstico urbano ao revelar padrões de exclusão, valorizar o conhecimento local e fortalecer o papel ativo da população na formulação de políticas mais sensíveis às experiências cotidianas. Como limitações, destaca-se a condução da triagem por um único revisor e o uso de apenas uma base de dados, o que pode ter restringido a abrangência dos resultados. Pesquisas futuras podem ampliar esse escopo e aprofundar a articulação entre geotecnologias participativas e processos decisórios institucionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, M. A.; Frank, L. D.; Schipperijn, J. et al. (2019) International variation in neighborhood walkability, physical activity, and obesity: IPEN adult study. *International Journal of Obesity*, v. 43, p. 114–124. DOI: https://doi.org/10.1038/s41366-018-0155-6

Bertolini, L. (2020) Social innovation and urban mobility: towards systemic and spatial perspectives. *Journal of Urban Design*, v. 25, n. 4, p. 415–424. DOI: https://doi.org/10.1080/13574809.2019.1700202

Broberg A. e Sarjala S. (2015) School travel mode choice and the characteristics of the urban built environment: The case of Helsinki, Finland. Transport Policy, v. 37, p. 1-10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.10.011.

Bugs, G. (2014) *Tecnologias da Informação e Comunicação, Sistemas de Informação Geográfica e a participação pública no planejamento urbano*. Tese (doutorado). Planejamento Urbano e Regional, UFRGS. Porto Alegre. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/112006 (acesso em 30/06/2025)

Bugs, G; Reis, A. T. D. L. (2016). Planejamento urbano participativo por meio da utilização de novas tecnologias: uma avaliação por especialistas. urbe. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 9, p. 110-123. DOI: 10.1590/2175-3369.009.001.AO06 ISSN 2175-3369

Cerin, E.; Leslie, E.; du Toit, L. et al. (2017) Destinations that matter: associations with walking for transport. *Health & Place*, v. 13, p. 713–724. DOI: https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2006.11.002

Forsyth, A. (2015) What is a walkable place? The walkability debate in urban design. *Urban Design International*, v. 20, p. 274–292. DOI: https://doi.org/10.1057/udi.2015.22

Frank, L. D.; Sallis, J. F.; Conway, T. L. et al. (2010) Many pathways from land use to health. *Journal of the American Planning Association*, v. 72, n. 1, p. 75–87. DOI: https://doi.org/10.1080/01944360608976725

Gehl, J. (2013) Cidade para pessoas. 2. ed. São Paulo: Perspectiva. ISBN 978-85-273-0980-6.

Hasanzadeh K.; Kyttä M.; Lilius J.; Ramezani S. e Rinne T. (2021) Centricity and multi-locality of activity spaces: The varying ways young and old adults use neighborhoods and extra-neighborhood spaces in Helsinki Metropolitan Area. Cities, v. 110, p. 103062. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103062.

Haybatollahi M.; Czepkiewicz M.; Laatikainen T. e Kyttä M. (2015) Neighbourhood preferences, active travel behaviour, and built environment: An exploratory study. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 29, p. 57-69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.01.001.

Kajosaari A.; Hasanzadeh K. e Kyttä M. (2019), Residential dissonance and walking for transport. Journal of Transport Geography, v. 74, p. 134-144. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.11.012.

Knapskog M.; Hagen O. H.; Tennøy A. e Rynning M. K (2019) Exploring ways of measuring walkability. *Transportation Research Procedia*, v 41, p. 264-282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.047.

Kyttä, M.; Broberg, A.; Tzoulas, T.; Snabb, K. (2013) Towards contextually sensitive urban densification: location-based softGIS knowledge revealing perceived residential environmental quality. *Landscape and Urban Planning*, v. 113, p. 30–46. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.01.008

Leslie, E.; Coffee, N.; Frank, L. et al. (2007) Walkability of local communities: using geographic information systems to objectively assess relevant environmental attributes. *Health & Place*, v. 13, n. 1, p. 111–122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2005.11.001

Piazza, G. A. e Vieira, R. (2017) Espacialização do índice de caminhabilidade (IC) como ferramenta de planejamento para mobilidade urbana dos bairros centro e Badenfurt em Blumenau (SC). *Revista Ra'e Ga*, v. 40, p. 23-24. DOI: 10.5380/raega.v40i0.44117

Silva, M. A.; Oliveira, R. M. (2020) Cartografias da percepção na análise da mobilidade urbana. *Revista Mobilidade e Cidade*, v. 12, n. 2, p. 45–60.

Veloso, A. L. C. P. (2021) *O pedestre no protagonismo da mobilidade urbana: as condições de caminhabilidade no espaço urbano de Montes Claros/MG*. Dissertação (mestrado). PPGSAT, UFMG. Unimontes. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/39000/3/O%20pedestre%20no%20protagonismo%20da%20mobilidade%20urbana.pdf (acesso em 02/07/2025).

Vich G.; Marquet O. e Miralles-Guasch C. (2018) The scales of the metropolis: Exploring cognitive maps using a qualitative approach based on SoftGIS software. Geoforum, v 88, p 49-56. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.11.009.

Vieira, R. e Morastoni, R. (2013) Qualidade das calçadas na cidade de Camboriú/SC: em busca da acessibilidade e mobilidade sustentável para área turística. *Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo*, v. 7(2), p. 239-259, DOI: 10.7784/rbtur.v7i2.516

Zuniga-Teran, A. A.; Orr, B. J.; Gimblett, H. R. et al. (2017) Designing healthy communities: exploring walkability and social capital through participatory GIS. *Journal of Transport & Health*, v. 5, p. 118–131. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.08.020

Débora Meireles Amaral (dmamaral.ppgeca@uesc.br), UFSB, Rod. Ilhéus/Itabuna, BR415, Km 22, Ilhéus, BA, Brasil.

Mobilidade e Acessibilidade

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES: ANÁLISE MULTICRITÉRIO DA POSIÇÃO IDEAL DE INSTALAÇÕES TEMPORÁRIAS DE SAÚDE NAS CIDADES DA BAIXADA SANTISTA - SP

Danilo Bueno de Godoy, Lucas Brandão Monteiro de Assis, André Luiz Barbosa Nunes da Cunha
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

RESUMO
O presente estudo objetiva a determinação da localização ideal para implantação de unidades de saúde temporárias em cada uma das cidades da Baixada Santista - SP. Para tanto, utilizou-se o método logístico de Análise de Decisão Multicritério (ADM), que incorporou os seguintes critérios de avaliação: densidade demográfica, renda média, distância das unidades de saúde existentes e facilidade de acesso. Os resultados mostraram-se heterogêneos. Algumas cidades apresentaram localizações ideais distribuídas no espaço do município. Outras tiveram os pontos ótimos em locais agrupados. Em ambos os casos, a proximidade dos pontos ótimos em relação às unidades existentes foi variável como reflexo da escolha dos pesos dos critérios adotados.

1. INTRODUÇÃO

A Baixada Santista - SP é a região do litoral paulista com uma grande identidade turística, que atrai milhões de pessoas na temporada de verão. Entre dezembro de 2024 e fevereiro de 2025, mais de 3 milhões de turistas passaram apenas pela cidade de Santos - SP, um aumento de 18% em relação aos anos anteriores. Neste período, os moradores, e os 9 milhões de turistas, que estavam na cidade de Praia Grande, foram acometidos por um surto de virose que causou atrasos nos atendimentos médicos nas unidades de saúde públicas e a falta de medicamentos para o tratamento (Cruz, 2025).

Nesse contexto, tem-se como objetivo do estudo identificar a localização ideal para postos de atendimento temporários para auxiliar na oferta dos cuidados emergenciais nestes períodos sazonais de alta demanda. Para isso foi utilizada uma análise multicritério, baseando-se na densidade demográfica, distância da unidade existente mais próxima, renda média e facilidade de acesso, em cada uma das cidades da Baixada Santista.

2. METODOLOGIA

Para analisar, classificar e ranquear os locais candidatos à instalação de unidades temporárias, foi aplicado uma análise multicritério de tomada de decisão - ferramenta matemática desenvolvida para a resolução de problemas de tomada de decisão em casos que critérios conflitantes são considerados (Brans e Mareschal, 2005). Para isso, o desenvolvimento da pesquisa se deu em duas etapas. Na primeira decidiu-se os objetos representativos dos locais candidatos e quais seriam os critérios e seus respectivos pesos no processo de decisão. Na segunda etapa, realizou-se a coleta de dados e foram feitas suas análises. Ambas as estampas são discutidas abaixo.

2.1. Critérios de decisão e objetos representativos de localidade

Escolheu-se três critérios relativos às localidades candidatas para a tomada de decisão: aspectos sociais, distância da unidade de saúde mais próxima existente e facilidade de acesso. O primeiro contempla dois subcritérios: densidade populacional, referente à chance de o sistema de saúde ser acionado - em locais mais densos há maior probabilidade de ocorrência de situações de urgência ou emergência - e renda média, o qual reflete a finalidade social do sistema público de saúde - regiões com menor renda média têm maior prioridade em receber instalações provisórias. O segundo representa a necessidade de distribuição das unidades de saúde na área do município - instalações temporárias não devem ser implantadas perto de unidades de saúde existentes. O quarto refere-se à facilidade de acesso à localidade candidata por meio da rede viária - locais de fácil acesso tem maior prioridade em receber as instalações.

Os critérios de densidade demográfica, renda média e facilidade de acesso foram adaptados do trabalho de Briozo (2013). Equilibrou-se os pesos de forma a compensar a exclusão de critérios de mesmo nível, com o objetivo de atender os requisitos do método de decisão multicritério AHP. No caso dos critérios de densidade demográfica e renda média, subcritérios do critério “aspectos sociais” no trabalho de referência, por exemplo, aumentou-se seus pesos de forma proporcional à sua diferença e de modo que a soma resultasse na unidade. Isso porque o critério de vulnerabilidade - de mesmo nível que os outros - não foi considerado no presente projeto. Os critérios de facilidade de acesso, distância à unidade existente mais próxima, adotado de Lima (2023), e aspectos sociais também foram equilibrados entre a forma descrita acima. Na Tabela 1 são

apresentados os pesos adotados para cada um dos critérios e subcritérios descritos. Os pesos dos subcritérios já são apresentados levando em consideração o peso do critério de nível superior. As grandezas inversamente proporcionais à implantação receberam pesos negativos.

Tabela 1: Pesos dos critérios de decisão adotados na determinação das localidades de implantação de novas unidades de saúde

Critério	Subcritério	Peso
Aspectos Sociais	Densidade demográfica	+ 1,5
	Renda média	- 4,0
Distância de unidades existentes mais próxima	-	+ 2,2
Facilidade de acesso	-	- 2,4

Adotou-se como objetos representativos das localidades candidatas à implantação de unidades temporárias de saúde os centroides dos setores censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - dado que esse sistema de divisão do espaço representa a menor unidade de agregação das informações dos censos demográficos relativos à densidade demográfica e renda média.

2.2. Coleta e análise de dados

Os vetores georreferenciados representativos dos limites dos municípios da Baixada Santista e de seus setores censitários, bem como informações relativas à densidade demográfica e renda média de cada setor, foram obtidos a partir dos dados do Censo de 2022 disponibilizados no *site* do IBGE. A localização geográfica das UPAs e PSs existentes da Baixada Santista foram importadas da plataforma GeoSEADE - desenvolvida pela Fundação SEADE. Para a primeira análise de dados e obtenção dos centroides dos setores censitários utilizou-se o *software* QGIS. A Figura 1 apresenta, à esquerda, os limites dos municípios da região estudada em conjunto com as unidades de saúde existentes e, à direita, exemplifica a composição dos setores censitários e seus centroides com destaque na cidade de Santos - SP.



Figura 1: À esquerda, os limites municipais da região estudada e, à direita, setores censitários e centroides da cidade de Santos - SP

A configuração das vias das cidades da Baixada Santista foi importada do complemento "QuickOSM", desenvolvido pela *OpenStreetMap Foundation,* para o *software* QGIS. Os centroides dos setores censitários foram aderidos à malha das vias para a análise das distâncias entre centroides e unidades existentes e facilidade de acesso. As interseções da malha viária foram adotadas como referências para o cálculo da facilidade de acesso dos centroides dos setores. A Figura 2 ilustra a rede, as interseções e os centroides dos setores censitários aderidos à malha das vias do município de Peruíbe - SP.



Figura 2: Malha viária, interseções e centroides dos setores censitários aderidos à malha na cidade de Peruíbe - SP.

Por meio do *software* TransCAD obteve-se, para cada centroide aderido, a distância até a unidade de saúde

mais próxima (Figura 3). Além disso, calculou-se a distância média de cada centroide em relação a todas as interseções do sistema viário de sua cidade.

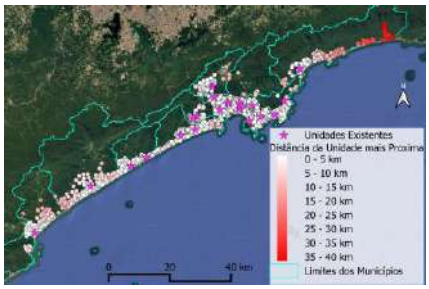


Figura 3: Distância dos centroides à unidade de saúde mais próxima

Com as informações relativas aos critérios de decisão organizadas para cada um dos centroides dos setores censitários da região, realizou-se a normalização dos valores brutos por meio da Equação 1, processo que consiste no ajuste dos valores numéricos das diferentes variáveis em uma escala comum, com o objetivo de impedir que os valores em escalas maiores dominem os resultados.

$$X_{ij,Normalizado} = (10)\frac{(X_{ij} - min(S))}{(max(S) - min(S))} \quad (1)$$

Com X_{ij} o valor da variável j do i-ésimo setor censitário e $S = \{X_{1j}, X_{2j}, \ldots, X_{nj}\}$ o conjunto dos valores de cada setor censitário segundo a variável j.

Vale destacar que, exceto para o critério de distância de unidade mais próxima, as variáveis foram normalizadas baseando-se nos valores separados por cada município em questão. A pontuação de cada setor censitário - que representa o quão favorável o centroide está de receber uma unidade - foi calculada, então, por meio da Equação 2.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} (a_j X_{ij}) \quad (2)$$

Com P_i a pontuação do i-ésimo setor censitário, X_{ij} o valor da variável j do i-ésimo setor censitário, n o número de variáveis consideradas e a_j o peso da j-ésima variável definido na Tabela 1.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

A Baixada Santista - SP é a região metropolitana do litoral paulista composta pelos municípios de Bertioga, Cubatão, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos e São Vicente. Na Figura 4 estão apresentados três centroides de maior pontuação de cada cidade da Baixada Santista.

A posição dos candidatos à implantação de instalações temporárias não segue o mesmo padrão. Para o município de Peruíbe, os centroides de maior pontuação estão concentrados no limite oeste e estão próximos da unidade de saúde existente da região. Já em Itanhaém, os centroides de maior pontuação estão concentrados próximos da unidade de saúde do município e distribuídos na área central. Em Mongaguá, os melhores candidatos estão concentrados na região central do município, entre as duas unidades existentes à uma distância média. Praia Grande e São Vicente apresentam candidatos concentrados nas proximidades ao limite leste da cidade, também afastados das unidades já implantadas. Em Cubatão, os centroides de maior pontuação localizam-se próximos ao centro do município e distanciam-se das unidades já implantadas. Em Santos, a concentração ocorre no limite Sul. Em Guarujá, os candidatos estão dispersos pela pela área central, cercados pelas unidades existentes.

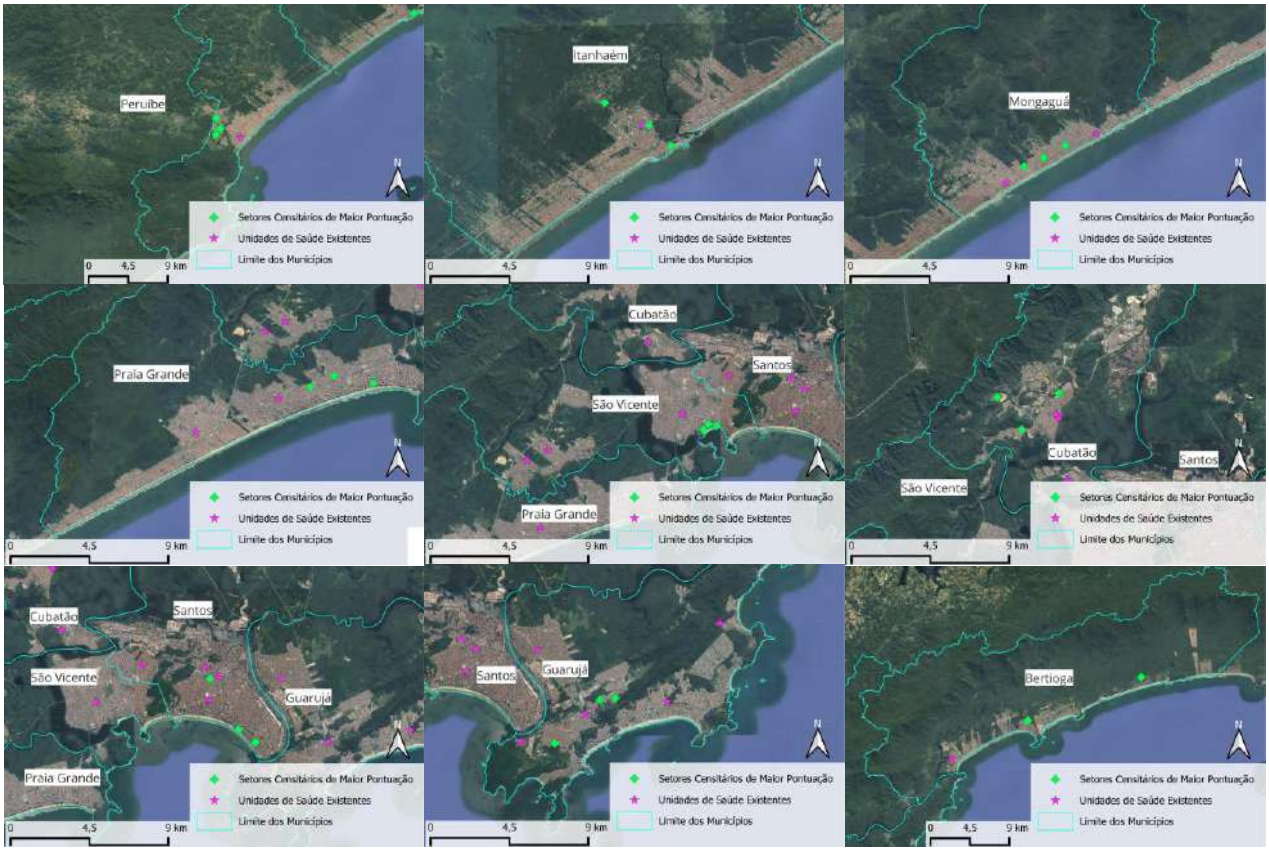


Figura 4: Centroides dos setores de maior pontuação de cada cidade da Baixada Santista segundo os critérios de decisão adotados.

Em Bertioga, um dos candidatos de maior pontuação concentra-se no extremo leste - extremo oposto à única unidade existente do município. Os outros dois estão no centro, sobrepostos.

4. CONCLUSÃO

A coleta de dados georreferenciados da região da Baixada Santista e a manipulação dessas informações por meio dos *softwares* QGIS e TransCAD, foram suficientes para aplicação do método de análise multicritério. Esse, por sua vez, fez-se um bom ponto de partida para a obtenção de resultados, dados os critérios escolhidos. O fato de que alguns dos pontos de maior pontuação permanecerem próximos à unidade de saúde existentes evidencia a possibilidade de melhores escolhas para os pesos dos critérios - em algumas cidades, variáveis de menor peso ainda se sobrepõem às de maior peso.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta pesquisa foi apoiado pelo CNPq processos 311964/22-2 e 163811/2021-0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRIOZO, R. A. (2013) *Localização de uma Unidade de Pronto Atendimento - UPA 24h: uma aplicação de método multicritório de tomada de decisão.* Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. DOI: 10.11606/D.18.2013.tde-17032015-095521.

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. (2005) *Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art*. Kluwer Academic Publishers.

CRUZ, E. P. (2025) *Litoral de São Paulo enfrenta aumento em casos de virose.* Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2025-01/litoral-de-sao-paulo-enfrenta-aumento-em-casos-de-virose (acesso em 04/07/2025)

LIMA, L. R. (2023) *Identificação Da Melhor Localização Para A Instalação De Uma Unidade De Pronto Atendimento (Upa) Em Itacoatiara/Am Utilizando O Método Analytic Hierarchy Process (Ahp).* Dissertação (TCC de Graduação). Universidade Federal do Amazonas. Itacoatiara.

Danlo Bueno de Godoy (danilogodoy@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Trabalhador são-carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos, São Paulo, Brasil

PERCEPÇÕES E RISCOS À CIRCULAÇÃO DE PATINETES ELÉTRICOS EM UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

Nathalia Cristina de Souza Silva, Marcos Antônio de Oliveira Filho, Pedro de Castro Belchior, Pastor Willy Gonzales Taco, Zuleide Oliveira Feitosa
Universidade de Brasília

RESUMO
Este estudo objetivou identificar a percepção de usuários e não usuários de patinetes elétricos sobre a infraestrutura de circulação no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB) no Distrito Federal. Foi elaborado um questionário estruturado e realizada a pesquisa no campus, com 317 participantes. Os resultados indicam deslocamentos predominantes entre institutos centrais e percepção positiva do patinete como modo de transporte complementar. Identificou-se baixo uso de equipamentos de segurança, desconhecimento das normas e avaliação negativa das vias. A maioria dos acidentes relatados, atribuídos a falhas na infraestrutura, ocorreram no campus. Os resultados evidenciam a necessidade de intervenções estruturais e educativas para promover o uso seguro e eficaz desse modo de micromobilidade.

1. MICROMOBILIDADE E PATINETES ELÉTRICOS

Em Brasília, os patinetes elétricos registraram 173 mil viagens e 60 mil usuários em seu primeiro mês de operação (Mobilize, 2025). Considerados opções de micromobilidade de baixa emissão e menor ocupação de espaço, os patinetes são veículos acessíveis e socialmente inclusivos, que contribuem para a redução dos congestionamentos urbanos e promovem uma mobilidade ativa e mais saudável. O Hospital de Base do Distrito Federal (HBDF) registrou 11 atendimentos relacionados a acidentes envolvendo patinetes elétricos apenas no mês de abril de 2025 (Torres, 2025). Os riscos estão relacionados com infraestrutura, a falta de uso de equipamentos de proteção e desconhecimento das regras de velocidade no manuseio do patinete.

Diante deste cenário, o Campus Darcy Ribeiro (CDR) da Universidade de Brasília (UnB) se tornou um ambiente propício para a inserção de soluções de micromobilidade, como os patinetes elétricos. De acordo com o Censo da UnB em 2020, havia 2.594 docentes ativos, 3.233 técnicos administrativos, 39.699 alunos de graduação e 8.439 estudantes de pós-graduação stricto sensu. Trata-se de um campus extenso com 3.950.569,07 m², com grande fluxo diário da comunidade, que se desloca a pé, entre os diversos institutos (Figura 1), e, que muitas vezes, exigem percursos longos em intervalos curtos entre aulas. Segundo dados da Pesquisa de Transportes e Mobilidade do Plano Diretor do Campus (Taco et al, 2023), 85% dos usuários do campus se deslocam internamente a pé. Contudo, para que esses deslocamentos sejam realizados de forma segura e eficaz, é fundamental compreender as limitações da infraestrutura atual do campus, ainda mais em se tratando da utilização de patinetes elétricos. Nesse sentido, teve como objetivo identificar a percepção, dos usuários e não usuários de patinetes elétricos do CDR da UnB, em relação à infraestrutura de circulação que possam oferecer riscos de sinistros, visando contribuir para futuras intervenções e melhorias no espaço universitário.

2. MÉTODO E DADOS

A fim de identificar os principais fatores que influenciam a utilização de patinetes elétricos e as percepções dos usuários e não usuários, realizou-se revisão bibliográfica na base Scopus, utilizando os seguintes strings: ("*Electric scooters*") OR ("*Micromobility*") AND ("*Infrastructure*") AND ("*Transportation*"). Com base nos fatores encontrados, elaborou-se um questionário estruturado com 64 perguntas, abordando frequência de uso, percepção de segurança, ocorrência de sinistros, trechos de circulação e avaliação da infraestrutura. A pesquisa foi aplicada à comunidade universitária entre junho e julho de 2025, sendo que a coleta de dados ocorreu por dois métodos integrados: entrevistas presenciais em pontos de circulação do campus e aplicação *online* via *Google Forms*. Os dados foram tratados de forma quantitativa e qualitativa, sendo representados por meio de mapa espacial, diagrama de *Sankey* e gráfico *boxplot*, que permitiram analisar as relações entre variáveis e a percepção dos participantes sobre infraestrutura e segurança no uso de patinetes.

3. PERCEPÇÃO DA MICROMOBILIDADE NO CAMPUS DARCY RIBEIRO

Ao todo, obteve-se 317 respostas, das quais 85,5% pertencem a pessoas com idade entre 17 e 30 anos, considerado o público mais propenso a usar patinetes. Com relação aos deslocamentos internos, os entrevistados circulam principalmente nas regiões do ICC Norte, pavilhões e Faculdade de Tecnologia (FT),

transitando com frequência entre o Restaurante Universitário (RU), ICC Norte, ICC Central e ICC Sul. No que se refere ao uso de patinetes dentro do campus, observou-se que dos entrevistados 12,6% afirmaram utilizá-lo e os que não o utilizam (87,6%) consideraram o patinete elétrico um meio de transporte "moderadamente importante" (31,2%), "importante" (24,6%) ou "totalmente importante" (18,6%), como complemento ao transporte público. Quando avaliado o patinete em relação à distância que pode ser percorrida, 40,7% o classificou como adequado para deslocamentos curtos (500m-1000m), 8,5% adequado para distância curtíssima (<500m), 38,5% adequado para média distância (1000m-2000m), 7,6% adequado para longas distâncias (>2000m) e 4,7% não souberam responder.

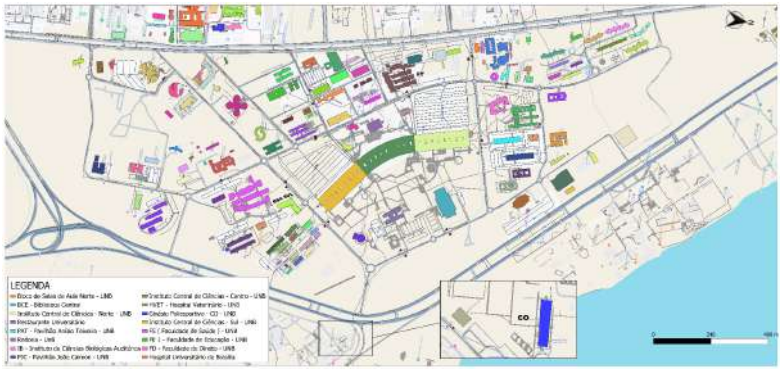


Figura 1: Mapa do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Em relação à escolha do modo de transporte, antes da presença dos patinetes no DF, os usuários se deslocavam principalmente a pé, de bicicleta compartilhada ou por meio de transporte por aplicativo. As principais razões para a troca foram a rapidez, conveniência na localização e conforto, com o uso principalmente para deslocamentos relacionados aos estudos. Chama atenção o fato de que 57,5% não sabiam utilizar o patinete na primeira tentativa, 20% já ofereceram carona no patinete durante os trajetos. Outro ponto relevante diz respeito ao desconhecimento sobre os limites de velocidade durante a utilização dos patinetes, pois a maioria respondeu incorretamente ou não soube informar. Quanto à frequência de uso, 87,5% utilizam o patinete uma ou duas vezes por semana, mais no período da tarde, com duração média de até cinco minutos por trajeto.

Em relação às vias utilizadas, os usuários de patinete consideram que se pode andar em ciclofaixas/ciclovias (75%), calçadas (62,5%) e estacionamentos (45%), porém apenas 2,5% avaliaram essas vias como excelentes, enquanto a maioria as considerou regulares (40%), ruins (30%) ou péssimas (15%). Entre os que avaliaram negativamente, 37,9% afirmaram que a qualidade das vias prejudica o uso do patinete. No entorno do campus, nenhum participante classificou as vias como excelentes, e 30% dos que avaliaram negativamente afirmaram que a infraestrutura dificulta completamente o uso do patinete. Comparando a utilização das vias internas e externas ao campus, 55,6% consideram que ambas apresentam problemas semelhantes. Quanto à segurança, apenas 17,5% consideram o patinete muito seguro, e nenhum o classificou como totalmente inseguro. Entre os cuidados apontados como essenciais, para o uso adequado do patinete, destacam-se a existência de locais apropriados para circulação e o controle da velocidade em áreas movimentadas.

Sobre os sinistros de trânsito (Figura 2), entre os usuários que relataram já ter se acidentado com patinetes, 72% se acidentaram dentro do campus e 28% sofreram sinistros fora do campus. No campus, os principais motivos para sinistros se associaram à: escorregamento em solo molhado ou inclinado (29%), quedas provocadas por irregularidades na via (14%) e colisões com pedestres ou quedas isoladas (29%). Já fora do campus, as causas mais comuns foram colisão com pessoa ou veículo (14%) e falha mecânica (14%). Após os sinistros, alguns usuários relataram que deixaram de utilizar o patinete. Os principais fatores de risco apontados no campus foram: iluminação inadequada, buracos/desníveis e calçadas estreitas. Fora do campus, os riscos mais citados foram ausência de ciclovias ou vias seguras, falta de locais apropriados para estacionamento, insegurança ao circular entre carros e pedestres e dificuldade para encontrar patinetes disponíveis.

Os maiores desafios para quem usa patinetes (Figura 3), tanto no campus quanto fora dele, são a procura para achar um patinete disponível e a ausência de áreas adequadas para circulação. Isso mostra que a infraestrutura e a oferta dos patinetes precisam melhorar. Outras questões importantes são a escassez de lugares para estacionar e o registro de ocorrências de sinistros. Em menor número, aparecem relatos de problemas com equilíbrio, erros no *app* e equipamentos quebrados. Já temas como ciclovias danificadas e preços elevados foram pouco citados, e só uma minoria disse ter tido esse tipo de problema, o que reforça a existência de desafios estruturais e operacionais que exigem discussão.

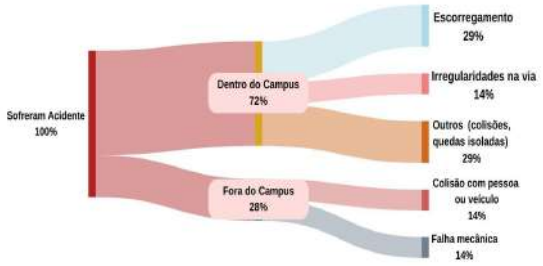


Figura 2: Diagrama de Sankey sobre sinistros com patinetes elétricos no campus.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

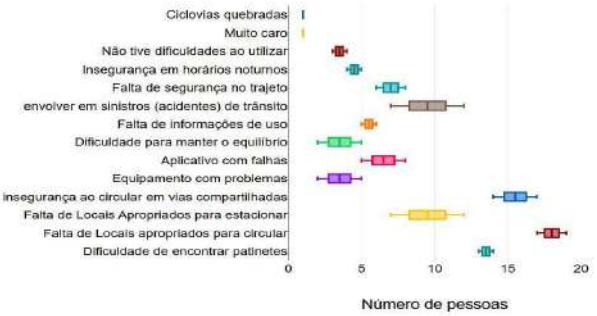


Figura 3: Dificuldades encontradas dentro e fora do Campus.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Entre os usuários que não utilizam patinetes, os motivos mais citados foram: falta de interesse pessoal (48%), alto custo (44%), insegurança nas vias (22%), falta de habilidade para utilizar (26,7%), falta de infraestrutura adequada (17,3%), inexistência de patinetes disponíveis onde necessário (11,9%) e preferência por outro meio de transporte (25,6%). Dentre esses, 82,6% se deslocam a pé no campus. Quanto à probabilidade de uso, 73 pessoas declararam-se indiferentes ou neutras, 70 disseram ser muito improvável e apenas 26 afirmaram que seria muito provável. No entanto, esse número aumentaria caso houvesse incentivo institucional, mostrando que um posicionamento da administração do campus tem um papel importante nesse assunto. A maioria avaliou as vias internas e externas como regulares, sendo que 17% apontaram as condições das vias como fator que os impede de usar o patinete. Além desse aspecto, destacaram-se como barreiras: falta de segurança no trânsito, ausência de equipamentos de proteção acessíveis (como capacete), iluminação insuficiente, sinalização precária, ausência de fiscalização e de orientação adequada sobre seu uso correto.

Cabe destacar que o CDR da UnB conta com transporte público interno por ônibus circular, utilizado sobretudo em deslocamentos mais longos. Embora esse serviço seja relevante, ele não foi incluído nesta análise por não se enquadrar no escopo da micromobilidade individual. Recomenda-se, entretanto, que estudos futuros integrem o ônibus circular na avaliação comparativa, ampliando a compreensão das alternativas de mobilidade no campus.

4. CONCLUSÃO

Embora o foco do estudo seja a micromobilidade individual, ressalta-se a importância de integrar outros modos disponíveis no campus, como o ônibus circular, para compor um sistema mais eficiente, seguro e inclusivo. Os patinetes elétricos configuram-se como alternativa para deslocamentos internos e de acesso ao CDR, mas sua adoção é limitada por condições de infraestrutura consideradas inadequadas por usuários e não usuários. Também foram relatadas inseguranças relacionadas à presença de pedestres e veículos, além do desconhecimento sobre normas de uso. Na percepção dos entrevistados, a infraestrutura interna do campus não apresenta diferenças significativas em relação à infraestrutura externa ao campus quanto à adaptabilidade ao uso dos patinetes. Assim, para que esse modo de transporte seja efetivamente integrado ao cotidiano universitário, como um complemento à mobilidade por transporte público e como uma opção sustentável é fundamental a implementação de políticas institucionais voltadas à melhoria da infraestrutura interna e de acesso ao campus, bem como a atuação da administração do campus na coordenação de ações que promovam melhorias nas vias, segurança e sinalização. Além disso, parcerias com empresas especializadas

podem contribuir para ampliar o acesso, garantir a manutenção dos equipamentos e fortalecer a educação dos usuários, promovendo uma adoção segura e eficiente dos patinetes no ambiente acadêmico.

Agradecimentos: A presente pesquisa faz parte do Projeto PIBEX2025 "PJ181- Observatório da Mobilidade Segura, Saudável e Sustentável - Mob3S". Os autores agradecem ao Decanato de Extensão da UnB pela aprovação do projeto e à comunidade universitária pela participação na resposta aos questionários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARSLAN, H.; YAYIK, A.; ÜNAL, B. G. Investigation of the usage of micromobility vehicles: the case of Ankara. *Journal of Intelligent Transportation Systems and Applications*, v. 7, n. 2, p. 97–108, 2023. DOI: 10.51513/jitsa.1257000.

BEHRENDT, F.; STINSON, M.; GUPTA, S.; FURLAN, A. Conceptualizing micromobility: the multi-dimensional and socio-technical perspective. *Preprints*, publicado em 28 jun. 2023. DOI: 10.20944/preprints202209.0386.v2.

COCUZZA, E.; INTURRI, G.; IGNACCOLO, M.; TORRISI, V. A conceptual framework for measuring the performance of urban micromobility. *Transportation Research Procedia*, v. 52, p. 522–529, 2021. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.01.063.

D'AGOSTINO, C.; CARTENÌ, C.; TIZNADO-AITKEN, A. Users' perceptions of e-scooter parking: a latent segmentation approach. *Research in Transportation Business & Management*, v. 51, 100983, 2024. DOI: 10.1016/j.rtbm.2024.100983.

DE SOUZA, E.; FERREIRA, J. C. B.; CUNHA, A. M. et al. E-scooter safety on Brazilian streets: a public health perspective. *Journal of Transport & Health*, v. 32, 101704, 2024. DOI: 10.1016/j.jth.2024.101704.

GRIJALBA, M. A.; SOLANO, M. J.; GARCÍA, D. P.; LÓPEZ, I. Electric scooter use: the perspective of university students. *Heliyon*, v. 9, n. 7, e17592, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17592.

HARDT, C.; BOGENBERGER, K. Usage of e-scooters in urban environments. *Transportation Research Procedia*, v. 37, p. 155–162, 2019. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.178.

IGNACCOLO, M.; INTURRI, G.; COCUZZA, E.; GIUFFRIDA, N.; LE PIRA, M.; TORRISI, V. Developing micromobility in urban areas: network planning criteria for e-scooters and electric micromobility devices. *Transportation Research Procedia*, v. 60, p. 448–455, 2022. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.12.058.

JUODVALKIENĖ, V.; ČYGAS, J.; JASIŪNIENĖ, M. Challenges of e-scooter use in urban environments. *Transport*, v. 36, supl. 1, p. 507–513, 2021. DOI: 10.3846/transport.2021.16485.

MOBILIZE; AGÊNCIA BRASÍLIA. Brasília: mais de 173 mil viagens de patinete elétrica em um mês. *Mobilize Brasil*, Brasília, 2025. Disponível em: https://www.mobilize.org.br/noticias/14281/brasilia-mais-de-173-mil-viagens-de-patinete-eletrica-em-um-mes.html. Acesso em: 13 jul. 2025.

POURRAHMANI, E.; MARZOUGHI, H.; SADEGHIAN, F. Assessing safety of e-scooter infrastructure using artificial intelligence and computer vision techniques. *Futures*, v. 152, 103376, 2024. DOI: 10.1016/j.futures.2024.103376.

RAMLI, R.; HASSAN, A.; ISA, M. S. M. et al. Urban e-scooter infrastructure design: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 13, 7374, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19137374.

SILVA, E.; CASTANHO, L. M. M.; OLIVEIRA, A. S.; MORAIS, J. P. A framework for e-scooter infrastructure assessment considering accessibility, comfort, and safety: a case study of Fortaleza, Brazil. *Sustainability*, v. 15, n. 9, 9045, 2023. DOI: 10.3390/su15099045.

SUÁREZ-CABRERA, D.; ARÉVALO, I.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, J. L. Adopting e-scooters as a sustainable travel mode in tourist cities. *Tourism Management*, v. 103, 104615, 2024. DOI: 10.1016/j.tourman.2024.104615.

TACO, P. W, G. (2023). Relatório da Pesquisa da Mobilidade e Transportes dos Usuários do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Plano Diretor do Campus Darcy Ribeiro. Brasília. Distrito Federal.

TORRES, V. (2025) Hospital de Base registra 11 acidentes com patinetes elétricos em abril. *Correio Braziliense*, Brasília, 7 maio 2025. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/cidades-df/2025/05/7138959-hospital-de-base-registra-11-acidentes-com-patinetes-eletricos-em-abril.html. Acesso em: 13 jul. 2025.

Nathalia Cristina de Souza Silva (222029118@aluno.unb.br)
Marcos Antônio de Oliveira Filho (211045561@aluno.unb.br)
Pedro de Castro Belchior (211026056@aluno.unb.br)
Pastor Willy Gonzales Taco (pastor@unb.br)
Zuleide Oliveira Feitosa (zfeitosa@unb.br)
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Darcy Ribeiro, Brasília – DF, Brasil.

PLANEJAMENTO CICLOVIÁRIO COM BASE NA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS: UM OLHAR PARA FORTALEZA

Paulo Bruno Souza Nunes, Flávio José Craveiro Cunto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
O uso da bicicleta como meio de transporte sustentável tem se consolidado como uma alternativa viável nas cidades. Este estudo investiga a percepção de ciclistas e potenciais usuários em Fortaleza, analisando desejos, comportamentos e barreiras enfrentadas entre fevereiro e agosto de 2024. Com base em 1.290 entrevistas presenciais, a pesquisa revelou grande interesse em pedalar mais, apesar de desafios como insegurança, infraestrutura inadequada e falta de conforto. Ciclovias segregadas foram melhor avaliadas que ciclofaixas, reforçando a importância da separação física. A predominância de jovens destacou a necessidade de políticas inclusivas. Conclui-se que a escuta ativa da população é essencial para orientar o planejamento cicloviário e promover uma mobilidade urbana mais segura, eficiente e acessível.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da bicicleta, enquanto forma ativa de transporte, é fundamental para promover a mobilidade urbana sustentável, ajudando a reduzir as emissões e a melhorar a saúde pública. Contudo, a adoção em larga escala ainda enfrenta obstáculos, como a falta de infraestrutura adequada, questões relacionadas à segurança, barreiras culturais e limitações nas políticas públicas (Makahleh; Taamneh; Dissanayake, 2025).

A cidade de Fortaleza tem se consolidado como uma referência nacional em políticas públicas voltadas à ciclomobilidade, com avanços significativos na ampliação da infraestrutura cicloviária, na oferta de bicicletas compartilhadas e na integração com outros modos de transporte (Silveira et al., 2024). Apesar desses avanços, os desafios ainda persistem, sobretudo no que diz respeito à segurança viária, conectividade da malha cicloviária e à percepção dos próprios ciclistas sobre as condições de uso da bicicleta na cidade.

Entender as reais necessidades, expectativas e barreiras percebidas pelos ciclistas é um passo essencial para o aprimoramento das políticas públicas e para a consolidação de uma cidade verdadeiramente ciclável. A escuta ativa desses usuários, que vivenciam diariamente os espaços urbanos, permite identificar pontos críticos, valorizar boas práticas e propor intervenções mais aderentes à realidade local (Coelho e Braga, 2010).

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de uma investigação técnica conduzida com ciclistas da cidade de Fortaleza, visando compreender seus desejos em relação ao uso da bicicleta como meio de transporte cotidiano. Por meio de um levantamento direto, buscou-se captar percepções sobre segurança, conforto, infraestrutura e integração modal.

2. MÉTODO

Este trabalho adotou uma abordagem quantitativa, descritiva e exploratória, com o objetivo de compreender os desejos, percepções e padrões de comportamento de ciclistas (atuais e potenciais) na cidade de Fortaleza. A pesquisa foi estruturada com base em um questionário fechado, aplicado de forma presencial, contemplando variáveis relacionadas ao perfil sociodemográfico, uso da bicicleta, percepção de segurança e conforto da infraestrutura cicloviária, além de sentimentos e desejos relacionados ao uso futuro da bicicleta.

2.1. Público-Alvo e Amostra

A amostra da pesquisa foi composta por 1.290 respondentes, residentes em Fortaleza e que utilizam ou possuem interesse em utilizar a bicicleta como modo de transporte. Embora o questionário tenha sido concebido com foco em pessoas com idade mínima de 16 anos, a aplicação de campo resultou na participação de 42 respondentes com idade inferior a 18 anos, os quais foram mantidos na base por representarem um grupo relevante de usuários jovens, especialmente estudantes e adolescentes que utilizam a bicicleta em seus deslocamentos cotidianos.

A coleta foi realizada em 24 dias distintos, entre os meses de fevereiro e agosto de 2024, em pontos estratégicos da cidade, com abordagem presencial por equipe de campo treinada. A seleção dos entrevistados seguiu a técnica de amostragem por conveniência, priorizando diversidade de perfis e

horários com maior fluxo de ciclistas (Pico Manhã e Pico Tarde).

2.2. Instrumento de Coleta

O questionário aplicado foi estruturado em cinco blocos principais:

- Informações sociodemográficas: idade, gênero, raça/cor, bairro de residência, atividade principal e renda domiciliar;
- Comportamento de mobilidade: frequência do uso da bicicleta, finalidade das viagens, tempo de deslocamento e uso nos últimos 30 dias;
- Percepções sobre infraestrutura: avaliação de conforto em diferentes tipos de vias (com ou sem ciclovias), barreiras percebidas e sugestões;
- Aspirações e desejos: intenção de pedalar mais, condições ideais para o uso da bicicleta, e sentimentos relacionados ao ato de pedalar;
- Segmentação de perfil: com base em uma tipologia pré-definida (entusiasmado e confiante, interessado mas preocupado, de jeito nenhum, entre outros).

A coleta foi realizada por meio de formulários digitais, preenchidos diretamente em tablets pela equipe técnica.

2.3. Procedimentos de Aplicação

A aplicação dos questionários foi realizada, exclusivamente de forma presencial, por meio de abordagens diretas conduzidas por uma equipe de campo treinada, através do programa Bloomberg Initiative for Cycling Infrastructure (BICI), em parceria com a Global Designing Cities Initiative (GDCI). A coleta ocorreu em locais estratégicos da malha cicloviária de Fortaleza, priorizando pontos com elevada circulação de ciclistas, como interseções semaforizadas, canteiros centrais com travessias, ciclovias segregadas e ciclofaixas adjacentes a vias arteriais. Os entrevistadores abordaram ciclistas em deslocamento ou em momentos de parada, garantindo agilidade na aplicação e evitando prejuízos à fluidez do trajeto dos participantes.

Os períodos de coleta coincidiram com os horários de pico da mobilidade urbana — das 6h30 às 9h30 e das 16h30 às 19h — garantindo a representatividade de ciclistas que utilizam a bicicleta como meio de transporte para o trabalho, estudo ou outras finalidades cotidianas. Além disso, foram respeitados critérios éticos, como o consentimento verbal dos participantes, a garantia de anonimato e a não obrigatoriedade de participação.

2.4. Tratamento e Análise de Dados

Os dados foram organizados em planilhas do Microsoft Excel e analisados com o auxílio do software R, utilizando recursos estatísticos descritivos como:

- Distribuições percentuais por item e categoria;
- Gráficos de barras e histogramas;
- Medidas de tendência central (média e mediana) e dispersão (desvio-padrão), quando aplicável.

A análise buscou identificar padrões de opinião e frequência, associando características do perfil dos usuários com suas percepções e sugestões sobre o ambiente cicloviário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os principais achados da pesquisa realizada com usuários e potenciais usuários da bicicleta em Fortaleza, com o objetivo de compreender suas percepções, experiências e desejos em relação à infraestrutura cicloviária da cidade. A análise dos dados buscou identificar padrões de comportamento, barreiras enfrentadas e fatores que poderiam incentivar o uso mais frequente da bicicleta como meio de transporte.

A amostra foi composta por 1.290 respondentes, dos quais 54% se identificaram como homens e 46% como mulheres. A faixa etária mais representativa foi a de 18 a 25 anos, que correspondeu a aproximadamente 23,5% da amostra, seguida pelos grupos de 26 a 30 anos (19,8%) e 31 a 35 anos (13,3%). Ainda que o público-alvo original fosse maior de 18 anos, 42 entrevistados declararam idade inferior a 18 anos, representando 3,2% do

total, o que demonstra o interesse de jovens na ciclomobilidade urbana. Em relação à autodeclaração de raça/cor, 64% se identificaram como pardos, seguidos por 25% como brancos.

No que se refere ao comportamento de uso, 59% dos participantes afirmaram não ter utilizado a bicicleta nos últimos 30 dias, enquanto 41% indicaram uso recente, revelando uma parcela significativa de ciclistas ativos. Apesar disso, mais de 70% dos respondentes declararam que gostariam de pedalar mais do que atualmente, evidenciando um grande potencial de expansão do uso da bicicleta na cidade, caso as condições de segurança, infraestrutura e conforto sejam aprimoradas.

Em relação à avaliação da infraestrutura, os participantes foram convidados a opinar sobre o nível de conforto ao pedalar em diferentes tipos de via. Para vias com ciclovia em rodovias de alta velocidade, mais de 56% consideraram o ambiente confortável ou muito confortável, enquanto para ciclofaixas em vias similares, apenas 27% demonstraram o mesmo nível de satisfação, apontando que a separação física entre o ciclista e os veículos motorizados influencia diretamente a percepção de segurança e conforto.

Tabela 1: Percepção de conforto em diferentes tipos de via

Satisfação geral	Rua com ciclovia (alta velocidade)	Rua com ciclofaixa (alta velocidade)	Ruas locais com infraestrutura cicloviária	Total médio (%)
Muito confortável	26,1	7,2	31,5	21,6
Confortável	30,0	20,0	32,4	27,5
Neutro	14,0	17,2	13,2	14,8
Desconfortável	8,3	28,6	10,0	15,6
Muito desconfortável	21,6	27,0	12,9	20,1

No tocante à atratividade do ambiente cicloviário, critérios como sombra, conservação da via, paisagismo e conectividade foram destacados por diversos respondentes como fatores que dificultam ou desincentivam o uso diário da bicicleta. A ausência de pontos de apoio, interdições frequentes, obstruções físicas e falhas na continuidade da malha cicloviária também foram mencionadas como entraves para uma experiência satisfatória no deslocamento ativo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal compreender os desejos, percepções e padrões de comportamento de ciclistas e potenciais ciclistas na cidade de Fortaleza, a partir de uma escuta direta com mais de mil respondentes abordados em diversos pontos da cidade. Os resultados revelaram um cenário desafiador, mas ao mesmo tempo promissor, para o avanço da ciclomobilidade urbana.

A pesquisa mostrou que há um contingente expressivo de pessoas que não utilizam a bicicleta atualmente, mas que manifestam forte desejo de incorporá-la à sua rotina de deslocamento. Esse potencial reprimido indica que, havendo melhorias estruturais e institucionais, o uso da bicicleta pode crescer de forma significativa e sustentável. A maioria dos respondentes expressou o desejo de pedalar mais do que atualmente, ainda que muitos enfrentem barreiras como insegurança, falta de infraestrutura contínua, ausência de conforto e conflitos com o tráfego motorizado.

A percepção de conforto revelou-se fortemente associada ao tipo de via. Ciclovias fisicamente segregadas, mesmo em rodovias de maior velocidade, foram avaliadas de forma mais positiva do que ciclofaixas pintadas no pavimento. Esse achado reforça a importância de intervenções com segregação física e continuidade da

malha cicloviária, como elementos-chave para a segurança viária e para a atratividade do modo.

Outro aspecto importante foi a representatividade dos jovens na pesquisa, inclusive menores de 18 anos, o que demonstra que o uso da bicicleta extrapola o perfil tradicional de trabalhador adulto e deve ser pensado também como ferramenta de mobilidade para estudantes e adolescentes. A diversidade de perfis identificados — em termos de idade, gênero, renda e experiência com a bicicleta — aponta para a necessidade de políticas públicas inclusivas e integradas, capazes de atender diferentes realidades e necessidades.

Desta forma, conclui-se que o planejamento cicloviário em Fortaleza deve continuar evoluindo com base na escuta ativa da população, especialmente dos usuários da bicicleta, cuja experiência é essencial para orientar decisões de investimento, priorização de projetos e estratégias educativas. Mais do que ampliar a infraestrutura física, é necessário promover um ambiente urbano seguro, convidativo e democrático, consolidando a bicicleta como um meio de transporte relevante, eficiente e acessível. Os dados obtidos nesta pesquisa servem como subsídio para um planejamento urbano centrado no usuário, reforçando a importância de políticas participativas na promoção da mobilidade ativa e contribuindo para a construção de uma Fortaleza mais acessível, segura e inclusiva para todos os modos de deslocamento

Contudo, é importante destacar que a percepção de eficiência e acessibilidade pode variar entre diferentes regiões da cidade, especialmente considerando as desigualdades socioeconômicas presentes em Fortaleza. Assim, recomenda-se que futuras pesquisas ampliem a amostragem e considerem uma abordagem mais representativa da diversidade urbana, de modo a garantir que o planejamento cicloviário atenda, de forma equitativa, às necessidades de todos os perfis de ciclistas.

Agradecimentos
O presente Trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Makahleh, Hisham Y.; Taamneh, Madhar M.; Dissanayake, Dilum. Promoting Sustainable Transport: A Systematic Review of Walking and Cycling Adoption Using the COM-B Model. Future Transportation, v. 5, n. 3, p. 79, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/futuretransp5030079. Acesso em: 02 jul. 2025.

Coelho, L. R., & Braga, M. G. C. (2010). A percepção dos ciclistas quanto ao risco e ao desconforto existentes no uso das ciclovias. In Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito, Transporte e Logística – PANAM 2010, Lisboa, Portugal.

Silveira, Érica Fernanda Ferreira da et al. Análise da política pública de mobilidade sustentável em Fortaleza: um foco no modo de bicicleta e sua evolução entre 2011 e 2022. In: Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2024., Florianópolis. Anais eletrônicos..., Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/analise-da-politica-publica-de-mobilidade-sustentavel-em-fortaleza-um-foco-no-mo?lang=pt-br> Acesso em: 25 Jun. 2025.

Paulo Bruno Souza Nunes (paulo.nunes@det.ufc.br)
Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará (UFC). Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil

PLANEJAMENTO DE MOBILIDADE URBANA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NO MUNICÍPIO DE RONDON DO PARÁ-PA

Marlon Braga dos Santos[1], Fábio de Souza Santos[1], Francisco de Souza Soares[1], Gisely Vieira dos Santos[1], Nilton de Aguiar Sousa[1], Patrick Campana Rosa[1], Robson Bonfim Souza[1]
[1] Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí

RESUMO
O planejamento da mobilidade urbana continua sendo um dos principais desafios enfrentados por pequenas cidades da região amazônica. Este trabalho buscou avaliar o plano de mobilidade urbana do município de Rondon do Pará-PA, verificando seu alinhamento com os objetivos da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) e as metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 da Agenda 2030. Para tanto, realizou-se a revisão e análise do documento técnico do plano municipal de mobilidade urbana, instituído em 2014. Os resultados demonstram avanços na gestão e planejamento da mobilidade no município, especialmente quanto à priorização de modos não motorizados. Entretanto, foram identificadas falhas pontuais, como a ausência de metas claras, pouca integração entre os transportes e o uso do solo e pouca atenção à sustentabilidade ambiental. Desse modo, percebe-se que o plano deve ser mais enfático na definição de metas e ações estratégicas que garantam o desenvolvimento urbano sustentável.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ritmo acelerado de urbanização do Brasil a partir da década de 1960, fez com que houvesse uma segregação socioespacial do solo urbano, o que dificultou o acesso da população mais pobre a todos os espaços da cidade, ocasionando uma estruturação baseada na dicotomia centro-periferia/rico-pobre (Ojima *et al.*, 2015). A configuração dispersa das cidades eleva o número de problemas urbanos e, principalmente, de mobilidade da população que fica cada vez mais dependente de modos motorizados de locomoção, dificultando o atendimento de seus desejos de viagens (Portugal *et al.*, 2010).

Diante desse cenário, as cidades têm como desafio a promoção de uma mobilidade urbana sustentável. Esse termo se refere à maneira de se deslocar que prioriza os modos não motorizados e o transporte coletivo, em detrimento do transporte individual motorizado, ao uso racional do espaço urbano e também à justiça social (Bohusch e Scheibe, 2014, p. 175). A Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída através da Lei Federal nº 12.587/2012, preconiza o plano de mobilidade urbana (PlanMob) como principal instrumento para "garantir a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e mobilidade das pessoas e cargas no território do Município".

Paz (2021), que ressalta que os planos de mobilidade precisam estar alinhados aos princípios do desenvolvimento sustentável e da justiça social. Nesse sentido, o alinhamento desses instrumentos com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU) pode ser uma estratégia importante para que as cidades se tornem mais inclusivas, sustentáveis, resilientes e seguras. Dentre as metas estabelecidas pelo ODS 11, destacam-se aquelas que visam, até 2030, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, além de aumentar a urbanização inclusiva e sustentável (ONU, 2015).

Apesar disso, Fontana (2023) apontou que após uma década da instituição da PNMU, diversos municípios brasileiros ainda não elaboraram seus PlanMob. Dantas (2022), por sua vez, mostrou que os planos muitas vezes falham por não considerar as realidades locais e por não envolver adequadamente a população no processo. No estado do Pará, segundo dados do Ministério das Cidades, dos 104 municípios obrigados legalmente a elaborar o PlanMob, apenas 17, ou seja, aproximadamente 16%, o fizeram até o ano de 2025. Esses dados demonstram a fragilidade do ente federativo municipal nos mecanismos de implantação da PNMU, especialmente aqueles de menor porte.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a conformidade do PlanMob do município de Rondon do Pará, instituído no ano de 2016. A análise foi realizada por meio de uma pesquisa bibliográfica, tendo como parâmetros as diretrizes estabelecidas pela ONMU e as metas do ODS 11, da Agenda 2030.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

2.1. Caracterização da área de estudo

O município de Rondon do Pará, está localizado no sudeste do estado do Pará, distando aproximadamente 523 km da capital, Belém, pertencendo às regiões imediata e intermediária de Marabá (Figura 1). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2022, o município possuía uma área de 8.246 km² e uma população de 53.143 habitantes, com densidade demográfica de 6,44 hab./km². Está situado às margens da rodovia BR-222, principal eixo rodoviário que o conecta a municípios importantes como Marabá, Paragominas e Imperatriz (MA), além de contar com vias vicinais que o ligam a localidades como Açailândia e Vila Nova dos Martírios (Rondon do Pará, 2021).

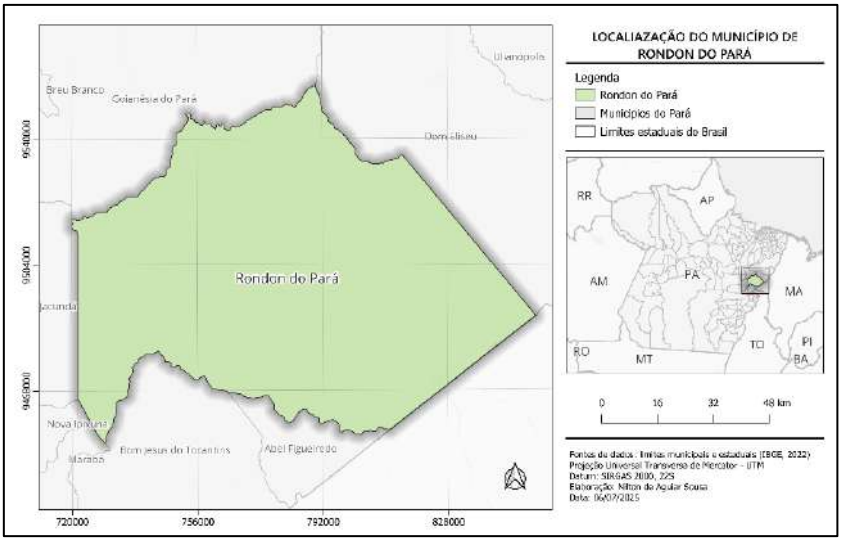


Figura 1 - Localização do município de Rondon do Pará

Historicamente, a economia do município era baseada na extração madeireira, porém nos últimos anos passou a se concentrar nas atividades agropecuárias e comerciais, destacando-se o cultivo de arroz, milho, mandioca e pimenta-do-reino, bem como o reflorestamento com Paricá e Eucalipto. A cidade tem sua formação ligada à construção da PA-070, conta com um terminal rodoviário intermunicipal, não possui sistema de transporte público, sendo a maioria dos deslocamentos sendo realizados pelos modos individuais motorizados e não motorizados (Rondon do Pará, 2021).

2.2. Coleta e tratamento de dados

A metodologia adotada nesta pesquisa consistiu numa abordagem exclusivamente bibliográfica, objetivando reunir, compreender e interpretar materiais teóricos e legais relacionados às políticas de mobilidade urbana. Esta investigação foi dividida em três etapas, organizadas sequencialmente para garantir a organização das informações e a fundamentação da análise do plano de mobilidade urbana do município de Rondon do Pará, que pode ser acessado através do seguinte *link*: https://rondondopara.pa.gov.br/wp-content/uploads/2021/03/PLANMOB_Rondon_PRODUTO-08072930015126991 06.pdf.

Na primeira etapa, realizou-se uma busca detalhada nos principais repositórios acadêmicos, como: SciELO, Periódicos CAPES e *Web Of Science*, além de bases de dados normativas e jurídicas, com a finalidade de reunir artigos científicos revisados por pares e leis pertinentes ao tema. As palavras-chave utilizadas na busca foram: avaliação, sustentabilidade e plano de mobilidade urbana, totalizando 22 documentos publicados de entre 2020 e 2025, dos quais 14 foram selecionados para compor a versão final da pesquisa.

A segunda etapa consistiu na consulta ao portal oficial da Prefeitura Municipal de Rondon do Pará, com o intuito de localizar e obter o Plano de Mobilidade Urbana do município. Após a leitura do documento, foi realizada a análise de suas diretrizes e metas. Na terceira e última etapa, correlacionaram-se os documentos selecionados nas etapas anteriores, examinando inicialmente, os artigos acadêmicos, com destaque para

aqueles que abordam conceitos, diretrizes e desafios da mobilidade urbana em diversos municípios brasileiros. Em seguida, elaborou-se uma análise criteriosa da Lei Federal nº 12.587/2012 e do ODS 11, que orientam as políticas nacionais sobre o tema. Por fim, com base nos critérios: acessibilidade e inclusão universal, integração de transportes e uso do solo, sustentabilidade ambiental e redução de impactos, realizou-se a avaliação do PlanMob de Rondon do Pará, identificando o grau de conformidade estabelecido pela legislação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação do PlanMob de Rondon do Pará

Rondon do Pará, de acordo com a PNMU, enquadra-se na obrigatoriedade da elaboração do PlanMob. Logo, o documento começou a ser elaborado em 2013, com o objetivo de organizar o sistema de transporte do município, melhorando a circulação de pessoas e mercadorias. Além disso, considerando os principais problemas de mobilidade da cidade, como a falta de acessibilidade, o crescimento não planejado e a ausência de estrutura adequada para pedestres e ciclistas, em 2014 o plano foi oficialmente instituído pela Lei Municipal nº 671/2014, passando a integrar o conjunto de normas e do planejamento urbano do município.

A elaboração do plano contou com o apoio técnico de empresa contratada, responsável por conduzir os estudos técnicos, diagnósticos e proposições de diretrizes. O processo envolveu o levantamento das condições do sistema viário, da infraestrutura existente e dos principais fluxos de deslocamento no município. Também foram consideradas visitas a campo e análises sobre os modos de transporte utilizados pela população. Essas etapas foram fundamentais para identificar os principais entraves à mobilidade urbana local e propor ações voltadas à melhoria da acessibilidade, da segurança e da eficiência dos deslocamentos (Rondon do Pará, 2014).

Durante a elaboração do plano, foram realizadas consultas públicas, por meio de reuniões e audiências, com a participação de representantes da sociedade civil, do poder público e de instituições locais. No entanto, o envolvimento da população ficou limitado a momentos pontuais, sem garantia de participação contínua ao longo do processo. Sobre a continuidade do PlanMob, a PNMU estabelece que esses documentos devem ser revisados periodicamente, preferencialmente a cada dez anos, ou em prazos menores, conforme as transformações urbanas; ou seja, o plano já passou do período de atualização, devendo ocorrer o quanto antes, incorporando novos dados, ajustando metas e fortalecendo os mecanismos de controle social e de participação popular (Rondon do Pará, 2014).

3.1.1 Acessibilidade e inclusão universal

No quesito acessibilidade e inclusão universal, o PlanMob analisado destaca a importância dessa vertente como parte essencial do planejamento urbano. Foram sugeridas medidas como: rebaixamento de meios-fios, implantação de faixas de pedestres e melhoria de calçadas. Teoricamente, essas propostas demonstraram o compromisso de atender pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida. No entanto, o plano não ofereceu um levantamento detalhado das condições de acessibilidade presentes no município, nem definiu prazos ou recursos para sua execução. Mesquita *et al.* (2021), ressaltam que para haver um planejamento inclusivo, faz-se necessário possuir dados locais concretos e considerar a percepção dos usuários sobre os espaços públicos e os modos de deslocamento.

Embora não haja transporte coletivo na cidade, o documento não apresenta medidas específicas para garantir transporte público acessível à população. Não são mencionadas possíveis adaptações nos veículos, muito menos nas estruturas das paradas de ônibus ou ações específicas para garantir o embarque e desembarque de pessoas com mobilidade reduzida. Contrariando os princípios da Lei Federal nº 12.587/2012, que prevê acessibilidade universal como direito fundamental. Oliveira e Feroni (2022) alertam que, sem ações práticas nessa área, as desigualdades no direito de ir e vir se perpetuam.

Do ponto de vista da meta 11.2 do ODS 11, que propõe cidades mais inclusivas e sustentáveis, o plano também apresentou limitações. Embora mencione a importância do transporte acessível, não há estratégias claras para atender pessoas com mobilidade reduzida, idosos, crianças e mulheres. Vale destacar que a acessibilidade vai além da infraestrutura física: ela envolve também a segurança, o conforto e a autonomia nos deslocamentos diários. Sem essas garantias, o direito à cidade continua restrito para uma parcela significativa da população. Enquanto essas necessidades não forem priorizadas, parte da população seguirá excluída do pleno uso dos

espaços urbanos (Macedo, 2021).

3.1.2 Integração entre transporte e uso do solo

Em relação à integração entre transporte e uso do solo, PlanMob reconhece a necessidade de articular o transporte com o uso do solo ao propor estratégias para a organização do sistema viário e a estruturação urbana. Aponta também, a importância de planejar a localização dos serviços, dos comércios e equipamentos públicos com intuito de favorecer os deslocamentos a pé, de bicicleta ou por transporte coletivo. Entretanto, ainda existe deficiência na definição de como essa integração será colocada em prática. Essa articulação entre mobilidade e uso do solo precisa ser embasada em planos diretores, com zoneamentos compatíveis com o tráfego de pessoas e com políticas de densificação equilibrada para reduzir a necessidade de longos trajetos (Paz, 2021).

A ausência de formas para integrar o centro, os bairros periféricos e zonas de expansão urbana também revela fragilidade no planejamento territorial. O documento não deixa claro sobre como o crescimento da cidade será acompanhado pela expansão ou adaptação dos sistemas de transporte. Isso vai contra a meta 11.a do ODS 11, que incentiva a integração das relações entre áreas urbanas, periurbanas e rurais. Conforme apontado por Paz (2021), sem essa articulação entre transporte e ordenamento territorial, as cidades tendem a aprofundar desigualdades espaciais, dificultando o acesso da população aos serviços e oportunidades.

3.1.3 Sustentabilidade ambiental e redução de impactos

Nesse tópico, o PlanMob de Rondon do Pará cita a necessidade de adotar práticas sustentáveis, assim como o incentivo ao uso da bicicleta e melhorias no tráfego para os pedestres. Essas ações estão voltadas à ideia de redução do uso de veículos particulares, contribuindo para diminuir a emissão de poluentes e os impactos negativos ao meio ambiente. Porém, o plano é limitado quanto à exposição de metas prevendo a redução de emissões, preservação da qualidade do ar, dentre outros. Fontana (2023) ressalta que muitos planos de mobilidade ainda falham por não articular estratégias ambientais com o planejamento urbano e os sistemas de transporte, o que compromete sua efetividade na promoção de cidades mais sustentáveis e conectadas.

O documento não apresenta ações voltadas à integração da mobilidade em conjunto, visando a mitigação das mudanças climáticas ou com políticas de resíduos e drenagem urbana. Isso mostra uma falha em relação às diretrizes na meta 11.6 da ODS, que trata da redução do impacto ambiental das cidades. Segundo Macedo (2021), muitos planos municipais ainda tratam a sustentabilidade como um elemento secundário, deixando de incorporá-la de forma integrada e efetiva ao planejamento urbano e às estratégias de mobilidade. No caso de Rondon do Pará, o plano avança ao reconhecer a importância da mobilidade sustentável, mas precisa desenvolver ferramentas, técnicas e operacionais, para que essa sustentabilidade se concretize.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa demonstrou que o PlanMob de Rondon do Pará representou um marco na política urbana da cidade, promovendo avanços nas áreas de acessibilidade, melhoria de calçadas e valorização dos modos de transporte não motorizados. Entretanto, foram identificadas falhas importantes, como a ausência de metas objetivas, a falta de integração entre transporte e uso do solo, e a pouca atenção à sustentabilidade ambiental. Para avançar, o plano precisa transformar suas diretrizes em metas concretas, com prazos, recursos e indicadores de inclusão.

Além disso, observa-se que o plano necessita ser revisto e aprimorado, já que possui mais de 10 anos de implantação. Deve-se também propor estratégias que reduzam a carência de métodos de acompanhamento dos objetivos traçados e favoreçam a participação contínua da sociedade. É necessário que o município incorpore ao planejamento dados e pesquisas locais e atuais, além de incluir estratégias mais detalhadas alinhadas às metas do ODS 11. Também é importante promover a cooperação entre transportes, meio ambiente e planejamento urbano, tornando o PlanMob um instrumento eficaz e transformador para a cidade.

Marlon Braga dos Santos (marlonbraga19@gmail.com), *Fábio de Souza Santos* (fabiodesouzasantos0@gmail.com), *Francisco de Souza Soares* (franciskimsoares@gmail.com), *Gisely Vieira dos Santos* (santosgisely48@gmail.com), *Nilton de Aguiar Sousa* (niltonaguiar15@gmail.com), Patrick Campana Rosa (patrickcampanarosa@gmail.com), *Robson Bonfim Souza* (robsombonfim44@gmail.com).
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Civil, Rodovia BR-422, Km 13, S/N, Vila Permanente, Tucuruí, Pará, Brasil.

Mobilidade e Acessibilidade

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE E DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA EM SÃO CRISTÓVÃO/SE

Débora Maria Barbosa Santos, Rozana Rivas de Araújo , Marcelo Augusto Costa Maciel
Universidade Federal de Sergipe

RESUMO
A mobilidade urbana representa um dos principais desafios nas cidades brasileiras, sobretudo diante da urbanização acelerada, da dependência do transporte individual e da ausência de infraestrutura adequada para os modos coletivos e ativos. Este estudo investiga as condições de mobilidade no município de São Cristóvão/SE, parte da Região Metropolitana de Aracaju, com foco no acesso da população a serviços e equipamentos urbanos essenciais. Foram analisados os modais disponíveis e a infraestrutura de suporte, incluindo calçadas, ciclovias e pontos de ônibus. A metodologia combinou revisão teórica, análise espacial e cartográfica, permitindo identificar desigualdades na distribuição da infraestrutura urbana. Os resultados apontam uma forte concentração de serviços e transporte nas áreas centrais, enquanto as regiões periféricas apresentam limitações de acesso e conectividade. O estudo conclui que é urgente a elaboração de um Plano de Mobilidade Urbana que promova equidade territorial, acessibilidade universal e integração entre mobilidade, ocupação do solo e políticas públicas sustentáveis.
Palavras-chave: transporte público coletivo, acessibilidade, planejamento urbano, Região Metropolitana de Aracaju.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

Analisar as condições da mobilidade urbana em São Cristóvão/SE, identificando as potencialidades e fragilidades no deslocamento de pessoas e mercadorias, e sua integração com a Região Metropolitana de Aracaju (RMA), e ainda: (i) identificar áreas com boa cobertura de equipamentos e serviços, acessíveis por transporte ativo; (ii) relacionar densidade populacional e renda com o acesso aos serviços e ao transporte público; (iii) avaliar a qualidade das calçadas e sua adequação às normas técnicas e; (iv) compreender a articulação da mobilidade urbana municipal com os demais municípios da RMA.

2. MÉTODO UTILIZADOS

O trabalho foi estruturado em sete etapas metodológicas: (i) revisão teórica sobre mobilidade urbana no Brasil, urbanização e políticas públicas, com base em 22 referências bibliográficas relevantes; (ii) análise da legislação municipal, com verificação da existência e aprovação do Plano Diretor e do PMU, conforme previsto na Lei nº 12.587/2012; (iii) mapeamento dos serviços e equipamentos urbanos, considerando três escalas de abrangência (Machado, 2019): vizinhança (400m), bairro (800m) e cidade (1200m), aplicando ferramentas como Google Maps e QGis 3.22.13; (iv) estudo da malha de transporte público, com levantamento de linhas, trajetos e pontos de ônibus e também avaliação da qualidade das calçadas, a partir de imagens do Google Street View em 15 pontos selecionados aleatoriamente por setor (centro, centro-periferia e periferia), utilizando o QGis 3.34.2; (v) análise da relação de São Cristóvão com a Região Metropolitana de Aracaju, observando os fluxos intermunicipais e o impacto da metropolização nos deslocamentos; (vi) levantamento de obras e investimentos em infraestrutura urbana em andamento ou planejadas, com foco na mobilidade. E por fim, (vii) elaboração dos produtos acadêmicos (artigo e relatório).

3. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

A análise da mobilidade urbana no município de São Cristóvão/SE evidenciou uma série de disparidades espaciais, estruturais e funcionais que comprometem a acessibilidade plena da população, especialmente nos bairros periféricos e zonas rurais.

Inicialmente, verificou-se a concentração dos principais equipamentos e serviços urbanos — como escolas, unidades básicas de saúde, praças, centros comerciais e polos de emprego — nas regiões mais consolidadas, a exemplo dos bairros Rosa Elze, Eduardo Gomes e do Centro Histórico. Estas áreas, por estarem próximas ao limite com Aracaju, beneficiam-se da integração territorial e funcional com a capital, concentrando também as principais vias de acesso, infraestrutura de transporte e maior densidade populacional.

Por outro lado, áreas afastadas como os povoados e bairros periféricos apresentam deficiência significativa de infraestrutura urbana e mobilidade. Os mapas elaborados em diferentes escalas urbanas (400m, 800m e 1200m) demonstraram que grande parte da população reside fora dos limites ideais de acesso aos serviços, o que compromete o deslocamento diário e o direito à cidade.

No tocante ao transporte público coletivo, identificou-se um número reduzido de linhas e pontos de ônibus, sobretudo nas áreas mais afastadas. A ausência de integração tarifária com os demais municípios da RMA e a irregularidade dos horários prejudicam a confiabilidade e eficiência do sistema, fazendo com que a população

dependa de transportes informais ou motorização individual.
A avaliação da infraestrutura para pedestres evidenciou a má qualidade das calçadas. Das 15 calçadas avaliadas, apenas 2 apresentavam condições mínimas de acessibilidade. As principais falhas incluem: ausência de faixa livre de circulação, presença de degraus e desníveis, calçadas estreitas ou inexistentes, obstruções causadas por mobiliário urbano ou rampas de garagem e completa ausência de piso tátil e sinalização horizontal.
Em relação à mobilidade ativa, foram identificadas apenas duas ciclovias de extensão limitada, descontinuadas e sem interligação entre bairros. A infraestrutura cicloviária não atende aos critérios de segurança, continuidade e sinalização preconizados pela Política Nacional de Mobilidade Urbana.
Também foi observado que o município não possui Plano de Mobilidade Urbana (PMU) aprovado, contrariando o disposto na Lei Federal nº 12.587/2012. A inexistência do PMU impede a elaboração de metas e diretrizes para o desenvolvimento sustentável do transporte e da circulação urbana, dificultando o acesso a recursos federais e a implementação de políticas estruturantes.
Por fim, constatou-se que os fluxos metropolitanos entre São Cristóvão e Aracaju são intensos, sobretudo nos deslocamentos pendulares para estudo, trabalho e saúde, porém, a infraestrutura urbana e o sistema de transporte não foram dimensionados para atender a essa realidade. A cidade continua funcionando parcialmente como cidade-dormitório, sem que haja políticas públicas efetivas de articulação metropolitana.

4. CONCLUSÕES DO ESTUDO

A mobilidade urbana em São Cristóvão/SE é marcada por um padrão de desigualdade territorial, com concentração de serviços e infraestrutura nas áreas centrais e dificuldades de deslocamento nas periferias. Essa configuração reforça a exclusão social e limita o acesso da população mais vulnerável a direitos básicos. A pesquisa demonstra que a elaboração e implementação de um Plano de Mobilidade Urbana é urgente, sendo fundamental para orientar ações integradas que promovam o acesso democrático à cidade, a equidade no uso do solo urbano e a sustentabilidade dos deslocamentos. Além disso, a ampliação da malha cicloviária, a requalificação das calçadas e a expansão da rede de transporte público devem ser priorizadas.
A mobilidade deve ser vista não apenas como um desafio técnico, mas como uma questão social, ambiental e de justiça urbana, cuja abordagem precisa envolver os diversos atores da sociedade em um processo participativo e transparente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A.; CARVALHO, D.; SILVA, R. (2022). Mobilidade urbana na Região Metropolitana de Aracaju.
BRASIL. Lei nº 12.587/2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana.
BRASIL. Ministério das Cidades. Caderno Técnico para Projetos de Transporte Ativo, 2016.
COSTA, L.; SILVA, P.; COHEN, R. (2013). Automóvel e cidade: conflitos e transformações.
GOMIDE, A.; GALINDO, E. (2013). Mobilidade urbana e a crise do rodoviarismo no Brasil.
MACHADO, J. (2019). Escalas urbanas e acessibilidade em cidades médias.
IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022.
SILVEIRA, B.; COCCO, G. (2013). Mobilização social e transporte público nas Jornadas de Junho. MOBILIZE BRASIL.
Panorama dos PMUs no Brasil. Acesso em 2024.

Débora Maria Barbosa Santos (deborabarbosas1108@gmail.com)
Rozana Rivas de Araújo (rozanarivas@academico.ufs.br)
Marcelo Augusto Costa Maciel (mamaciel@academico.ufs.br)
Universidade Federal de Sergipe, Campus de Laranjeiras/SE, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Praça Samuel de Oliveira, 1, Centro, Laranjeiras – SE, Brasil.

CARACTERIZAÇÃO DAS DESIGUALDADES NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO TRABALHO DOS RESIDENTES NA PERIFERIA DE FORTALEZA E CAUCAIA

Darliane Gomes Pereira, Rebeca da Silva Souza , Carlos Felipe Grangeiro Loureiro,
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
A expansão radioconcêntrica da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), apoiada em 4 eixos viários que partem da capital e funcionam como seus vetores de expansão, direcionaram a ocupação heterogênea e desigual dos territórios da capital e maiores cidades adjacentes que compõem a RMF, resultando nos fenômenos de espraiamento urbano e *spatial mismatch*. Ao investigar as desigualdades socioespaciais na acessibilidade e relações com os padrões de mobilidade ao trabalho da população residente na periferia de Fortaleza e no município vizinho de Caucaia, o presente relatório de iniciação científica apresenta uma análise descritiva e crítica dos processos de formação do espaço e planejamento urbano nas duas maiores cidades da RMF, com posterior caracterização da problemática do *spatial mismatch* e da acessibilidade casa-trabalho, considerando a evolução dos padrões de mobilidade dos segmentos populacionais de baixa renda.

1. OBJETIVOS

Esta pesquisa de iniciação científica teve por objetivo geral investigar as desigualdades socioespaciais na acessibilidade e relações com os padrões de mobilidade ao trabalho da população residente na periferia de Fortaleza e município vizinho de Caucaia. Como objetivos específicos: i) analisar o processo de formação do espaço e planejamento das duas maiores cidades da RMF; ii) caracterizar o fenômeno do *spatial mismatch* para a população de baixa renda, e seus níveis de acessibilidade a oportunidade de emprego formal, na periferia oeste de Fortaleza e em Caucaia; iii) analisar a evolução dos padrões de mobilidade ao trabalho da população de baixa renda em Fortaleza e Caucaia nas duas últimas décadas; iv) caracterizar a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade ao trabalho da população de baixa renda periferizada de Fortaleza e Caucaia.

2. PROPOSTA METODOLÓGICA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A proposta metodológica é de abordagem mista, qualitativa e quantitativa. Em uma abordagem qualitativa, foram realizadas duas revisões com base em análise documental: uma do processo de formação espacial e outra do processo de planejamento urbano e de transportes em Fortaleza e Caucaia, visando produzir uma análise descritiva e crítica de ambos. Enquanto na revisão do processo de formação do espaço urbano das duas maiores cidades da RMF, buscou-se compreender o histórico de ocupação e expansão do espaço metropolitano, na revisão do processo de planejamento integrado dos territórios procurou-se analisar como têm evoluído os produtos de planejamento urbano e de transportes, assim como em que medida esses incorporaram a metropolização em suas diretrizes e ações propostas (Cavalcante, 2023).

Quantitativamente, foram realizadas análises de caracterização do fenômeno do *spatial mismatch* (Castro *et al.*, 2025) na periferia oeste de Fortaleza e em Caucaia, considerando a distribuição espacial da população de baixa renda e das oportunidades de empregos formais e informais direcionadas a ela (Pinto *et al*., 2023). Dentre os 19 municípios que compõem a RMF, elegeu-se Caucaia como representativa dos fenômenos de metropolização abordados pois abrange extensos conjuntos habitacionais na sua periferia adjacente a Fortaleza, cuja construção está associada a metropolização da região, além de atividades ligadas ao setor turístico e industrial (Accioly *et al*., 2007). Utilizou-se, portanto, da consolidação de bases de dados (BD) socioeconômicos, de uso e ocupação do solo, das redes viárias e de transportes públicos, além da distribuição espacial de empregos formais e informais para o ano-base de 2020.

Realizou-se, ainda, a análise da evolução dos padrões de mobilidade ao trabalho da população de baixa renda em Fortaleza e Caucaia, utilizando os dados das Pesquisas Origem-Destino (OD) Domiciliares da RMF de 1996 e 2019, conforme metodologia proposta por Pinto *et al.* (2021). Posteriormente, fazendo-se uso da tipologia de problema e metodologia de caracterização proposta por Sousa (2019), foram implementados esforços analíticos de avaliação, no nível estratégico, da problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade ao trabalho (Garcia et al., 2018) da população de baixa renda periferizada de Fortaleza e de Caucaia. Por fim, em uma validação qualitativa da avaliação estratégica da problemática, realizou-se oficinas comunitárias com grupos representativos da população de baixa renda nos territórios em

estudo - confirmando que esses recortes populacionais possuem níveis de acessibilidade e padrões de mobilidade distintos entre si, resultantes da percepção dos indivíduos sobre suas decisões locacionais e de viagens nos contextos nos quais estão inseridos.

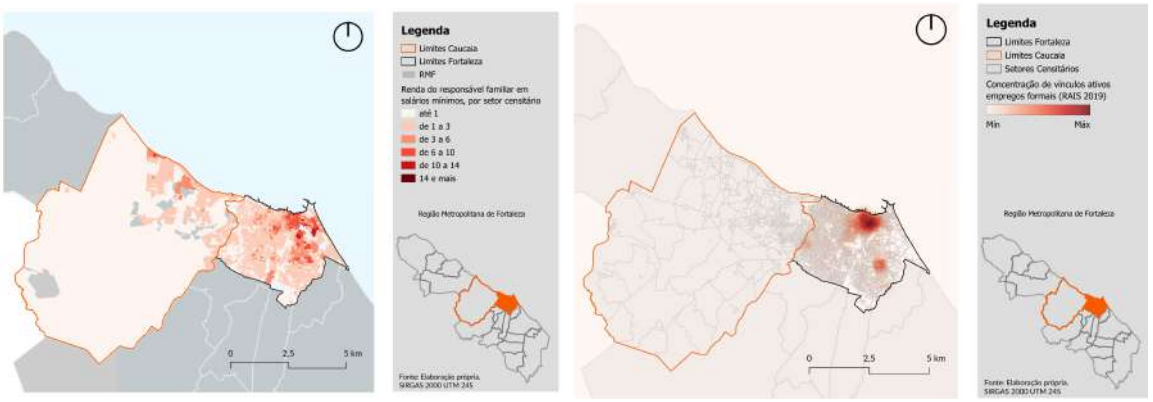


Figura 1: Mapas de renda (IBGE 2022) e concentração de empregos formais (RAIS 2019) caracterizando o fenômeno do *spatial mismatch* na periferia oeste de Fortaleza e no município de Caucaia.

3. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Conclui-se que a pesquisa apresenta contribuições fenomenológicas relevantes para uma compreensão mais aprofundada da complexa problemática da segregação socioespacial resultante do espraiamento urbano e metropolitano no Brasil. Com a periodização histórica dos processos de formação espacial e do processo de planejamento urbano e de transportes de Fortaleza e Caucaia, buscou-se produzir conhecimento sobre suas convergências, ou ausências, representando ainda a evolução do espraiamento urbano devido à expansão dispersa na escala metropolitana. Como contribuições metodológicas, acredita-se que a organização de bases de dados socioeconômicos, de uso e ocupação do solo, das redes viárias e de transportes públicos para estimativa da distribuição espacial de empregos, combinadas aos registros de características dos indivíduos, domicílios e viagens observadas nas duas pesquisas OD domiciliares, tenha proporcionado uma caracterização mais robusta do fenômeno do *spatial mismatch* para a população de baixa renda e dos seus respectivos níveis de acessibilidade ao trabalho, e também na sistematização mais consistente da evolução dos padrões de mobilidade ao trabalho da população de baixa renda residente na periferia oeste de Fortaleza e em Caucaia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Accioly, V. M.; Lustosa, M. C.; Pequeno, R.; Dantas, E., Bernal, C. e Silva, J. B. (2007). Estrutura Urbana e Mobilidade na Região Metropolitana de Fortaleza. In E. Dantas e R. Pequeno (eds.) Como Anda Fortaleza. Rio de Janeiro: Letra Capital, p. 131-144.

Castro, I. R. de; C. F. G. Loureiro e M. A. Giannotti (2025) Evolution of accessibility to work for low-income populations in Brazil: Towards equitable and sustainable metropolises? *Habitat International*, v. 156, n., p. 103306. DOI:10.1016/j.habitatint.2025.103306

Cavalcante, C. B. (2023) *Crítica ao planejamento urbano e de transportes em Fortaleza à luz do paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/72068 (acesso em 14/09/2025).

Garcia, C. S. H. F.; M. do R. M. R. Macário; E. D. de A. G. Menezes e C. F. G. Loureiro (2018) Strategic Assessment of Lisbon's Accessibility and Mobility Problems from an Equity Perspective. *Networks and Spatial Economics*, v. 18, n. 2, p. 415–439. DOI:10.1007/s11067-018-9391-4

Pinto, D. G. L.; Siqueira, M. F.; Loureiro, C. F. G. e F. F. L. M. Sousa (2021) Inferência Causal da Evolução dos Padrões de Escolha Modal por Classe de Renda em Fortaleza. In Anais do XXXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, v.1, p. 2106–2118.

Pinto, D. G. L.; C. F. G. Loureiro; F. F. L. de M Sousa e B. Motte-Baumvol (2023) The effects of informality on socio-spatial inequalities in accessibility to job opportunities: Evidence from Fortaleza, Brazil. *Journal of Transport Geography*, 108. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2023.103577

Sousa, F. F. L. de M. (2019) *Diagnóstico estratégico das desigualdades socioespaciais na acessibilidade ao trabalho em Fortaleza*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/72068 (acesso em 14/09/2025).

Darliane Gomes Pereira (darlianegomes@arquitetura.ufc.br)
Rebeca da Silva Souza (rebeca.souza@det.ufc.br)
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro (felipe@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Rua Prof. Armando Farias, Bloco 703, Pici, Fortaleza, Ceará, Brasil.

OS DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA EM ARACAJU/SE

Arthur Almeida Resende, Rozana Rivas de Araújo, Marcelo Augusto Costa Maciel
Universidade Federal de Sergipe

RESUMO
Este relatório procurou analisar as diferentes escalas de mobilidade urbana em Aracaju/SE e sua relação com a região metropolitana, visando identificar dinâmicas e fragilidades nos deslocamentos. A metodologia focou no estudo espacial e cartográfico dos modais de transporte ativo e coletivo, avaliando oferta, infraestrutura, distribuição e acessibilidade a serviços e equipamentos urbanos essenciais, além de relacioná-los com aspectos populacionais como densidade e perfis de renda. Os resultados explicitam disparidades significativas no acesso a equipamentos públicos, com áreas de maior renda ou centralidade concentrando a maior parte da oferta, enquanto que as zonas periféricas, sobretudo no extremo sul, apresentam déficit crítico, forçando moradores a longas jornadas e alta dependência do transporte público. A precariedade da infraestrutura peatonal agrava essa situação, limitando mobilidade e acesso a oportunidades, e evidenciando a urgente necessidade de um planejamento urbano mais equitativo e sustentável.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

O estudo visa analisar a mobilidade urbana de Aracaju, identificando potencialidades e fragilidades no tocante ao deslocamento de pessoas e mercadorias dentro de seu limite municipal, bem como a interrelação com sua região metropolitana. Para isso, procurou-se: identificar a equidade na oferta de equipamentos e serviços urbanos ao longo da mancha urbana da cidade; relacionar aspectos populacionais, como densidade, distribuição e renda, com às distância aos equipamentos urbanos e ao transporte público coletivo; analisar a qualidade das calçadas da cidade; identificar as novas ou futuras obras de infraestrutura urbana voltadas à melhoria da mobilidade urbana de Aracaju e sua integração metropolitana; e, a partir desses elementos, avaliar a mobilidade urbana da capital sergipana e sua relação com os demais municípios que compõem a região metropolitana.

2. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, a metodologia do plano de trabalho foi organizada em sete etapas: I) construção de referencial teórico sobre mobilidade urbana e urbanismo no Brasil e na Região Metropolitana de Aracaju (RMA); II) verificação do cumprimento das exigências do Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001) e da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012), quanto à existência e aprovação dos planos diretor e de mobilidade; III) mapeamento de equipamentos e serviços urbanos (escolas, praças, hospitais, parques, centros esportivos, comerciais e culturais, etc.), classificados segundo as escalas territoriais de atendimento propostas por Machado (2019) — vizinhança (400 m), bairro (800 m) e cidade (1.200 m) —, incluindo também rotas de transporte coletivo, infraestrutura cicloviária e demais elementos relevantes; IV) integração desses dados com informações populacionais (distribuição, densidade e renda média ponderada), com base nos setores censitários do IBGE (2010 e 2022), e processados no software QGIS 3.34.2 para análises espaciais e estimativas de cobertura populacional; V) avaliação das condições das calçadas em 15 pontos aleatórios da cidade, distribuídos entre as zonas classificadas como Centro, Centro-Periferia e Periferia, com base nas diretrizes dos Cadernos Técnicos para Projetos de Mobilidade Urbana do Ministério das Cidades (Brasil, 2016); VI) análise das relações intermunicipais entre Aracaju e a RMA, com foco nos fluxos e padrões de deslocamento da população por transporte coletivo; e VII) levantamento e mapeamento georreferenciado de obras de infraestrutura urbana previstas ou em andamento, com potencial impacto na mobilidade da RMA.

3. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

A análise da acessibilidade urbana em Aracaju considerou a cobertura de equipamentos urbanos em três escalas territoriais — vizinhança (400 m), bairro (800 m) e cidade (1.200 m) — conforme o método de Machado (2019), associada à classificação dos bairros em Centro, Centro-periferia e Periferia. Na escala de vizinhança, equipamentos de uso cotidiano, como praças, comércios locais e escolas de ensino básico, apresentam ampla cobertura em algumas regiões. Destacam-se as paradas de ônibus, que atendem 95,9% da população, embora persistam bolsões periféricos com graves déficits. Praças (72,7%) concentram-se nas áreas centrais e em conjuntos habitacionais planejados, enquanto os comércios locais (63,5%) se distribuem ao longo de grandes avenidas e no Centro, deixando vazios comerciais nas periferias. Já a cobertura de creches (23,6%) e escolas públicas de ensino infantil (29,5%), fundamental I (48,2%) e II (40,3%) é desigual, com maior presença no Centro e Centro-periferia, e escassez nas franjas urbanas.
Na escala de bairro, as desigualdades se intensificam. A cobertura do ensino médio público (60,9%) e das

UBSs (74,6%) é moderada, mas apresenta falhas nas periferias e, sobretudo, na antiga Zona de Expansão. A oferta de parques urbanos é extremamente baixa (12,1%) e concentrada em bairros de maior renda. Supermercados (65,6%) têm distribuição razoável, mas faltam em bairros populosos como Porto Dantas e Santa Maria. A presença de centros esportivos é limitada (31,8%), ainda que parcialmente compensada pelos chamados "espaços esportivos" (87,2%) — pequenas quadras, pistas de skate e afins —, geralmente presentes em praças públicas e com distribuição mais ampla, mas ainda insuficientes em algumas áreas de baixa renda.
Na escala da cidade, os equipamentos de maior porte revelam desigualdades marcantes. Hospitais públicos atendem diretamente apenas 38,9% da população; centros culturais (29,2%) e instituições públicas de ensino superior (12,8%) também apresentam cobertura limitada e concentrada no Centro. Em contraste, os polos geradores de emprego possuem ampla distribuição (95,8%), embora sua proximidade nem sempre se traduza em absorção da mão de obra local.
O sistema de transporte público conta com 114 linhas, mas apresenta cobertura deficiente na antiga Zona de Expansão, onde as rotas têm baixa capilaridade. Existem quatro corredores exclusivos para ônibus, concentrados em regiões centrais e com falhas estruturais que comprometem sua eficácia. No contexto metropolitano, Aracaju exerce centralidade sobre a rede de transporte, sem conexões diretas entre os demais municípios da RMA, o que sobrecarrega os terminais e limita a autonomia metropolitana. Destaca-se, ainda, o acesso precário a áreas com importantes polos empregatícios, como o presente na Barra dos Coqueiros.
A malha cicloviária é formada principalmente por ciclovias segregadas em canteiros centrais, com maior densidade na Zona Sul. Contudo, a rede é fragmentada, com baixa conectividade e capilaridade, especialmente na Zona Norte. A situação das calçadas também evidencia contrastes territoriais: no Centro, embora niveladas, são estreitas e obstruídas; no Centro-periferia, somam-se estreitamento, degradação e insegurança; já na Periferia, muitos trechos sequer contam com calçadas, expondo pedestres a riscos constantes.
Por fim, Aracaju passa por importantes intervenções de mobilidade, como a construção da Avenida Perimetral Oeste, que possuirá 13,6 km de extensão, faixas exclusivas, ciclovias e passeios, ligando as zonas Norte, Oeste e Sul. Outras obras, no entanto, se concentram no entorno do bairro Coroa do Meio, área de maior renda, incluindo a duplicação e construção de pontes e uma nova avenida ribeirinha voltada ao lazer.

4. CONCLUSÕES

A análise evidenciou fortes desigualdades territoriais na mobilidade urbana de Aracaju. A concentração de equipamentos públicos em áreas centrais e de maior renda contrasta com a escassez nas periferias, especialmente no extremo sul, ampliando a necessidade de longos deslocamentos para acesso a serviços básicos. Essa distribuição desigual intensifica a dependência do transporte coletivo, muitas vezes insuficiente e mal distribuído, e do transporte individual, quando possível. Ademais, a infraestrutura para modos ativos, como ciclovias e calçadas, também apresenta fragilidades, com redes desconectadas e condições precárias, sobretudo nas áreas periféricas. Embora existam obras relevantes em andamento, como a Perimetral Oeste, ainda falta uma estratégia integrada e equitativa de mobilidade. Os resultados reforçam a urgência de políticas que promovam acessibilidade local, reduzam desigualdades e incentivem a mobilidade sustentável, algo dificultado pela ausência de um plano de mobilidade urbana vigente, bem como de um plano diretor atualizado.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro recebido para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil (2016*) Cadernos Técnicos para Projetos de Mobilidade Urbana: Transporte Ativo*. Brasília: Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana – SEMOB, Ministério das Cidades.

Machado, L. (2019) *Avaliação ex ante da política setorial de mobilidade urbana brasileira e de planos de mobilidade urbana*. 297 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Arthur Almeida Resende (arthuralmeidare@hotmail.com)
Rozana Rivas de Araújo (rozanarivas@academico.ufs.br)
Marcelo Augusto Costa Maciel (mamaciel@academico.ufs.br)
Universidade Federal de Sergipe, Campus de Laranjeiras/SE, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Praça Samuel de Oliveira, 1, Centro, Laranjeiras – SE, Brasil.

OS DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA EM NOSSA SENHORA DO SOCORRO E BARRA DOS COQUEIROS/SE

Débora Maria Barbosa Santos, Rozana Rivas de Araújo
Universidade Federal de Sergipe.

RESUMO
Este artigo analisa as condições de mobilidade urbana nos municípios de Nossa Senhora do Socorro e Barra dos Coqueiros, localizados na Região Metropolitana de Aracaju/SE. A pesquisa teve como foco a acessibilidade da população aos serviços essenciais, ao transporte coletivo e à mobilidade ativa. A metodologia incluiu revisão bibliográfica, análise dos Planos Diretores, mapeamento de serviços urbanos, avaliação da qualidade das calçadas, levantamento de ciclovias e pontos de ônibus, com apoio de ferramentas como Google Street View e QGis. Os resultados revelam desigualdades territoriais marcantes: concentração de infraestrutura nos centros urbanos, precariedade nas áreas periféricas e ausência de integração metropolitana. Ambos os municípios não possuem Plano de Mobilidade Urbana, o que compromete o planejamento de ações efetivas. Conclui-se que é urgente a elaboração de políticas públicas voltadas à mobilidade sustentável, com foco em transporte coletivo acessível, requalificação das calçadas e incentivo à mobilidade ativa como forma de garantir o direito à cidade e a inclusão social.
Palavras-chave: planejamento urbano; transporte coletivo; Região Metropolitana de Aracaju; acessibilidade.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do estudo é investigar e comparar as condições de mobilidade urbana nos municípios de Nossa Senhora do Socorro e Barra dos Coqueiros, em Sergipe, com ênfase na acessibilidade da população aos serviços essenciais, à estrutura de transporte coletivo e aos meios de deslocamento não motorizados, dentro da dinâmica da Região Metropolitana de Aracaju (RMA). Especificamente, busca-se: (i) identificar zonas com adequada cobertura de equipamentos e serviços, acessíveis por meio da mobilidade ativa; (ii) analisar a relação entre densidade populacional, níveis de renda e acesso aos serviços e ao transporte público; (iii) avaliar as condições físicas das calçadas, verificando sua conformidade com os parâmetros técnicos de acessibilidade; e (iv) compreender como se dá a integração da mobilidade urbana local com os demais municípios da RMA.

2. MÉTODO UTILIZADOS

A pesquisa foi desenvolvida a partir de sete etapas metodológicas principais. A primeira consistiu em uma revisão teórica sobre mobilidade urbana, urbanização e políticas públicas no Brasil, fundamentada em 22 referências bibliográficas relevantes. Em seguida, procedeu-se à análise da legislação municipal, com ênfase na verificação da existência, vigência e conteúdo do Plano Diretor e do Plano de Mobilidade Urbana, conforme exigido pela Lei nº 12.587/2012. Na terceira etapa, foi realizado o mapeamento dos equipamentos e serviços urbanos, utilizando três escalas territoriais de cobertura – vizinhança (400m), bairro (800m) e cidade (1200m) – conforme proposto por Machado (2019), com apoio das ferramentas Google Maps e QGis 3.22.13. A quarta etapa abrangeu o estudo do sistema de transporte público, incluindo o levantamento das linhas, rotas e pontos de ônibus, além da análise da qualidade das calçadas com base em imagens do Google Street View, considerando 15 pontos distribuídos entre as regiões central, de transição e periférica, com tratamento dos dados no QGis 3.34.2. Posteriormente, foi realizada a análise da articulação entre São Cristóvão e a Região Metropolitana de Aracaju, observando os fluxos intermunicipais e os efeitos do processo de metropolização nos deslocamentos cotidianos. A sexta etapa envolveu o levantamento de obras e investimentos em infraestrutura urbana, tanto em execução quanto previstos, com ênfase nas intervenções relacionadas à mobilidade. Por fim, como etapa final, foram produzidos os materiais acadêmicos decorrentes da pesquisa, incluindo o relatório técnico e o artigo científico.

3. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

A pesquisa evidenciou desigualdades marcantes nas condições de mobilidade urbana em Nossa Senhora do Socorro e Barra dos Coqueiros. Em Nossa Senhora do Socorro, observou-se concentração de infraestrutura nos bairros planejados — Marcos Freire I, II, III e João Alves — onde estão localizados a maioria dos 299 pontos de ônibus e das 33 linhas existentes. Esses bairros possuem melhor acesso a equipamentos urbanos, transporte coletivo e vias pavimentadas. Por outro lado, regiões periféricas, como Taiçoca de Fora e Parque dos Faróis, enfrentam dificuldades de deslocamento devido à baixa cobertura de transporte, ausência de integração com a rede metropolitana e precariedade das calçadas. Das 15 calçadas analisadas, apenas duas apresentaram condições adequadas de acessibilidade, com as demais apresentando largura insuficiente,

obstáculos físicos e falta de sinalização. O município possui cerca de 13 km de ciclovias, mas estas são descontínuas, mal sinalizadas e com manutenção deficiente. Embora integre a RMA, a cidade não possui Plano de Mobilidade Urbana, e o Plano Diretor vigente trata o tema de forma superficial.

Em Barra dos Coqueiros, os desafios são ainda mais severos. Foram identificadas apenas 4 linhas de ônibus e 38 pontos de parada, com cobertura restrita ao centro urbano. Regiões periféricas e loteamentos populares não possuem atendimento regular. Não existem ciclovias nem estrutura voltada à mobilidade ativa. As calçadas, em sua maioria, estão em péssimo estado, com desníveis, barreiras físicas e ausência de faixa livre para pedestres. A população depende intensamente da capital Aracaju para acesso a serviços de saúde, educação e trabalho, mas não há integração tarifária entre os sistemas municipais. O Plano Diretor (Lei nº 02/2008) é desatualizado e não contempla diretrizes claras para mobilidade urbana, e o município também não elaborou seu PMU.

Esses dados revelam um padrão de mobilidade urbana excludente, em que a população das áreas periféricas enfrenta barreiras significativas para acessar serviços essenciais e oportunidades. A ausência de planejamento e de infraestrutura adequada compromete o direito à cidade e reforça desigualdades territoriais na Região Metropolitana de Aracaju.

4. CONCLUSÕES DO ESTUDO

A análise comparativa entre os municípios de Nossa Senhora do Socorro e Barra dos Coqueiros evidencia fragilidades estruturais e institucionais no que diz respeito à mobilidade urbana, sobretudo no que se refere à integração territorial, à equidade no acesso aos serviços públicos e à qualidade da infraestrutura voltada à circulação de pedestres, ciclistas e usuários do transporte coletivo. Ambos os municípios, embora com realidades distintas, apresentam características comuns: concentração de infraestrutura nos centros urbanos, desatendimento das áreas periféricas, precariedade das calçadas e ausência de um sistema cicloviário funcional. Nossa Senhora do Socorro, apesar de contar com uma malha de transporte mais extensa e algumas ciclovias, ainda sofre com a má distribuição dos recursos e com a exclusão das populações que vivem nos bairros mais distantes e povoados. Já Barra dos Coqueiros enfrenta uma situação ainda mais crítica, com virtual inexistência de políticas públicas de mobilidade ativa, rede de transporte extremamente limitada e calçadas em estado de abandono. Em ambos os casos, chama atenção a inexistência de Planos de Mobilidade Urbana, instrumento essencial para diagnosticar os problemas, estabelecer metas e orientar investimentos em mobilidade sustentável e inclusiva.

Dessa forma, o estudo conclui que é urgente a elaboração e implementação de Planos de Mobilidade Urbana nos dois municípios, com participação social efetiva, diagnóstico técnico detalhado e integração à dinâmica metropolitana. É necessário requalificar calçadas, implantar ciclovias seguras, ampliar e integrar o sistema de transporte coletivo e garantir que a mobilidade seja tratada como um direito urbano fundamental, orientado pela justiça social, acessibilidade universal e sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A.; CARVALHO, D.; SILVA, R. (2022). Mobilidade urbana na Região Metropolitana de Aracaju.
BRASIL. Lei nº 12.587/2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana.
BRASIL. Ministério das Cidades. Caderno Técnico para Projetos de Transporte Ativo, 2016.
COSTA, L.; SILVA, P.; COHEN, R. (2013). Automóvel e cidade: conflitos e transformações.
GOMIDE, A.; GALINDO, E. (2013). Mobilidade urbana e a crise do rodoviarismo no Brasil.
MACHADO, J. (2019). Escalas urbanas e acessibilidade em cidades médias.
IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022.
SILVEIRA, B.; COCCO, G. (2013). Mobilização social e transporte público nas Jornadas de Junho.
MOBILIZE BRASIL. Panorama dos PMUs no Brasil. Acesso em 2024.

Débora Maria Barbosa Santos (deborabarbosas1108@gmail.com)
Rozana Rivas de Araújo (rozanarivas@academico.ufs.br)
Universidade Federal de Sergipe, Campus de Laranjeiras/SE, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Praça Samuel de Oliveira, 1, Centro, Laranjeiras – SE, Brasil.

Mobilidade e Acessibilidade

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ACESSIBILIDADE URBANA E SAÚDE PÚBLICA: UM ESTUDO GEOESPACIAL SOBRE O ACESSO AOS CENTROS DE SAÚDE EM BELO HORIZONTE

Kamilla Oliveira Silva[1], **Daniela Antunes Lessa**[1, 2]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO
Essa pesquisa propõe uma análise da acessibilidade da população de Belo Horizonte aos Centros de Saúde (CS), considerando os deslocamentos a pé e por transporte público por ônibus. Parte-se da hipótese de que desigualdades socioespaciais podem comprometer o direito à saúde, especialmente em áreas periféricas e vulneráveis. Utilizando dados georreferenciados, mapas isócronos e indicadores sociais, o estudo pretende avaliar as áreas cobertas e descobertas, identificando zonas de menor acessibilidade. Os resultados poderão orientar diretrizes de planejamento para melhorar o acesso, como ajustes nas áreas de abrangência das unidades, incentivo à mobilidade ativa e aprimoramento da rede de transporte público por ônibus.

1. PROPOSTA DE PESQUISA

O acesso equitativo aos serviços de saúde é um dos pilares fundamentais para a garantia do direito à saúde e a promoção da justiça social no espaço urbano. A forma como a população se distribui na cidade está relacionada às alternativas de mobilidade disponíveis e à própria produção do espaço, que frequentemente reforça padrões de segregação social e elitização de áreas centrais (Costa, 1994).

Nesse cenário, a pesquisa busca analisar a acessibilidade aos CS em Belo Horizonte, a partir das áreas de abrangências de cada unidade. Embora exista planejamento territorial para distribuição das equipes de saúde, persistem desigualdades no acesso físico aos serviços. A pergunta central é: como se configura a acessibilidade da população de Belo Horizonte aos CS, considerando deslocamentos a pé e por transporte público, e quais áreas apresentam déficits dentro dos limites definidos?

Diante disso, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar a acessibilidade da população de Belo Horizonte aos Centros de Saúde, considerando deslocamentos a pé e por transporte público, a partir de análise geoespacial das áreas de abrangência. Especificamente, busca-se:

- Analisar a acessibilidade aos CS por caminhamento e identificar as áreas com baixa cobertura.
- Avaliar a acessibilidade aos CS por transporte público por ônibus para as áreas não cobertas por caminhamento e identificar as áreas com baixa cobertura.
- Analisar a relação entre os dados de cobertura e os indicadores sociais e populacionais para localizar áreas mais vulneráveis.Propor diretrizes de planejamento para melhorar o acesso aos CS, a partir dos resultados.

Com base na problemática levantada e nos objetivos propostos, formulam-se as seguintes hipóteses:

- Uma parcela significativa da população em áreas periféricas não possui acesso adequado por caminhamento aos CS, excedendo os limites máximos de caminhamento.
- O transporte público não supre satisfatoriamente as limitações do deslocamento a pé, devido a trajetos indiretos, baixa frequência e necessidade de integração.
- Áreas com menor acessibilidade coincidem com regiões de maior vulnerabilidade social.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

Este capítulo abordará brevemente aspectos relacionados à acessibilidade urbana, indicadores, áreas de saúde de Belo Horizonte, bem como técnicas e ferramentas empregadas na análise de dados geográficos.

2.1. Acessibilidade e mobilidade urbana: conceitos e métricas

De acordo com Raia Jr. *et al.* (1997 *apud* Veras, *et al.* 2016), a acessibilidade pode ser compreendida como a medida do esforço para superar a separação espacial entre diferentes pontos, viabilizando o acesso a diferentes destinos. Não se restringe à possibilidade de chegar a um ponto específico, mas também à facilidade com que o deslocamento é realizado.. Está diretamente ligada ao movimento entre lugares e, à medida que esse movimento exige mais tempo ou maiores custos financeiros, a acessibilidade tende a ser reduzida. Além disso, fatores como a infraestrutura disponível, a organização do território e a capacidade da rede de transporte influenciam significativamente o nível de acessibilidade em uma determinada região.

Em Belo Horizonte o Índice de Vulnerabilidade da Saúde (IVS) combina variáveis socioeconômicas e ambientais para identificar desigualdades no perfil epidemiológico de diferentes grupos populacionais e áreas geográficas (PBH, 2025). Com relação ao transporte público, o Anexo III do Edital de Concorrência Pública 131/2008, considera acessibilidade adequada, quando o deslocamento a pé até o sistema é de até 600 m em vias planas, ou até 300 m em trechos com inclinação superior a 10%.

2.2. Rede de saúde em Belo Horizonte e espaço urbano

Belo Horizonte se destaca como um caso relevante para a análise da organização espacial das Unidades Básicas de Saúde (UBS), uma vez que a definição da menor unidade de atuação das equipes de saúde da família considerou o número de residentes em cada localidade. Na década de 1990, a Secretaria Municipal de Saúde inovou ao integrar os critérios do SUS ao Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), utilizando-o para identificar áreas prioritárias e dimensionar o número de equipes por UBS. Essa abordagem também reforçou o foco nos ciclos de vida e nas populações mais vulneráveis, conferindo relevância à discussão sobre a localização das unidades e demandando o desenvolvimento de metodologias específicas para sua avaliação e implementação (Souza, *et. al.* 2016).

Apesar do crescente interesse internacional pelas relações entre espaço e saúde, grande parte das pesquisas ainda adota abordagens não espaciais. A fragmentação na definição de unidades espaciais, compromete a interoperabilidade e dificulta a formulação de políticas públicas mais eficazes. Esse cenário resulta em desperdício de recursos e em falhas na cobertura territorial de determinados grupos populacionais. No Brasil, embora esse campo esteja em expansão, sua consolidação ainda depende da disponibilidade de dados qualificados, ampliação da capacidade computacional e formação de profissionais em geotecnologias aplicadas à área. Um dos principais desafios atuais é desenvolver metodologias capazes de compreender a dinâmica urbana e subsidiar ações de saúde com base em sistemas de dados atualizados em tempo real (Auchincloss *et al.*, 2012; Barcellos e Ramalho, 2002; Perez, 2006 *apud* Souza, *et. al.* 2016).

Segundo Maricato (2015), para uma administração pública mais eficiente é fundamental pensar a modernização e a divulgação de cadastros, mapeamentos e informações sobre a cidade como forma de promover um planejamento urbano comprometido com a inclusão social. Souza *et. al.* (2004) destaca ainda um ponto controverso sobre a definição das unidades espaciais nos estudos sobre as condições de saúde no contexto urbano. Um dos principais obstáculos está no fato de que os dados de saúde são organizados segundo a lógica territorial do SUS, cuja delimitação tem fins administrativos. Essa abordagem impõe uma estrutura de referência espacial que pode ocultar particularidades importantes das unidades analisadas. A adoção de diferentes recortes espaciais, por sua vez, pode revelar correlações entre saúde e espaço que permanecem invisíveis sob os limites tradicionais.

De acordo com Câmara, *et. al.* (2004), a distribuição espacial de dados é fundamental para a compreensão de diversos fenômenos em diferentes áreas. A popularização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem facilitado essa análise, permitindo a visualização espacial de variáveis. A exemplo, os mapas isócronos (iso = igual, chronos = tempo), são frequentemente utilizados em análises que envolvem planejamento urbano e de transportes, que, para ilustração, usualmente são utilizadas linhas de contorno e cores para apresentar os pontos cujo tempo de percurso a partir do ponto inicial é o mesmo (Gortana *et al.*, 2014 e Zeng *et al.*, 2014 *apud* Reis, 2017).

3. METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa será estruturada em etapas, iniciando com o levantamento de dados georreferenciados sobre os 154 Centros de Saúde de Belo Horizonte, suas áreas de abrangência, malha viária, rede de transporte público, além de dados populacionais e indicadores sociais. Nesse sentido, Coelho, *et. al.* (2025), para análise do acesso de pedestres aos sistemas de transporte público em Belo Horizonte, propôs uma metodologia que considera a influência da inclinação, através um estudo de rede para incluir a declividade como um fator de ponderação para os limites máximos aceitáveis de caminhamento até a rede de transporte, conforme os limites estabelecidos e mapa de declividade.

Já Souza, *et. al.* (2016) realizou uma análise de curvas isocrônicas dos usuários para acesso aos CS em Belo Horizonte. Como metodologia, se propôs duas redes viárias: uma para pedestres e outra para automóveis,

com base nas vias previamente modeladas no *OpenStreetMap*. Para isso, foram programados *scripts* em *Python* que ajustaram regras específicas, que permitiram calcular o tempo de deslocamento nos trechos, considerando as inclinações, sendo inseridos em uma estrutura *DataSetNetwork*, dentro do ArcGIS, viabilizando simulações mais realistas de acessibilidade.

Diante disso, para analisar a acessibilidade aos CS de acordo com as áreas de abrangência, serão utilizadas as metodologias mencionadas como base para subsidiar a análise de acessibilidade por caminhamento e, em seguida, serão gerados buffers, com base nas distâncias estabelecidas. Com base nesses resultados, será possível identificar as áreas cobertas ou não pelo acesso a pé, revelando zonas com baixa cobertura por caminhamento. Na sequência, será realizada uma análise da acessibilidade por transporte público para as áreas não contempladas pelo caminhamento dos usuários. Nessa etapa, será estimado um tempo de deslocamento até os CS utilizando ônibus, levando em conta o número de transferências necessárias e o tempo de deslocamento. O objetivo será identificar se essas regiões são devidamente atendidas pela rede de transporte coletivo ou se enfrentam restrições significativas de acesso.

Em seguida, os dados de cobertura (caminhamento e transporte público) serão integrados aos dados populacionais e sociais, permitindo a identificação das áreas vulneráveis com baixa acessibilidade. Esse cruzamento possibilitará uma análise mais aprofundada das desigualdades territoriais no acesso aos serviços de saúde. A partir desses resultados, serão produzidos mapas temáticos que representam os níveis de acessibilidade, vazios de cobertura e territórios mais críticos. A última etapa consiste na análise dos mapeamentos obtidos, que permitirão a elaboração de um diagnóstico abrangente da acessibilidade aos CS no município, além de proposição de recomendações voltadas ao planejamento urbano e à gestão da rede de saúde. Tais análises poderão subsidiar diretrizes para melhorias na rede de transporte público, (re)delimitação das áreas de abrangência dos CS e a possibilidade de uso de transportes alternativos.

Por fim, espera-se, como resultado, a proposição de um método de análise que possa ser replicado em diferentes contextos urbanos, contribuindo para diagnósticos mais equitativos e territorialmente sensíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Câmara, G. *et al.* (2004) Análise espacial e geoprocessamento. *Análise espacial de dados geográficos*. Brasília: EMBRAPA, p. 21-54, 2004.

Coelho, P. de S.; *et. al.* (2025) Influence of slope on pedestrian access to public transportation systems. *Latin American Transport Studies*, v. 3, p. 100029. DOI: https://doi.org/10.1016/j.latran.2025.100029

Costa, H. (1994) Habitação e produção do espaço em Belo Horizonte. In R. Monte-Mór (Org.). *Belo Horizonte: espaços e tempos em construção*. p. 51-77. Belo Horizonte: CEDEPLAR/PBH.

Maricato, E. (2015) *Para entender a crise urbana.* 1ª Ed. São Paulo: Expressão Popular, 2015. 112 p. ISBN 978-85-7743-258-5.

PBH (2025) Portal de Notícias, Serviços e Informações da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PBH). Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/ (acesso em 20/06/2025).

Reis, K. F. T. F. dos (2017) *Reconstrução de curvas isócronas e sua aplicação na identificação de preferências de usuários de modais do transporte urbano.* Dissertação (mestrado). Programa de Modelagem Matemática da Informação, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/items/48f66e97-fde2-41b7-9c70-fe2cacf57391 (acesso em 03/07/2025).

Souza, R. C. F. de, *et al.* (2016) Viver próximo à saúde em Belo Horizonte. *Cadernos Metrópole*, 325–344. Disponível em: https://revistas.pucsp.br/index.php/metropole/article/view/2236-9996.2016-3601 (acesso em 21/06/2025).

Veras, D. F. G. *et al.* (2016) Acessibilidade urbana em Belo Horizonte: apontamentos sobre a acessibilidade aos serviços de transporte coletivo municipal. In Anais do 7º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável: Pluris : contrastes, contradições, complexidades: desafios urbanos no Século XXI. Anais… Maceió: Viva Editora, 2016. Disponível em: https://fau.ufal.br/evento/pluris2016/files/Tema%203%20-%20Mobilidade%20e%20Transportes/Paper1402.pdf (acesso em 20/06/2025).

Kamilla Oliveira Silva (millak2ls@gmail.com); *Daniela Antunes Lessa* (daniela.lessa@ufop.edu.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil
Daniela Antunes Lessa (daniela.lessa@ufop.edu.br)
Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rua Cinco, 72, Ouro Preto, MG, Brasil

A INFLUÊNCIA DA INFRAESTRUTURA DE ACESSO NA UTILIZAÇÃO DE PARQUES URBANOS: UM ESTUDO DE CASO EM RIO VERDE - GO

Rafael Pomar Schmidt[1], Philippe Barbosa Silva[1], Magaly Natalia Pazzian Vasconcellos Romão[2]
[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano; [2]Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

RESUMO
O uso de parques urbanos, vitais para a qualidade de vida, é frequentemente limitado por barreiras na infraestrutura de acesso, como calçadas e iluminação deficiente, gerando exclusão social. Esta pesquisa investiga o impacto da acessibilidade em Rio Verde, Goiás. Primeiramente, caracteriza as condições físicas da infraestrutura no entorno de parques por meio de auditorias em campo. Subsequentemente, analisa a percepção dos usuários aplicando questionários e modelagem estatística para quantificar a influência de cada fator na frequência de uso e satisfação. Como resultados, espera-se obter tanto um diagnóstico que revela disparidades espaciais, quanto um ranking hierárquico dos fatores de acesso mais valorizados pela comunidade. Um modelo quantitativo revelará o peso de cada variável na satisfação dos usuários. Ao integrar o diagnóstico físico à percepção humana, o estudo fornece subsídios para a gestão pública direcionar recursos, contribuindo para políticas mais eficientes que garantam o uso inclusivo dos parques e o bem-estar da comunidade.

1. PROPOSTA DE PESQUISA

Os parques urbanos são ativos essenciais para a qualidade de vida e a sustentabilidade das cidades (Barreto *et al*, 2019). Contudo, seu pleno potencial só é alcançado quando a população pode acessá-los de forma segura e convidativa. Infraestruturas de acesso deficientes, como calçadas precárias, iluminação inadequada e rotas percebidas como inseguras, funcionam como barreiras que não apenas desestimulam o uso, mas comprometem diretamente a segurança dos cidadãos, gerando um cenário de exclusão e subutilização de espaços públicos vitais (Semenzato *et al*, 2023).

A distribuição e a gestão de áreas verdes também refletem as prioridades de planejamento urbano e políticas públicas. Nesse sentido, garantir que as praças e parques sejam inclusivos e seguros é fundamental para promover cidades mais sustentáveis e igualitárias, conforme preconizado pela Agenda 2030 da ONU, especificamente no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11), que visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis (IPEA, 2019).

Nos últimos anos, a cidade de Rio Verde, situada na região sudoeste de Goiás, experimentou um crescimento urbano expressivo, impulsionado por fatores econômicos e sociais. Esse crescimento trouxe consigo uma série de transformações na paisagem urbana e no estilo de vida da população, resultando em novos desafios para o planejamento urbano. Em resposta a essa questão, a gestão municipal implementou um amplo programa de criação de parques e praças, com o objetivo de oferecer à comunidade espaços públicos que promovam lazer, bem-estar e integração social.

O problema central desta pesquisa reside na lacuna de conhecimento sobre como as condições da infraestrutura de acesso no entorno dos parques de influenciam sua utilização. A simples existência desses espaços não garante seu uso, que pode ser condicionado por fatores como a qualidade das calçadas, a percepção de segurança e a eficiência da iluminação. Com isso, busca responder quais características da infraestrutura de acesso (físicas e percebidas) são mais determinantes para a frequência de uso e o nível de satisfação dos usuários dos parques urbanos em Rio Verde-GO.

As hipóteses são estruturadas como as possíveis correlações entre as condições da infraestrutura de acesso e a percepção e comportamento dos usuários. Elas partem do pressuposto de que as características físicas do ambiente influenciam diretamente a percepção dos usuários. Por exemplo, uma hipótese é que uma maior qualidade da iluminação pública no entorno de um parque se correlaciona positivamente com uma maior percepção de segurança, incentivando o deslocamento a pé. Essencialmente, as hipóteses funcionam como proposições testáveis para verificar quais elementos da infraestrutura são mais valorizados e influentes na decisão de uso e na satisfação da comunidade com os parques urbanos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

A relevância dos parques urbanos transcende sua função ecológica, estabelecendo-se como espaços sociais fundamentais para o bem-estar da população. Um estudo de Meunier (2009) sobre as demandas da população de Recife evidenciou que os anseios dos cidadãos para essas áreas verdes vão além da simples existência de vegetação. A pesquisa concluiu que as pessoas buscam nesses locais ambientes que sejam arborizados, tranquilos e seguros, onde possam se engajar em uma variedade de atividades.

Um ponto central na literatura sobre o uso de parques é a relação entre a localização dos usuários e a frequência de visitação. Diversos estudos indicam que a proximidade da residência é um dos principais fatores que determinam o perfil dos frequentadores. De acordo com Araujo e Barreto (2020), a maioria dos usuários de parques é composta por moradores das proximidades. Este achado é corroborado e quantificado pelo estudo de Battistel et al (2021), que apurou que a maior parte dos frequentadores reside em um raio de 500 a 2000 metros de distância do parque, reforçando a ideia de uma área de influência predominantemente local.

Um estudo de São Paulo (2024), fruto de uma colaboração entre a Prefeitura de São Paulo e a ONU-Habitat, avaliou cem parques municipais da capital paulista. O objetivo foi identificar os desafios cruciais para promover espaços verdes públicos que sejam seguros, inclusivos e sustentáveis, fornecendo um diagnóstico que oriente ações mais eficazes da prefeitura. Entre os resultados, destacou-se a necessidade de aprimorar a infraestrutura e a acessibilidade nas regiões mais vulneráveis.

Apesar da forte correlação com a proximidade, alguns parques demonstram uma capacidade de atração que ultrapassa os limites do bairro. A pesquisa de Hildebrand (2001) descobriu que, embora houvesse uma concentração de usuários locais, a distância média de deslocamento para grandes parques atingiu 4 km, com registros de visitantes que percorreram até 22 km. Este dado indica que parques com características únicas ou de grande porte possuem uma importância regional.

Em síntese, embora alguns parques possuam um alcance metropolitano, a literatura converge ao apontar que a maioria dos estudos indica deslocamentos relativamente pequenos, o que sugere que o público principal é formado pela população do entorno. Essa constatação justifica a necessidade de uma análise aprofundada das condições de acesso nas imediações desses equipamentos, pois a qualidade da infraestrutura local emerge como um fator crítico que pode facilitar ou dificultar o usufruto desses importantes ativos públicos.

3. METODOLOGIA

A metodologia adota uma abordagem mista, desenvolvida em etapas para fornecer um panorama completo sobre o acesso aos parques urbanos de Rio Verde (Goiás). Vale o destaque de que a dissertação encontra-se na fase inicial, com atividades voltadas à revisão de literatura e caracterização inicial dos parques da cidade.

3.1 Revisão de literatura

A primeira etapa será uma revisão da literatura acadêmica para estabelecer o estado da arte sobre os temas centrais da pesquisa. Serão investigados estudos sobre a importância dos parques urbanos para a qualidade de vida e sustentabilidade, as teorias de acessibilidade e as barreiras físicas e perceptivas que limitam o uso de espaços públicos. A revisão também tem objetivo de buscar conhecimento sobre caracterização do perfil dos usuários de parques, com foco na relação entre a distância da residência e a frequência de uso, e o debate acadêmico sobre a real influência da infraestrutura de acesso na decisão dos usuários.

3.2 Coleta de dados

O universo desta pesquisa compreende a totalidade dos parques urbanos públicos. Contudo, reconhecem-se as possíveis limitações de ordem prática (como tempo e recursos) que podem inviabilizar a análise de todas as unidades. Diante dessa possibilidade, estabeleceu-se um plano de amostragem como alternativa. Dividindo a cidade em macrorregiões, como Norte, Sul, Leste, Oeste e Central, e dentro de cada estrato, será escolhida a de maior área. Isso se justifica por seu possível potencial de atrair um número maior de usuários.

Em seguida, será realizada uma vistoria nos arredores para coletar dados sobre as condições de calçadas, ciclovias, iluminação e sinalização viária, acompanhada de um registro fotográfico das barreiras mais recorrentes.

Posteriormente, uma segunda fase de coleta de dados será direcionada aos frequentadores dos parques. Um questionário será aplicado a uma amostra representativa dos usuários, buscando informações sobre o perfil socioeconômico, padrões de uso e, principalmente, a percepção sobre a qualidade e a importância de cada característica da infraestrutura de acesso, como iluminação, segurança percebida e qualidade do asfalto.

3.3 Análise de dados

A análise dos dados será conduzida em etapas sequenciais para integrar os diagnósticos físico e de percepção. Inicialmente, estatísticas descritivas serão utilizadas para caracterizar o perfil dos usuários e as condições da infraestrutura. Em seguida, será aplicada a Análise Fatorial Exploratória (AFE) para agrupar as variáveis de percepção do questionário em dimensões latentes, como 'segurança' e 'conforto'. Após investigar associações preliminares, a análise culminará na construção de modelos de regressão múltipla. Esses modelos irão quantificar o peso de cada variável de acesso — incluindo características físicas, perfil do usuário e os fatores de percepção — na determinação da frequência de uso e da satisfação geral dos frequentadores, permitindo, assim, hierarquizar os fatores mais impactantes e responder à pergunta de pesquisa.

3.4 Propostas de intervenção

A metodologia finaliza na elaboração de propostas de intervenção. Estas propostas, priorizadas por impacto potencial na satisfação e segurança dos usuários, fornecerão subsídios técnicos e estratégicos à gestão pública. O objetivo é embasar decisões sobre alocação de recursos e planejamento de intervenções direcionadas, promovendo mobilidade sustentável e acesso inclusivo aos parques.

4. RESULTADOS ESPERADOS

A execução do projeto resultará em um conjunto complementar de diagnósticos, combinando a análise da infraestrutura física com a da percepção dos usuários para fornecer um panorama completo sobre o acesso aos parques.

Espera-se obter um diagnóstico quantitativo que classifique o nível de facilidade de acesso de cada parque, acompanhado por uma análise comparativa para revelar possíveis disparidades espaciais, como diferenças entre as áreas central e periférica.

A pesquisa avançará para a dimensão humana, onde se espera gerar um diagnóstico preciso da percepção dos usuários. O principal resultado quantitativo será um modelo que revela o peso de cada variável na satisfação geral dos frequentadores. Além disso, projeta-se a identificação de diferenças de percepção entre distintos perfis de usuários, como gênero e meio de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barreto, P. A.; C. S. Lopes; I. H. da Silveira; E. Faerstein e W. L. Junger (2019). *Morar perto de áreas verdes é benéfico para a saúde mental? Resultados do Estudo Pró-Saúde*. Revista de Saúde Pública, São Paulo, Brasil, v. 53, p. 75. DOI: https://doi.org/10.11606/s1518-8787.2019053001008.

Battistel, J. A.; , M. I. Floss; A. de F. P. Cruvinel; P. R. Barbato; R. C. Fermino; P. H. Guerra (2021). *Perfil dos frequentadores e padrão de utilização das academias ao ar livre: revisão de escopo*. Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde, v. 26, p. 1–8. DOI: https://doi.org/10.12820/rbafs.26e0186.

Hildebrand, E.; Graça, L. R.; Milano, M. S. (2001). *Distância de deslocamento dos visitantes dos parques urbanos em Curitiba-PR.* Floresta e ambiente, V. 8, n.1, p.76 -83.

Araújo, N. M. de; C. G. Barreto (2022). *Usos e funções dos parques urbanos: percepções sobre o Parque Ecológico Asa Sul, Brasília, Brasil*. Revista Espaço e Geografia, v. 23, n. 2, p. 162–179, 2022. DOI: 10.26512/2236-56562020e40247.

Meunier, I. M. J. (2019). *Percepções e expectativas de moradores do grande Recife-pe em relação aos parques urbanos*. REVSBAU, Piracicaba – sp, v.4, n.2, p.35-43.

ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis - Ipea - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods11.html>. Acesso em: 20 jan. 2025.

São Paulo (Município). Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. *Relatório de Avaliação dos Parques de São Paulo: Condições de Acessibilidade e Infraestrutura 2024. São Paulo, 2024*. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/download/174778/285110. Acesso em: 7 jul. 2025.

Semenzato, P.; A., Costa; T., Campagnaro (2023). *Accessibility to urban parks: Comparing GIS based measures in the city of Padova (Italy)*. Urban Forestry & Urban Greening, v. 82, p. 127896, abr. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127896.

Rafael Pomar Schmidt (rafaelpseng@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano); Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Philippe Barbosa Silva (philippe.silva@ifgoiano.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano); Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Magaly Natália Pazzian Vasconcellos Romão (magaly.romao.jau@gmail.com)
Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, Campus de Jaú; Rua Frei Galvão, s/n, Jardim Pedro Ometto, Jaú, São Paulo, Brasil.

ANÁLISE DAS ROTAS DE PEDESTRES E A INFLUÊNCIA DO AMBIENTE URBANO NA ESCOLHA DE CAMINHOS

Rafaela de Sousa Medeiros, Luiz Bueno da Silva
Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

RESUMO
Este trabalho pretende analisar a influência do ambiente urbano sobre os deslocamentos a pé, visando identificar os efeitos de variáveis urbanas sobre a escolha das rotas de pedestres. A pesquisa aborda lacunas relacionadas a estudos sobre escolha de rota em países do Sul Global e à análise de aspectos pouco abordados na literatura, como qualidade da paisagem, volume de tráfego e percepção de segurança pessoal. As rotas tomadas pelos pedestres serão registradas em um questionário e suas características serão comparadas às das possíveis rotas alternativas, de modo a entender como as variáveis do ambiente urbano influenciam as escolhas dos pedestres e quais favorecem e prejudicam o caminhar. Com isso, espera-se contribuir para a compreensão da percepção dos pedestres sobre o ambiente no qual eles caminham e para a exploração dos aspectos ainda incipientes na literatura, além de auxiliar políticas públicas de transporte ativo e mobilidade urbana sustentável.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

O presente trabalho busca identificar a influência de aspectos do ambiente urbano sobre os deslocamentos a pé, a partir da análise das características das rotas tomadas pelos pedestres e das rotas alternativas disponíveis para a mesma viagem. A hipótese central da pesquisa é que a escolha da rota não é definida apenas em função da distância, sendo também influenciada por elementos do ambiente urbano como qualidade da paisagem, volume de tráfego e segurança percebida, que podem afetar positiva ou negativamente a percepção dos indivíduos sobre os caminhos disponíveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As cidades são espaços multidimensionais que possibilitam às pessoas desenvolverem suas atividades diárias, como acessar outras pessoas, bens e serviços, distribuindo esses elementos no espaço urbano e conectando-os a partir das redes de transporte (Wu *et al*., 2021). Atualmente, um acelerado processo de urbanização está ocorrendo, com projeções da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022) indicando que, em 2050, mais de 68% da população mundial residirá em cidades (na América Latina, essa porcentagem chegará a quase 88%). Com a expansão não planejada e a sobrecarga dos sistemas existentes, os problemas associados ao ambiente urbano crescem, prejudicando a qualidade de vida nas cidades.

No âmbito do transporte urbano, tem-se que, historicamente, as vias urbanas foram projetadas de modo a priorizar o tráfego de veículos motorizados. Para reverter esse cenário e incentivar a mobilidade sustentável nas cidades, é necessário analisar como o ambiente urbano impacta os transportes ativos, como caminhar e pedalar. Em relação aos deslocamentos a pé, a configuração urbana pode proporcionar oportunidades ou impedimentos (Nakshi e Debnath, 2021; Ewing e Cervero, 2010), assim, é de grande importância identificar como as características desse ambiente afetam a percepção dos pedestres, para planejar ações que efetivamente melhorem sua experiência no meio urbano.

Para identificar os fatores que influenciam os pedestres, uma das possibilidades é analisar os caminhos feitos por eles e como e porque esses caminhos são escolhidos. O processo de escolha da rota para caminhar é uma decisão tomada a partir de um conjunto de alternativas possíveis para alcançar o destino desejado, o qual é influenciado por elementos externos e internos aos indivíduos (Tong e Bode, 2022). Além dos aspectos de distância e tempo de deslocamento, aspectos sensoriais e subjetivos também influenciam os pedestres (Chan *et al.*, 2024). Portanto, é necessária uma abordagem ampla para identificar e compreender os fatores que afetam os pedestres.

A análise da relação entre o ambiente urbano e as rotas escolhidas por pedestres ainda apresenta limitações no contexto de países em desenvolvimento como o Brasil. Xiao *et al*. (2020) analisaram 21 trabalhos relacionados às conexões entre o ambiente construído, o caminhar e o pedalar, sendo apenas seis feitos em países do Sul Global. Basu e Sevtsuk (2022) apresentam 13 estudos sobre escolha de rotas por pedestres, todos abordando países do Norte Global. Guerra e Li (2021) destacam que o entendimento da relação entre fatores socioeconômicos, forma urbana e deslocamentos nas cidades é enviesado devido ao grande número de trabalhos feitos nos Estados Unidos. Outras lacunas existentes são a falta de compreensão sobre atributos como qualidade da paisagem, percepção de segurança pessoal e velocidade do tráfego e sua relação com a escolha

da rota (Basu *et al*., 2021) e pouca investigação sobre as interações entre variáveis, o que pode provocar efeitos distintos em relação à análise independente das variáveis (Tribby *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2015).

3. MÉTODO DE TRABALHO

O trabalho será desenvolvido a partir de dados de viagens de pedestres realizadas na cidade de João Pessoa. O desenvolvimento orientado ao transporte sustentável é uma das diretrizes de desenvolvimento do novo Plano Diretor da cidade (João Pessoa, 2022), assim, a pesquisa buscará contribuir para o desenvolvimento de estratégias para promover o caminhar. Os dados das viagens serão coletados a partir de entrevista e aplicação de questionário, o qual será composto por duas partes: a primeira com perguntas para caracterizar o perfil socioeconômico e a segunda para registrar a origem e o destino da viagem. A segunda parte contará com um mapa para que os respondentes marquem a rota utilizada. O questionário será inicialmente testado a partir de um estudo piloto com viagens a pé feitas até o *campus* da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em João Pessoa, para efetuar os ajustes necessários antes da aplicação à amostra final.

O público-alvo da amostra final serão residentes da cidade de João Pessoa acima de 18 anos e que realizam viagens utilitárias, como ir ao trabalho e a instituições de ensino. A partir do registro da rota escolhida por cada respondente, outras possíveis rotas para alcançar o mesmo destino serão identificadas utilizando a ferramenta de análise de rede (*network analysis)* do QGIS. Essas rotas serão caracterizadas em relação a características geométricas, de infraestrutura e de uso do solo, utilizando dados em SIG, imagens do *Google Street View* e observações em campo. Uma das hipóteses da pesquisa é que variáveis como qualidade da paisagem, cobertura de árvores, volume do tráfego e segurança percebida influenciam significativamente a escolha da rota, em detrimento da menor distância de deslocamento. Assim, uma análise de componentes principais será feita para investigar o efeito dessas variáveis, suas interrelações e, eventualmente, reduzir o número de variáveis a serem consideradas nas próximas etapas da pesquisa.

Em seguida, o modelo logit modificado pelo tamanho do caminho (*path size logit model*) será utilizado para investigar como as variáveis atuam sobre o processo de decisão dos pedestres. Esse modelo permite calcular a probabilidade de escolha de uma rota levando em consideração seu tamanho e suas características associadas às variáveis que representam os aspectos do ambiente urbano (Basu e Sevtsuk, 2022). Ao incorporar a sobreposição entre as rotas e quantificar o peso das variáveis sobre o percurso, é possível identificar quais favorecem e prejudicam a escolha da rota. Com esses resultados, será possível observar como as variáveis do ambiente urbano atuam sobre os deslocamentos feitos pelos pedestres e identificar quais causam impactos mais significativos. Assim, será possível propor estratégias e intervenções para melhorar o ambiente urbano para esses usuários. A Figura 1 mostra o fluxograma de desenvolvimento do trabalho.

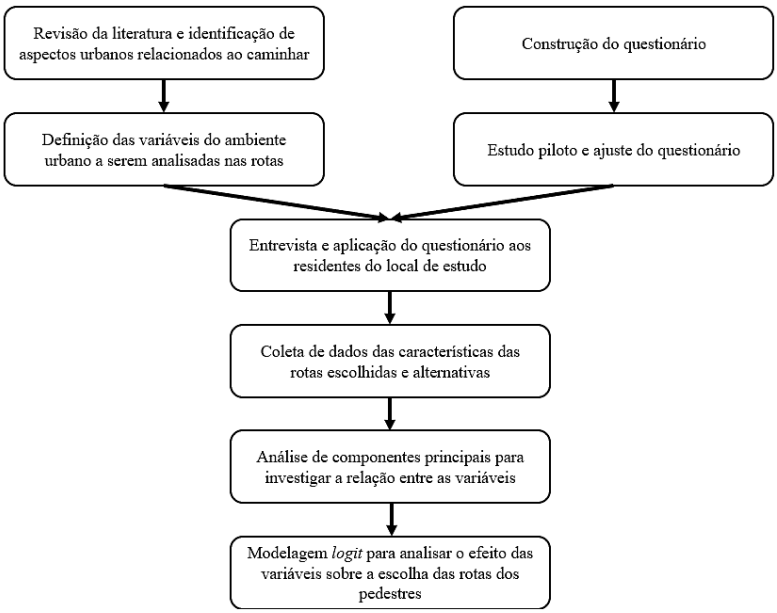


Figura 1: Fluxograma do desenvolvimento do trabalho

4. RESULTADOS ESPERADOS

Com este trabalho, espera-se identificar a influência de aspectos do ambiente urbano sobre a escolha das rotas tomadas pelos pedestres e preencher lacunas existentes na literatura, especialmente em contextos urbanos de países em desenvolvimento, da análise de atributos como segurança percebida, volume de tráfego e cobertura de árvores e das relações existentes entre os atributos. Essas análises podem inaugurar novas linhas de investigação e fortalecer a interdisciplinariedade entre urbanismo, psicologia ambiental, transporte e planejamento urbano.

A utilização do modelo *path size logit* permite incorporar a sobreposição entre rotas e quantificar o peso relativo de diferentes variáveis urbanas sobre a escolha do caminho, permitindo compreender quais elementos favorecem e prejudicam o caminhar. Esses resultados podem auxiliar o desenvolvimento de ações e estratégias para melhorar o ambiente urbano para os pedestres e criar prioridades de intervenção, otimizando o uso dos recursos disponíveis.

No geral, o estudo buscará contribuir com as políticas públicas de transporte ativo, podendo ser replicado em outras cidades latino-americanas com dinâmica urbana, clima e desafios semelhantes, especialmente em contextos de urbanização acelerada e infraestrutura desigual. A análise do ambiente urbano para além da configuração das vias e dos transportes motorizados, contribui para a identificação de oportunidades e barreiras ao transporte ativo e no planejamento de estratégias para sua promoção. Visando o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável número 11, de cidades e comunidades sustentáveis, a melhoria das condições para deslocamentos a pé pode atuar como incentivo à substituição de viagens por transportes motorizados, contribuindo para a mobilidade sustentável nas cidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basu, N. *et al.* (2021) A systematic review of the factors associated with pedestrian route choice. *Transport Reviews*, v. 42, n. 5, p. 672-694.

Basu, R. e A. Sevtsuk (2022) How do street attributes affect willingness to walk? City-wide pedestrian route choice analysis using big data from Boston and San Francisco. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 163, n. july 2022, p. 1-19.

Chan, H. *et al.* (2024) Routes with roots: Pedestrian route choices and sense of place of an urban university community. *Journal of Transport Geography*, v. 118, 103943.

Ewing, R. e R. Cervero (2010) Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association*, v. 76, n. 3, p. 265-294.

Guerra, E. e M. Li (2021) The relationship between urban form and mode choice in US and Mexican cities: A comparative analysis of workers' commutes. *Journal of Transport and Land Use*, v. 14, n. 1, p. 441-462.

João Pessoa (2022) *P5b – Relatório de Diretrizes e Propostas.* Disponível em: https://planodiretor.joaopessoa.pb.gov.br/documentos/ (acesso em 01/07/2025).

Nakshi, P. e A. K. Debnath (2021) Impact of built environment on mode choice to major destinations in Dhaka. *Transportation Research Record,* v. 2675, n.4, p. 281-296.

ONU (2022) *World Cities Report 2022.* Disponível em: < https://unhabitat.org/wcr/2022/ (acesso em 01/07/2025).

Tong, Y. e N. W. F. Bode (2022) The principles of pedestrian route choice. *Journal of the Royal Society Interface*, v. 19, 20220061.

Wu, H. *et al.* (2021) Urban access across the globe: an international comparison of different transport modes. *npj Urban Sustainability*, v. 12, n. 20, p. 1-16.

Xiao, L. *et al.* (2020) Built environment correlates of the propensity of walking and cycling. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 20, p. 1-16.

Rafaela de Sousa Medeiros (rafaela.medeiros@academico.ufpb.br)
Luiz Bueno da Silva (bueno@ct.ufpb.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, *Campus* I, Cidade Universitária – João Pessoa, PB, Brasil.

DIAGNÓSTICO DA MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL EM FEIRA DE SANTANA, BAHIA

Eduardo Xavier Santos, Rozana Rivas de Araújo
Universidade Federal de Sergipe

RESUMO
Esta dissertação, ainda em desenvolvimento, se insere no tema de Mobilidade urbana sustentável que consiste na integração entre as dimensões sociais, econômicas e ambientais para garantir o acesso amplo, inclusivo e ambientalmente responsável ao espaço urbano (Rubim e Leitão, 2013). A pesquisa tem como objetivo diagnosticar a mobilidade urbana sustentável em Feira de Santana (BA), identificando desafios e apontando diretrizes para políticas públicas que priorizem a sustentabilidade. O trabalho se justifica pela ausência de estudos específicos sobre o tema no município, evidenciada em levantamento nas bases Scopus, Scielo e no Banco de Teses e Dissertações da CAPES. Para alcançar seus objetivos, adota-se o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), desenvolvido por Costa (2008), que reúne 87 indicadores organizados em 9 domínios, permitindo avaliar o nível de sustentabilidade da mobilidade em diferentes dimensões, comparar que cidades de porte semelhante e subsidiar ações futuras no contexto local.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente dissertação, ainda em desenvolvimento, aborda a temática da mobilidade urbana, com foco na integração dos princípios da sustentabilidade como componente estratégico para o desenvolvimento urbano e a promoção da qualidade de vida. A pesquisa busca identificar de que forma a sustentabilidade está incorporada ao planejamento e à execução da mobilidade urbana, por meio da análise de aspectos fundamentais, como legislação, infraestrutura, sistema de transportes, acessibilidade, participação popular e os principais problemas associados à mobilidade urbana.

A mobilidade urbana é fundamental para o planejamento das cidades, pois determina o acesso a serviços, oportunidades e espaços públicos. No Brasil, historicamente priorizou-se o transporte individual motorizado, gerando congestionamentos, poluição, uso ineficiente do solo e desigualdades socioespaciais (Rubim e Leitão, 2013). Nas últimas décadas, o debate sobre mobilidade sustentável tem crescido, propondo integrar dimensões ambientais, sociais e econômicas, priorizar modos coletivos e não motorizados e ampliar o acesso democrático à cidade (Boareto, 2008; Banister, 2008), em consonância com o ODS 11 da Agenda 2030 e a Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012).

Apesar desses avanços normativos, a implementação prática no país é limitada: menos de 20% dos municípios obrigados possuem Planos de Mobilidade Urbana aprovados (Ministério das Cidades, 2025). Feira de Santana (BA), segunda maior cidade do estado, exemplifica esse desafio, apresentando forte dependência do transporte rodoviário, crescimento urbano desordenado e apenas recentemente atualizando seu Plano Diretor (2018) e instituindo o PlanMob (2018) após décadas sem revisões (Santos *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, esta pesquisa de mestrado tem por objetivo geral realizar um diagnóstico da mobilidade urbana sustentável na cidade de Feira de Santana, Bahia. O trabalho ainda possui, como objetivos específicos: identificar os principais problemas e desafios relacionados à mobilidade urbana sustentável no município e apontar possíveis diretrizes e recomendações para a promoção de uma mobilidade urbana mais sustentável em Feira de Santana.

A pesquisa se justifica porque, embora a mobilidade urbana sustentável seja destaque global, há uma lacuna sobre o tema em Feira de Santana, constatada em bases como Scopus, Scielo e o Banco de Teses e Dissertações da CAPES. A aplicação do IMUS no município é relevante por se tratar de uma cidade de grande porte e influencia regional, com forte dependência do transporte rodoviário e histórico de planejamento fragmentado. O índice permite avaliar a sustentabilidade da mobilidade em múltiplas dimensões e identificar gargalos como baixa integração modal, carência de infraestrutura e desafios de acessibilidade universal, tornando-se instrumento estratégico para subsidiar políticas locais e servir de referência para cidades de perfil semelhante.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico desta pesquisa foi estruturado em dois eixos principais: os conceitos fundamentais da mobilidade urbana sustentável e o histórico da mobilidade urbana no Brasil. Para compor esse referencial, realizou-se um levantamento na base de dados Scopus, empregando a string de busca *((sustainable OR sustainability) AND urban AND mobility)*. Foram considerados artigos de acesso aberto publicados em português, inglês e espanhol nos últimos 5 anos, o que resultou em 2.266 trabalhos. A partir dessa amostra, identificaram-se diversos autores amplamente referenciados, cujas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo (Tabela 1).

Tabela 1: Autores utilizados no referencial teórico

Referência	Principal contribuição
Boareto (2008)	A sustentabilidade propõe um modelo de mobilidade que garante acesso amplo e eficiente ao espaço urbano, priorizando modos coletivos e não motorizados. Assim, promove deslocamentos inclusivos, ambientalmente responsáveis e centrados nas pessoas.
Vasconcellos (2017)	Paralelo entre o modelo tradicional e sustentável de mobilidade, destacando as principais divergências.
Mello e Portugal (2017)	Aponta a acessibilidade como elemento promotor da mobilidade sustentável, seguido de elementos como integração entre modais de transporte, uso do solo e políticas urbanas.
Banister (2008)	Propõe quatro princípios interligados: redução da necessidade de deslocamento, incentivo ao transporte coletivo e ativo, uso do solo orientado para a proximidade e inovação tecnológica, sempre com forte participação comunitária.
Jones (2014)	Define três fases da mobilidade urbana: a fase centrada no veículo, a fase do deslocamento individual e a fase da promoção da qualidade de vida.
Gomide e Galindo (2013)	Resgate histórico da mobilidade urbana no Brasil que compreende o período da Ditadura Militar até a PNMU em 2012, com objetivo de rememorar e interpretar o que foi conquistado, a que custo, de que forma e o que ficou pelo caminho.
Gudmundsson (2004)	Caracteriza indicadores para avaliação da mobilidade sustentável: abrangência e equilíbrio; facilidade de coleta; clareza e utilidade; desagregação; unidades de referência; níveis de análise; metas de desempenho.

3. METODOLOGIA

Para a análise da mobilidade urbana em Feira de Santana, adotou-se o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), de Costa (2008), por ter sido desenvolvido no contexto brasileiro, abranger diversas áreas, já ser amplamente aplicado em cidades brasileiras (o que facilita a comparação) e integrar dimensões sociais, econômicas, ambientais, institucionais e de infraestrutura, com 87 indicadores distribuídos em 37 temas e 9 domínios, adaptáveis à disponibilidade de dados por meio de hierarquia e pesos, o que permite ajustar o índice de acordo com a realidade local, podendo excluir indicadores sem comprometer a análise global, garantindo viabilidade mesmo com limitações de dados.

A aplicação do IMUS envolve cinco etapas principais:

1. Coleta e organização dos dados: a partir de fontes como IBGE, órgãos municipais, legislação local e levantamentos de campo, são reunidos dados referentes aos indicadores do IMUS.
2. Avaliação dos indicadores: cada indicador é analisado conforme escala definida por Costa (2008), que pode ser ordinal, percentual, qualitativa ou quantitativa.
3. Normalização dos resultados: os valores são padronizados numa escala de 0 a 1, possibilitando a comparação entre indicadores de diferentes naturezas.
4. Cálculo do IMUS: realiza-se a agregação ponderada dos resultados, considerando os pesos dos indicadores, temas e domínios, resultando no índice global e nos índices setoriais.
5. Análise dos resultados: identifica-se o desempenho do município nos diferentes aspectos, destacando pontos críticos e comparando com cidades semelhantes.

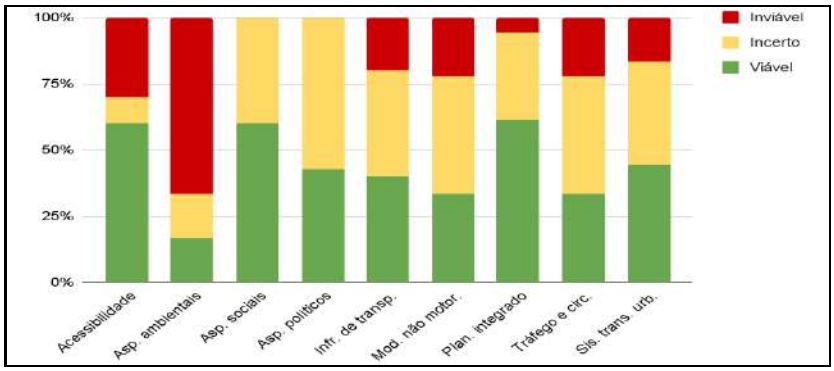


Figura 1: porcentagem dos indicadores por dimensão do IMUS por viabilidade

Como a primeira etapa do IMUS envolve a coleta dos indicadores, foi necessário selecionar quais seriam utilizados. Eles foram agrupados conforme a fonte dos dados (órgãos públicos, legislação, levantamentos e mapeamentos), o que facilita localizar informações e avaliar sua viabilidade. Dessa análise, resultaram 40 indicadores viáveis, 31 incertos e 16 inviáveis no prazo da dissertação devido a ausência de dados no município (Figura 1). Entre os viáveis, destacam-se a participação dos modos coletivos e não motorizados na divisão modal, a extensão da malha cicloviária, a acessibilidade do transporte público, a emissão de poluentes e a existência de instrumentos de gestão como o PlanMob.

Agradecimentos
O autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de mestrado, que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banister, D. (2008) The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, v. 15, n. 2, p. 73–80. DOI: 10.1016/j.tranpol.2007.10.005

Boareto, R. (2008) A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis. *Revista dos Transportes Públicos*, ANTP, ano 30/31, n. 103, p. 143–160.

Brasil (2012) Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. *Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana*. Diário Oficial da União, Brasília, 04 jan. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm (acesso em: 14/09/2025).

Costa, M. S. (2008) *Índice de Mobilidade Urbana Sustentável – IMUS*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/2034 (acesso em: 14/09/2025).

Gomide, A. A. e E. P. Galindo (2013) A mobilidade urbana: uma agenda inconclusa ou o retorno daquilo que não foi. *Estudos Avançados*, v. 27, n. 79, p. 27–46. DOI: 10.1590/S0103-40142013000300003

Gudmundsson, H. (2004) Sustainable transport and performance indicators. In Hester, R. E. e R. M. Harrison (eds.) *Issues in environmental science and technology: transport and the environment*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, v. 20, p. 35–63. DOI: 10.1007/978-3-662-46924-8

Jones, P. (2014) The evolution of urban mobility: the interplay of academic and policy perspectives. *IATSS Research*, v. 38, p. 7–13. DOI: 10.1016/j.iatssr.2014.06.001 (acesso em: 04/07/2025).

Mello, L. G. O. e L. S. Portugal (2017) *Transporte, mobilidade e desenvolvimento urbano*. Brasília: IPEA. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9200 (acesso em: 04/07/2025).

Ministério das Cidades (2025) *Relatório de monitoramento dos Planos de Mobilidade Urbana no Brasil*. Brasília: Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana.

Organização das Nações Unidas – ONU (2015) *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Nova York: ONU. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda (acesso em: 14/09/2025).

Rubim, B. e S. Leitão (2013) O Plano de Mobilidade Urbana e o Futuro das Cidades. *Estudos Avançados*, v. 27, n. 79, p. 55–66. DOI: 10.1590/S0103-40142013000300005 (acesso em: 04/07/2025).

Santos, J.; L. Santos e R. Reis (2024) *Mobilidade em Feira de Santana: desafios para um novo projeto de cidade*. Curitiba: CRV.

Vasconcellos, E. A. (2017) *Política de transportes no Brasil: a construção da mobilidade excludente*. São Paulo: Manole.

Eduardo Xavier Santos (duxavier@academico.ufs.br)
Rozana Rivas de Araújo (rozanarivas@academico.ufs.br)
Universidade Federal de Sergipe, Campos São Cristóvão, Departamento de Engenharia Civil, Cidade Universitária, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

DIAGNÓSTICO DE DESIGUALDADES NA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE AO TRABALHO DOS RESIDENTES NA PERIFERIA DE FORTALEZA E SUA REGIÃO METROPOLITANA

Rebeca da Silva Souza, Carlos Felipe Grangeiro Loureiro
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
O cenário de expansão dispersa das cidades para além de seus limites municipais trouxe uma maior complexidade para os fenômenos urbanos. A presente pesquisa de mestrado investiga o espraiamento urbano e o *spatial mismatch* na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O objetivo principal é diagnosticar as desigualdades socioespaciais na acessibilidade e relações com os padrões de mobilidade ao trabalho da população residente na periferia de Fortaleza e municípios vizinhos. Com metodologia mista, inicialmente foi feita a análise descritiva e crítica dos processos de formação do espaço e planejamento da RMF, para então realizar a caracterização da problemática do *spatial mismatch* e da acessibilidade casa-trabalho, assim como dos padrões de mobilidade da população de baixa renda residente na periferia oeste e sul de Fortaleza e municípios de Caucaia e Maracanaú. Por fim, pretende-se diagnosticar no nível estratégico as relações causais das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade da área em estudo.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E QUESTÃO DE PESQUISA

A concentração de pessoas nas cidades, atribuída anteriormente ao movimento rural-urbano, diante do processo de globalização, é associada a um movimento urbano-urbano ou urbano-metropolitano, não mais com pessoas vindas do campo, mas de outras cidades, resultando em uma maior complexidade do espaço (Furtado *et al.*, 2013). Esse cenário, além de evocar novas dinâmicas metropolitanas entre as cidades, também pode acentuar desigualdades socioespaciais em uma escala ampliada. No Brasil, apesar das primeiras Regiões Metropolitanas terem sido criadas na década de 1970 através da Lei Complementar nº 14, que regulamentou o art. 164 da Constituição de 1967 e previu temas comuns a municípios vizinhos (planejamento do desenvolvimento socioeconômico, saneamento básico, uso do solo, transporte e sistema viário, produção e distribuição de gás canalizado, aproveitamento dos recursos hídricos e controle da poluição ambiental), até o momento, o país não consolidou sua gestão metropolitana, cenário que impacta o processo de resolução de problemas que ultrapassam os limites municipais (Blanco Junior, 2021; Firkowski, 2013)

A cidade de Fortaleza tem sua metropolização associada à produção habitacional a partir da década de 1970 e a realocação das atividades industriais na década de 1980, em um processo que não ocorreu de forma homogênea entre as suas áreas leste e oeste, sendo esta última associada ao eixo de ocupação da população de baixa renda (Andrade *et al*., 2020; Diógenes, 2012; Lima *et al*., 2021). Nos últimos anos, observa-se uma lenta, mas progressiva, redistribuição populacional na região metropolitana de Fortaleza e intensificação das migrações entre cidades, oriundas da realocação de investimentos em atividades econômicas e imobiliárias, antes localizadas na capital, para os municípios vizinhos (Accioly e Nogueira, 2011). Apesar disso, a relação entre os municípios se caracteriza pelo baixo nível de integração e ausência de cooperação em funções e serviços, com uma macrocefalia da capital como cidade polo, cujo centralidade principal continua a abrigar as atividades econômicas de ponta, ligadas ao setor financeiro e aos serviços sofisticados, e é responsável por concentrar a maior parte das atividades e investimentos, cenário que aprofunda desigualdades e segregação (Accioly e Nogueira, 2011; Ministério das Cidades, 2008).

Institucionalmente, a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) foi oficializada de modo compulsório, instituída e definida por força legal pela Lei Complementar n° 14/7, e está alinhada ao cenário nacional de fragilidade na coordenação intermunicipal. Assim, os efeitos dessa falta de complementaridade entre os municípios nas movimentações cotidianas podem acentuar fenômenos relacionados a desigualdades socioespaciais já observados em sua cidade polo. Nos últimos anos, diversos trabalhos abordaram os problemas relacionados à inadequada distribuição espacial do solo e à ineficiente oferta de meios de transportes em Fortaleza, que contribuem nas desigualdades socioespaciais na acessibilidade na cidade (Sousa, 2019; Andrade *et al*., 2020; Lima *et al*., 2021; Pinto *et al*., 2023). Nessas análises, destaca-se o fenômeno do *Spatial Mismatch* casa-trabalho, relacionado a incompatibilidade espacial entre domicílios e oportunidades de empregos, em especial da população de baixa renda, visto que esse segmento está exposto a maiores limitações quanto à localização residencial e modos de transportes (Castro *et al*., 2025). Ressalta-se ainda sua associação com o espraiamento urbano, termo atribuído a uma expansão urbana fragmentada e dispersa, na qual tem-se a ocupação, predominantemente de baixa densidade, em franjas urbanas descontinuadas do solo urbanizado e,

portanto, marcadas pela presença de vazios urbanos (Diógenes, 2012; Lima, 2017).

Contudo, grande parte das pesquisas existentes tem como alvo o território municipal, fazendo com que a complexidade da problemática na escala metropolitana ainda seja pouco investigada e compreendida. Com base nisso, questiona-se: os fenômenos do *Spatial Mismatch* e do espraiamento urbano são exclusivos de Fortaleza ou também inerentes a outros municípios de sua Região Metropolitana? Como o espraiamento urbano tem agravado o *Spatial Mismatch* na escala metropolitana? Quais os níveis de acessibilidade da população residente na periferia de Fortaleza e municípios vizinhos às oportunidades de empregos ofertadas nas principais centralidades da RMF? Com o entendimento de que as desigualdades socioespaciais afetam em uma intensidade maior as classes mais vulneráveis, optou-se por trabalhar com o recorte da população de baixa renda, a partir da compreensão de que esse segmento não é homogêneo (Castro *et al.*, 2025). Além disso, dentre os 19 municípios que atualmente compõem a RMF, dois foram escolhidos como representativos do fenômeno abordado: Caucaia e Maracanaú. O primeiro fez parte da composição inicial da RMF e tem sua ocupação associada à construção de grandes conjuntos habitacionais na periferia do seu território, expansão de loteamentos litorâneos e práticas de veraneio. O segundo, incorporado após seu desmembramento em relação a Maranguape decorrente de sua emancipação político-administrativa, tem sua urbanização atribuída a implantação da primeira área industrial planejada da RMF, fator que contribuiu para acelerar a metropolização, principalmente através da instalação de conjuntos habitacionais próximos ao local (Ministério das Cidades, 2008). Além disso, devido à construção desses complexos habitacionais, a área com maior continuidade urbana da RMF está entre Fortaleza e esses municípios (Diógenes e Paiva, 2014).

2. OBJETIVOS

Portanto, a presente pesquisa de mestrado tem por objetivo geral diagnosticar as desigualdades socioespaciais na acessibilidade e relações com os padrões de mobilidade ao trabalho da população residente na periferia de Fortaleza e municípios da sua Região Metropolitana. Os objetivos específicos incluem: i) analisar os processos de formação do espaço e planejamento da RMF, a fim de compreender como ambos vêm ocorrendo e se há convergência entre eles; ii) caracterizar o fenômeno do *Spatial Mismatch* na periferia oeste e sul de Fortaleza e municípios de Caucaia e Maracanaú, para a população de baixa renda, e seus níveis de acessibilidade às oportunidades de emprego; iii) analisar os padrões de mobilidade ao trabalho da população de baixa renda em Fortaleza e demais municípios da RMF; iv) diagnosticar a problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade ao trabalho da população de baixa renda periferizada de Fortaleza e dos municípios de Caucaia e Maracanaú.

3. PROPOSTA METODOLÓGICA

De forma a alcançar os objetivos desta pesquisa, a proposta metodológica está estruturada em cinco etapas e tem abordagem mista, qualitativa e quantitativa. Primeiramente, foram realizadas duas revisões com base em análise documental: uma do processo de formação espacial e outra do processo de planejamento urbano e de transportes dos municípios da RMF a fim de produzir uma análise descritiva e crítica de ambos. Na revisão da formação do espaço metropolitano, procurou-se compreender o histórico dessa região e as mudanças na sua forma de ocupação. Já na revisão do processo de planejamento integrado, buscou-se identificar e analisar os princípios, propósitos e objetivos dos planos de modo a entender em que medida e como estes incorporam a metropolização em suas diretrizes e ações propostas (Cavalcante, 2023). Ao final dessa etapa, produziu-se uma periodização histórica desses processos com a intenção de representar a convergência, ou sua ausência, bem como a evolução do espraiamento urbano decorrente da expansão dispersa na escala metropolitana.

Quanto à abordagem quantitativa, estão sendo realizadas inicialmente análises de caracterização do fenômeno do *Spatial Mismatch* em Fortaleza e municípios de Caucaia e Maracanaú, considerando distintos segmentos populacionais de baixa renda (Castro *et al.*, 2025), e de seus níveis de acessibilidade a oportunidades de empregos formais e informais (Pinto *et al.*, 2023), a partir da consolidação de bases de dados socioeconômicos, de uso e ocupação do solo, das redes viárias e de transporte público, além da distribuição espacial dos empregos formais e informais para o ano-base de 2020. Paralelamente, está sendo realizada uma análise da evolução dos padrões de mobilidade ao trabalho da população de baixa renda em Fortaleza e demais municípios da RMF, utilizando os dados das Pesquisas Origem-Destino (OD) Domiciliares de 1996 e 2019. Na sequência, serão implementados os esforços analíticos de diagnóstico estratégico da problemática das desigualdades socioespaciais na acessibilidade e mobilidade ao trabalho (Garcia *et al.*, 2018) da população de baixa renda

periferizada de Fortaleza e dos municípios de Caucaia e Maracanaú, utilizando-se da tipologia de problemas e metodologia proposta por Sousa (2019), a fim de diagnosticar relações de causalidade das desigualdades socioespaciais e intergeracionais.

Por fim, pretende-se implementar um esforço qualitativo de validação do diagnóstico estratégico por meio da realização de oficinas comunitárias com grupos representativos da população de baixa renda residente na periferia de Fortaleza, assim como nas áreas centrais e periféricas dos municípios de Caucaia e Maracanaú, a partir da compreensão de que tais segmentos populacionais possuem níveis de acessibilidade e padrões de mobilidade distintos entre si, a fim de coletar a percepção dos indivíduos sobre suas decisões locacionais e de viagens nos contextos nos quais estão inseridos (Elias *et al.*, 2022).

4. CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Portanto, espera-se com esta pesquisa contribuir fenomenologicamente para uma compreensão mais aprofundada da complexa problemática da segregação socioespacial resultante do espraiamento urbano e metropolitano no Brasil. Almeja-se também produzir conhecimento metodológico que auxilie no processo de planejamento urbano-metropolitano integrado do uso do solo e transportes, apoiado em um paradigma de acessibilidade e mobilidade justas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Accioly, V. M. e C. M. L. Nogueira (2011) Mobilidade e metropolização: o caso da Região Metropolitana de Fortaleza. *Revista Geográfica de América Central*, v. 2, n., p. 1–15. Disponível em: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451744820338 (acesso em 14/09/2025).

Andrade, B. R.; C. F. G. Loureiro; F. F. L. de M. Sousa e A. S. Lopes (2020) Efeitos da periferização nos níveis de acessibilidade aos empregos da população de baixa renda em Fortaleza. *Transportes*, v. 28, n. 3, p. 46–60. DOI:10.14295/transportes.v28i3.1810

Blanco Jr, C. (2021) Regiões metropolitanas no Brasil: avanços e desafios no planejamento e na governança de um território de desigualdades pós-estatuto da metrópole. In Costa, M. A.; L. Lui e S. T Rebello (org.) Governança metropolitana na América Latina: um panorama das experiências contemporâneas sob uma mirada comparativa. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, p. 51–76. DOI:10.38116/978-65-5635-017-2cap2

Castro, I. R. de; C. F. G. Loureiro e M. A. Giannotti (2025) Evolution of accessibility to work for low-income populations in Brazil: Towards equitable and sustainable metropolises? *Habitat International*, v. 156, n., p. 103306. DOI:10.1016/j.habitatint.2025.103306

Cavalcante, C. B. (2023) *Crítica ao planejamento urbano e de transportes em Fortaleza à luz do paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade na urbe sustentável*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/72068 (acesso em 14/09/2025).

Diógenes, B. H. N. (2012) *Dinâmicas urbanas recentes da área metropolitana de Fortaleza*. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/72068 (acesso em 14/09/2025).

Diógenes, B. H. N. e R. A. Paiva (2014) O Processo Histórico de Metropolização de Fortaleza. In Anais do III Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (São Paulo, SP). São Paulo: ANPARQ, p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336839355_O_Processo_Historico_de_Metropolizacao_de_Fortaleza (acesso em 14/09/2025).

Elias, D.; R. Pequeno, R. e F. R Leitão (2022) O que há de agrário na Região Metropolitana de Fortaleza? *GeoTextos*, v. 18, n. 1, p. 31–61. DOI:https://doi.org/10.9771/geo.v18i1.49491

Firkowski, O. L. C. F. (2013) Metrópoles e Regiões Metropolitanas no Brasil: Conciliação ou Divórcio? In Furtado, B. A.; C. Krause e K. C. B. de França (eds). Território metropolitano, políticas municipais: por soluções conjuntas de problemas urbanos no âmbito metropolitano. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, p. 21–51. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/3003 (acesso em 14/09/2025).

Garcia, C. S. H. F.; M. do R. M. R. Macário; E. D. de A. G. Menezes e C. F. G. Loureiro (2018) Strategic Assessment of Lisbon's Accessibility and Mobility Problems from an Equity Perspective. *Networks and Spatial Economics*, v. 18, n. 2, p. 415–439. DOI:10.1007/s11067-018-9391-4

Lima, L. S., C. F. G Loureiro; F. F. L. de M. Sousa e A. S. Lopes (2021) Espraiamento urbano e seus impactos nas desigualdades socioespaciais da acessibilidade ao trabalho em Fortaleza. *Transportes*, v. 29, n. 1, p. 229–246. DOI:10.14295/transportes.v29i1.2021

Ministério das Cidades (2008) Como Anda Fortaleza. In Cunha, E. M. P. e R. S. Pedreira (org.) Como Andam as Regiões Metropolitanas. Brasília: Ministério das Cidades. Disponível em: https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/serie-como-andam-as-regioes-metropolitanas-como-anda-

fortaleza/ (acesso em 14/09/2025).

Pinto, D. G. L.; C. F. G. Loureiro; F. F. L. de M Sousa e B. Motte-Baumvol (2023) The effects of informality on socio-spatial inequalities in accessibility to job opportunities: Evidence from Fortaleza, Brazil. *Journal of Transport Geography*, 108. DOI:10.1016/j.jtrangeo.2023.103577

Sousa, F. F. L. de M. (2019) *Diagnóstico estratégico das desigualdades socioespaciais na acessibilidade ao trabalho em Fortaleza*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/72068 (acesso em 14/09/2025).

Rebeca da Silva Souza (rebeca.souza@det.ufc.br)
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro (felipe@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Rua Prof. Armando Farias, Bloco 703, Pici, Fortaleza, Ceará, Brasil.

MOBILIDADE ATIVA DE CRIANÇAS NO DESLOCAMENTO PARA A ESCOLA

Alice Ribeiro Uliam, Rochele Amorim Ribeiro
Universidade Federal de São Carlos

RESUMO
Ponderar sobre a acessibilidade de crianças nem sempre foi uma diretriz nos projetos de mobilidade urbana, porém elas estão presentes nos espaços urbanos, usufruindo da cidade, mesmo que estes nem sempre sejam acessíveis a elas. Nos últimos anos a mobilidade urbana infantil vem sendo estudada, buscando compreender seus padrões, sobretudo quanto aos deslocamentos para a escola. A alocação de vagas para crianças em escolas da rede pública geralmente considera a distância entre moradia e escola, priorizando o menor deslocamento. Entretanto, mesmo com distâncias compatíveis para o transporte não-motorizado, observa-se a predominância do transporte motorizado como escolha modal para deslocar-se à escola. Diante disso, esta pesquisa busca identificar as características do espaço construído determinantes no deslocamento a pé de crianças para a escola por meio de uma revisão sistemática e acompanhada de um estudo de caso na cidade de São Carlos–SP. Como resultado, espera-se identificar as características do ambiente de vizinhança que propiciam a escolha de modais ativos e assim contribuir com parâmetros que possam balizar um planejamento de mobilidade urbana mais acessível e seguros para as crianças.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Mundialmente, programas e organizações têm mobilizado diferentes países com a missão de promover a segurança, acessibilidade e qualidade dos ambientes urbanos, a fim de garantir que crianças e adolescentes tenham boas condições de se deslocar de forma segura e independente (ITDP Brasil, 2024). A Década de Ação pela Segurança no Trânsito pela OMS em 2011, renovada em 2021, também a Agenda 2030, organizada em 2015, na qual a Organização das Ações Unidas estabeleceu os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs), incentivaram o desenvolvimento de cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis por meio do objetivo número 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis).

É de grande importância a tomada de medidas de mobilidade segura, especialmente para crianças de 5 a 14 anos, para as quais tem sido a maior causa de fatalidades no Brasil. Estas fatalidades podem ser prevenidas por meio de operações de divulgação de informações, políticas públicas e transformação do ambiente (Criança Segura, 2019). Quanto ao ambiente dos entornos escolares, este geralmente contempla um raio de 300m da unidade de ensino e podem enfrentar uma série de problemas de segurança viária, colocando em risco, além das crianças, os cuidadores que diariamente se deslocam por estas áreas, não estimulando o transporte ativo (Guia de Entornos Escolares Seguros, 2024).

Existem determinantes que são discutidos a respeito das viagens ativas de crianças conforme apresenta Leung & Loo (2020), entre eles alguns mais particulares como idade, gênero, condições sociais, presença de acompanhantes ou irmãos. Outros determinantes com relação ao ambiente de vizinhança, são: as distâncias das viagens, ruas interconectadas, acessibilidade, percepção de segurança e presença de equipamentos de infraestrutura urbana. Há evidências de que a qualificação do espaço construído, tornando-o seguro e confortável, possa estimular a adoção do transporte ativo por crianças em seus deslocamentos diários (ITDP Brasil, 2021). Em contrapartida com a literatura, uma pesquisa realizada sobre os deslocamentos de crianças para a escola, indica que em São Paulo – SP, a maior metrópole da América Latina, a renda é preponderante para a decisão de escolha modal, independentemente da distância percorrida e do espaço construído. (Humberto et al., 2020).

Considera-se importante a investigação destes padrões de deslocamento de crianças para a escola em diferentes portes de cidade, a fim de direcionar as políticas públicas para incentivo aos modos de transportes não-motorizados. Portanto o objetivo desta pesquisa é identificar qual o impacto destes determinantes para o deslocamento a pé de crianças até a escola em cidades de médio porte, por meio da revisão de literatura e de um estudo de caso na cidade de São Carlos - SP. Os resultados serão confrontados com os princípios dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, sobretudo o objetivo número 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nota-se, ao longo dos últimos anos, uma restrição nas viagens com Deslocamento Ativo para Escola (*Active Travel to School – ATS)* de forma concomitante com a expansão urbana e o crescimento econômico em países em desenvolvimento (Yang et al., 2019). Logo, o tema desta pesquisa é crescente nos últimos cinco anos, sendo publicado em diversos países como em destaque Portugal, Estados Unidos, Reino Unido entre outros, incluindo o Brasil, mesmo que ainda de forma menos marcante, mas com significativas relações de pesquisa com outras nações.

Uma estratégia de mobilidade adotada em diferentes países é o Ônibus Escolar a Pé (Walking School Bus – WSB), este já teve sua implementação, por exemplo, em 2022 na cidade de Carini, na Itália. Em um estudo, por meio de levantamentos da ferramenta Traffic Stats, foram apontados diversos aspectos positivos decorrentes das novas medidas adotadas no entorno escolar (Salvo et al., 2024), como a diminuição da densidade do tráfego, do tempo de viagem e velocidade na via, sendo estes, fatores que contribuíram para a segurança das crianças.

Em avaliações do cenário latino-americano, influenciado por diferentes realidades sociais, pesquisas indicam a maior concentração de viagens a pé em locais de maior precariedade e, em contrapartida, menores quantidades de viagens em áreas com melhores recursos (Humberto et al., 2020). Desta forma, apontam a demanda por aprimoramento nas áreas com menores recursos e o incentivo do deslocamento ativo em áreas já estruturadas. Agentes que já atuam na qualificação do espaço construído para a mobilidade ativa no Brasil são apontados: *Global Designing Cities Initiative*, a Iniciativa Urban95, idealizada pela Fundação Bernard Van Leer, entre outras, oferecendo apoio técnico para gestões municipais no aprimoramento de políticas urbanas voltadas para as crianças (Urban95, 2022). Além destes, outros agentes atuam na indicação de materiais balizadores para avaliação do ambiente construído sendo eles o Indice de Caminhabilidade do Instituto de Política de Transporte e Desenvolvimento (ITDP, 2019) e o Padrão de Qualidade DOTS. (ITDP, 2017).

3. MÉTODO E RESULTADOS PARCIAIS

Como método, este trabalho compõe quatro etapas contínuas, adotando as considerações apresentadas de Leung & Loo (2020), sendo elas a 1° uma revisão bibliográfica sobre a temática da mobilidade ativa infantil, principalmente os deslocamentos para a escola; a 2° um levantamento de dados da região de entorno das escolas, quanto aos determinantes de ambiente de vizinhança a partir de informações do IBGE (2022) e coleta a campo; a 3º aplicação de questionários com as crianças e com os responsáveis visando a coleta de informações sobre os deslocamentos diários para a escola; 4º uma análise espacial dos dados da região e dos padrões de deslocamento por meio de ferramentas em SIG. Quanto ao parâmetro de idade, foi estabelecida na pesquisa, embasada no Estatuto da Criança e do Adolescente (Lei n.° 8.089 de 1990), a faixa etária do 5° ano do ensino fundamental I com crianças de idade entre 10 e 11 anos como grupo focal.

Com base em uma revisão bibliográfica inicial, identifica-se que, dentre as variáveis determinantes para o deslocamento ativo infantil, as mais apontadas recentemente na pesquisa científica são distância, idade, condição social e ambiente de vizinhança. Logo, como estudo de caso, foi considerando o cenário geográfico da cidade de São Carlos, suas escolas públicas e a realidade socioeconômica correspondente, a partir de dados do censo escolar de 2022, conforme representado na Figura 1. Em uma avaliação preliminar, é possível identificar por meio dos dados do INSE (Indicador de Nível Socioeconômico), uma segregação entre área central, com melhor índice socioeconômico. Já na região sul, percebe-se um adensamento de escolas com um menor índice INSE. Estes dados serão posteriormente confrontados com demais condicionantes do espaço construído, como qualidade das calçadas, iluminação pública, acessibilidade, segurança viária, arborização, infraestrutura e distâncias dos acessos.

Por fim, como resultado desta pesquisa, pretende-se obter uma análise, por meio de mapas e gráficos, a respeito das condicionantes do espaço urbano construído que influenciam o deslocamento ativo de crianças no caminho para a escola no contexto de uma cidade de médio porte, suas principais necessidades e potencialidades passíveis de aprimoramento pelo planejamento urbano.

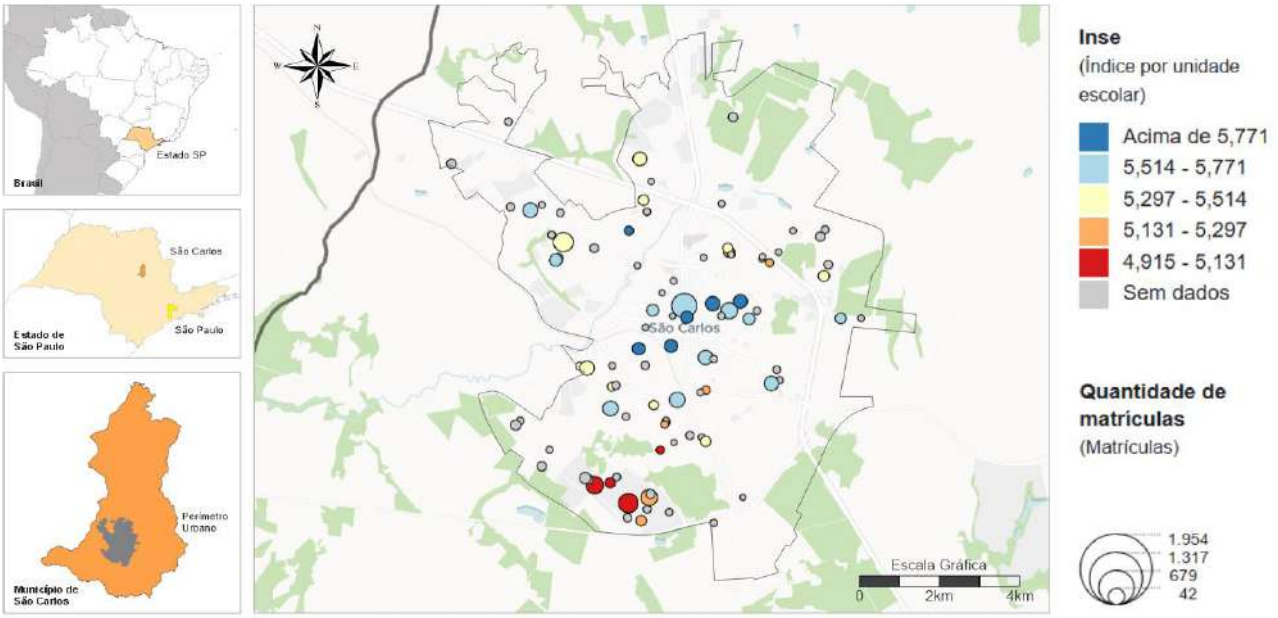


Figura 1: Mapa das escolas de São Carlos conforme nível socioeconômico e quantidade de matrículas. Fonte: INEP (censo escolar 2022) adaptado por GeoReDUS (2025).

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Criança Segura Brasil. (2019). *Criança Segura Brasil*. https://criancasegura.org.br/

Humberto, M.; B. Pizzol; F. Moura; M. Giannotti e M. P. de Lucca-Silveira. (2020). *Investigating the Mobility Capabilities and Functionings in Accessing Schools Through Walking: A Quantitative Assessment of Public and Private Schools in São Paulo (Brazil)*. Journal of Human Development and Capabilities, *21*(2), 183–204. https://doi.org/10.1080/19452829.2020.1745163

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2022: primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

ITDP Brasil. (2024). Guia de entornos escolares seguros. https://itdpbrasil.org/guia-de-entorno-escolares-seguros/

ITDP Brasil. (2019). Índice de Caminhabilidade. https://itdpbrasil.org/icam2/

ITDP Brasil. (2027). Padrão de Qualidade DOTS. www.itdp.org

ITDP Brasil. (2021). Primeiros passos: mobilidade urbana na primeira infância. https://bernardvanleer.org/pt-br/

Leung, K. Y. K. e B. P. Y. Loo. (2020). *Determinants of children's active travel to school: A case study in Hong Kong.* Travel Behaviour and Society, *21*, 79–89. https://doi.org/10.1016/j.tbs.2020.05.009

Salvo, G.; L. Sanfilippo e A. Brignone. (2024). *Investigating Access to Schools through Walking: A Study of Built School Road Networks*. Sustainability, *16*(17), 7452. https://doi.org/10.3390/su16177452

Urban95. (2022). *Como as cidades brasileiras estão pensando a primeira infância*. https://urban95.org.br/wp-content/uploads/2022/02/urban95_retro2021.pdf

Yang, Y.; H. Xue; S. Liu e Y. Wang. (2019). *Is the decline of active travel to school unavoidable by-products of economic growth and urbanization in developing countries?* Sustainable Cities and Society, *47*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101446

Alice Ribeiro Uliam (aliceuliam@estudante.ufscar.br)
Rochele Amorim Ribeiro (rochele@ufscar.br)
Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Departamento de Engenharia Urbana, Rod. Washington Luís – Monjolinho, São Carlos – SP.

MOBILIDADE URBANA PARA IDOSOS NO CONTEXTO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS BRASILEIRAS: ABORDAGEM POR MODELOS ECOLÓGICOS

Marli Peixoto Almeida Bezerra[1], Andersonn Magalhães de Oliveira[1], Peolla Paula Stein[1]
[1]Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal do Sul da Bahia

RESUMO
Este projeto investiga como os Planos de Mobilidade Urbana (PMUs) brasileiros consideram as necessidades da população idosa, com base no modelo ecológico para vida ativa. A pesquisa adota abordagem qualitativa, documental e descritiva-analítica, fundamentada na psicologia ambiental e nos modelos ecológicos. A metodologia proposta inclui análise de conteúdo sistemática de PMUs, utilizando o software MAXQDA para codificação e categorização das informações. Serão considerados múltiplos níveis ambientais — individual, interpessoal, físico, social, informacional e político-institucional — em cruzamento com os princípios da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU). A proposta busca identificar lacunas, boas práticas e o grau de alinhamento dos planos com uma abordagem integrada de mobilidade voltada ao envelhecimento ativo. Espera-se que os resultados contribuam para o aprimoramento das políticas públicas urbanas, promovendo cidades mais acessíveis e inclusivas para todas as idades.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DAS QUESTÕES DE PESQUISA

O processo de envelhecimento da população vem se intensificando nos últimos anos, adquirindo uma crescente relevância no cenário atual. (DA SILVA *et al.,* 2017). Segundo os dados do instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE, 2022), de 2012 a 2021 houve um aumento de 11,3% para 14,7% da população com mais de 60 anos. Segundo Clements *et al.* (2018) é possível que ao longo dos últimos anos, a população idosa mundial com 65 anos ou mais poderá crescer de 12% em 2018 para mais de 38% em 2100.

Esse panorama demográfico impõem desafios crescentes ao planejamento urbano e territorial, demandando políticas públicas que considerem as necessidades específicas dessa parcela da população. No contexto brasileiro, o plano diretor surge como o principal instrumento da política de ordenamento territorial e expansão urbana, conforme estabelecido pela constituição federal de 1988 e regulamentada pela lei nº 10.257/2001, conhecida como estatuto da cidade (Brasil, 2001). Originalmente essa legislação concentrava-se nos grandes centros urbanos, especialmente nos municípios com mais de 500 mil habitantes. Contudo, à medida que as demandas por mobilidade urbana, instituída pela lei federal nº 12.587/2012, determinou a obrigatoriedade de elaboração do plano de mobilidade urbana (PMU) para municípios com mais de 20 mil habitantes, desde que também possuam plano diretor (Brasil, 2012). Tal diretriz estabelece uma importante articulação entre os instrumentos de planejamento urbano e adota uma perspectiva alinhada aos planos de mobilidade urbana sustentável (PMUS) aplicados em cidades europeias, conforme destacado por Pires (2020) e discutido por Stein (2024).

Entretanto, a mera existência de um PMU não garante que o deslocamento das pessoas idosas seja adequadamente planejado (LEÃO *et al.,* 2022). Furtado, Silva e Araújo, (2017), identificou-se que um dos principais receios entre a população idosa se refere ao risco de quedas, tanto em vias públicas quanto no acesso e no interior dos meios de transporte coletivo, por conseguinte, isso leva os idosos a se recolherem em suas próprias casas por receio. Ruas, calçadas adequadas para pedestres, semáforos, transporte público de qualidade e paradas adaptáveis, iluminação adequada, são preponderantes no desempenho da mobilidade idosa.

A literatura recente destaca a influência significativa do ambiente construído na saúde e mobilidade da população idosa. Garin *et al.* (2014), evidenciam que ambientes urbanos bem planejados podem melhorar a saúde física e mental dos idosos. Lak *et al.* (2021), desenvolveram uma ferramenta de medição para o envelhecimento ativo em áreas urbanas, considerando múltiplos fatores ecológicos. Handy *et al.* (2002), discutem como o ambiente construído influencia o comportamento de viagem, fornecendo *insights* sobre como o planejamento urbano pode incentivar a mobilidade ativa.

Modelos ecológicos entendem a mobilidade ativa como resultado da interação entre níveis: individual (saúde, idade, motivação), interpessoal (apoio familiar e de pares), organizacional (instituições de saúde, centros comunitários), comunitário/ambiental (calçadas, transporte público, segurança, desenho urbano) e político-institucional (leis, financiamento e políticas públicas) (SALLIS et al., 2006; LAK et al., 2020). Entre idosos, evidências mostram que barreiras arquitetônicas e baixa acessibilidade reduzem a participação, enquanto apoio social e ambientes caminháveis ampliam o envelhecimento ativo (PETERS et al., 2024). Assim, planos fundamentados nesses modelos devem contemplar diagnósticos e ações em cada nível para garantir inclusão efetiva dos idosos.

2. OBJETIVOS

Analisar como o modelo ecológico para vida ativa pode subsidiar a formulação de políticas públicas de mobilidade urbana centradas na população idosa. Para tanto, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Mapear as ações e diretrizes presentes nos Planos de Mobilidade Urbana (PMUs) brasileiros que impactam direta ou indiretamente a mobilidade da população idosa, à luz dos diferentes níveis do modelo ecológico para vida ativa.
- Analisar de que forma os planos municipais consideram os ambientes percebido, físico, social e informacional na formulação de políticas públicas de mobilidade voltadas aos idosos.
- Identificar lacunas, desalinhamentos e boas práticas na aplicação dos princípios da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) em relação às necessidades da população idosa.

3. PROPOSTA METODOLÓGICA E CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

A pesquisa é qualitativa, de caráter documental e descritivo-analítico. Está fundamentada na psicologia ambiental e utiliza como principal referencial teórico o modelo ecológico para vida ativa, proposto por Sallis *et al.* (2006), e complementado pelo framework 5P de Lak *et al.* (2020). Esses modelos organizam os fatores que influenciam o comportamento humano em diferentes níveis — individual, interpessoal, físico, social, informacional e político-institucional — permitindo compreender como esses contextos se articulam para favorecer ou limitar a mobilidade ativa, neste projeto, em especial, pessoas idosas.

A estratégia central é a análise de conteúdo sistemático de documentos públicos, para subsidiar a análise de conteúdo, conforme os pressupostos metodológicos de Bardin (2010) e para tal será empregado o uso do *software* MAXQDA. Trata-se de uma ferramenta que auxilia na análise de dados de pesquisas qualitativas e de métodos mistos, disponíveis nos sistemas operacionais Windows e Mac desde seu lançamento em 1988. O MAXQDA possibilita distintos formatos de dados, incluindo arquivos de textos, áudio, vídeo, PDF, e planilhas. Dispõe de funcionalidades específicas para transcrição e análises de entrevistas, discursos e grupos focais MAXQDA (2023). Entre seus recursos, destacam-se as ferramentas de categorização e codificação, que permitem a sistematização dos elementos-chave do modelo ecológico de Sallis *et al.* (2006). Adicionalmente, para que o estudo alcance o objetivo estabelecido, será empregada a metodologia elaborada por Stein (2024) desenvolvida em sua tese de doutorado. Para determinar qual cidade seria estudada seguiram-se três critérios: uma cidade por estado brasileiro e o distrito Federal; cidade com maior número de habitantes do estado; e cidade que possuía plano de mobilidade. Os planos a serem analisados serão selecionados a partir de uma planilha intitulada “Status de elaboração dos planos de mobilidade urbana (todos municípios)” disponíveis no site do Ministério das Cidades.

A categorização dos dados será orientada pelos níveis do modelo ecológico, contemplando dimensões fundamentais para a análise da mobilidade urbana da população idosa. No nível individual, serão consideradas percepções, limitações funcionais e aspectos relacionados à autonomia. O nível interpessoal abordará as redes de apoio e as relações familiares que influenciam o deslocamento e a participação social dos idosos. O nível físico engloba a análise da infraestrutura urbana, da acessibilidade, do transporte adaptado e da iluminação pública. Já o nível social ou comunitário tratará das interações em espaços públicos e dos vínculos de pertencimento e coesão comunitária. O nível informacional compreenderá aspectos como sinalização, comunicação acessível e orientação espacial, enquanto o nível político-institucional abarcará leis, diretrizes, normas técnicas e estruturas de governança que influenciam diretamente a formulação e implementação das políticas públicas.

A análise será orientada por quatro eixos: (1) envelhecimento populacional, (2) mobilidade ativa, (3) diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), e (4) estrutura conceitual dos modelos ecológicos. Com base nesses eixos e nos níveis ambientais, será construída uma matriz de análise cruzando os elementos do modelo ecológico com os princípios da PNMU, como acessibilidade, equidade, participação e segurança. Essa abordagem busca revelar como as políticas públicas de mobilidade têm (ou não têm) incorporado as necessidades específicas da população idosa. A pesquisa se inspira na metodologia desenvolvida por Stein (2024) em sua tese de doutorado, ampliando-a com foco específico no envelhecimento e nos determinantes subjetivos da mobilidade urbana.

Com base nesses níveis, será elaborada uma matriz de cruzamento com os princípios orientadores da Política Nacional de Mobilidade Urbana, como acessibilidade, equidade, segurança, eficiência e participação. Esse cruzamento permitirá identificar ações coerentes entre os discursos institucionais e os fundamentos do modelo ecológico, mapear lacunas e incoerências em relação às reais necessidades da população idosa e destacar boas práticas potencialmente aplicáveis em diferentes contextos urbanos.

Agradecimentos
A realização deste estudo contou com o apoio institucional da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), por meio do Centro de Formação em Tecnociências e Inovação, da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e do Observatório da Mobilidade Urbana, além da CAPES e da FAPESB, aos quais agradecemos pelo suporte financeiros às atividades de pesquisa e extensão vinculadas a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barros, T. F.; M. N. Gonçalves e D. V. Santos (2024) Caminhabilidade e envelhecimento: uma revisão sistemática e bibliométrica. In Anais do XXXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Salvador: ANPET.

Bardin, L. (2010) *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70.

Clements, B.; F. Eich e S. Gupta (2018) *Equidade e eficiência na gestão do envelhecimento populacional*. São Paulo: Ed. Blucher.

Furtado, C. R.; J. R. Souza e R. F. Andrade (2017) Avaliação da capacidade funcional dos idosos institucionalizados em um município do interior do Ceará. In Anais do VI Congresso Brasileiro de Envelhecimento Humano. João Pessoa: UFPB.

Garin, N.; R. Olaya; M. Moneta et al. (2014) Built environment and elderly population health outcomes: a systematic review. *European Journal of Public Health*, v. 24, n. 6, p. 911–916. DOI: 10.1093/eurpub/cku057

Handy, S.; M. Boarnet; R. Ewing e R. Killingsworth (2002) How the built environment affects physical activity: views from urban planning. *American Journal of Preventive Medicine*, v. 23, n. 2, p. 64–73. DOI: 10.1016/S0749-3797(02)00475-0

Lak, A.; M. A. Kermanshachi e A. Safapour (2020) Framework to promote active aging in developing countries: a multi-level ecological approach. *BMC Public Health*, v. 20, p. 1–22. DOI: 10.1186/s12889-020-09311-z

Leão, M. S.; R. Macário e T. Maia (2022) Sustainable Urban Mobility Plans (SUMPs): análise de boas práticas europeias e sua aplicação no Brasil. In Anais do XXXVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Joinville: ANPET.

Peters, R. W.; L. van der Velden; J. de Vries; M. Hopman-Rock; M. Wagemakers (2024) Which social–ecological factors play a role in older adults' participation in a blended physical activity intervention? Results of a multi-layered feedback analysis. *Journal of Public Health*, p. 1-17. DOI: 10.1007/s10389-024-02322-y

Ribeiro, A. P.; A. S. Moreira; C. G. Tavares e E. O. Correia (2009) Projeto MOBI-AGE: mobilidade urbana e envelhecimento populacional. In Anais do Congresso da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional. São Paulo: ANPUR.

Sallis, J. F.; M. F. Floyd; D. A. Rodríguez e B. E. Saelens (2006) Role of built environments in physical activity, obesity, and cardiovascular disease. *Circulation*, v. 117, p. 2072–2076. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.189548

Stein, P. P. (2024) *Da teoria à prática: oportunidades da associação do modelo ecológico para vida ativa nas políticas de mobilidade urbana*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus.

Marli Peixoto Almeida Bezerra (malikabezerra@gmail.com)
Universidade Federal do Sul da Bahia, Centro de Formação em Tecnociências e Inovação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Rod. Ilhéus/Itabuna, BR415, Km 22, Ilhéus, BA, Brasil.

Polos Geradores de Viagens

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA MOBILIDADE URBANA NO CAMPUS BACANGA-UFMA UTILIZANDO O IMSCAMP

Luanderson Barbosa Almeida, **Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos**
Universidade Federal do Maranhão

RESUMO
A mobilidade urbana sustentável tem ganhado cada vez mais relevância no planejamento das cidades, principalmente quando se trata de Polos Geradores de Viagens (PGVs). As universidades são PGVs que enfrentam desafios complexos relacionados à temática. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o atual panorama da mobilidade sustentável no campus Bacanga da Universidade Federal do Maranhão, através do índice de mobilidade sustentável para campus universitário (IMSCamp), além de fazer uma análise comparativa dos resultados do estudo realizado em 2017 na instituição. A pesquisa contou com aplicação de um questionário online que obteve 321 respostas, sendo sua análise feita a partir de comparações utilizando a estratificação da amostra segundo a função, renda, gênero e modo de transporte dos respondentes. Os resultados mostraram que o índice geral caiu de 0,259 (2018) para 0,257 (2024), destacando a persistência de problemas, especialmente em infraestrutura e ações de conscientização de uso de modos alternativos.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana sustentável é uma temática que se torna cada vez mais relevante para o planejamento das cidades, especialmente em Polos geradores de Viagens (PGVs), como é o caso dos campi universitários. Com o crescimento urbano e a expansão para áreas periféricas surgem exigências de um transporte eficiente de modo a promover conectividade e equidade (Costa, 2008). A Política Nacional de Mobilidade Urbana reforça a prioridade de uso do transporte coletivo e mobilidade ativa, visando reduzir impactos ambientais e sociais (Brasil, 2012). Com isso, as universidades, por concentrarem grande número de pessoas diariamente, enfrentam desafios significativos de mobilidade, afetando o trânsito, o acesso e as segurança do local (Oliveira, 2015).

Nesse contexto, o desenvolvimento de Gestão da Mobilidade (GM) é essencial. Segundo Reis (2011), a GM é uma abordagem estratégica baseada na demanda, que visa promover a intermodalidade, beneficiando a utilização de transporte mais sustentáveis. No entanto, a efetividade da GM depende da aplicação de ferramentas de avaliação que consigam mensurar o desempenho das estratégias implementadas. Para isso, o índice de mobilidade sustentável surge como uma ferramenta essencial para diagnosticar as condições de mobilidade e verificar o impacto das políticas públicas, pois permitem acompanhar a evolução de certos fenômenos e ações ao longo do tempo em PGVs como os campus (Costa, 2008).

Diante disso, o trabalho analisou o panorama atual da mobilidade urbana no campus Bacanga da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), utilizando o Índice de Mobilidade Sustentável para Campus Universitário (IMSCamp), concebido por Oliveira (2015), com o objetivo de entender a mobilidade no campus. Além de fazer uma análise comparativa com o estudo aplicado por Carvalho e Santos (2018) evidenciando mudanças ou estagnações no período de sete anos, e subsidiando propostas de melhoria alinhadas às especificidades deste campus.

2. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi baseada em uma revisão bibliográfica, nas quais foram consideradas teses, dissertações e artigos referentes ao tema de mobilidade urbana sustentável, índices de mobilidade e demais temas relevantes para a concepção de presente estudo. A partir disso, a pesquisa teve como principais referências o trabalho desenvolvido por Oliveira (2015) e Carvalho e Santos (2018), onde no primeiro foi desenvolvido um índice para mensurar a sustentabilidade da mobilidade urbana no contexto universitário e o segundo foi a aplicação do índice na UFMA em 2017. Esse índice foi selecionado, principalmente, por sua estrutura especifica para ambientes acadêmicos e por ter sido validado previamente em outros campi universitários.

A coleta de dados foi realizada através de um questionário online com 25 perguntas, das quais 19 estavam diretamente associadas aos indicadores, agrupados nos domínios *Conscientização*, *Infraestrutura* e *Gestão e Serviços.* Dentre as 19 perguntas, 5 tiveram caráter quantitativo e as outras 14 perguntas foram qualitativas, sendo as primeiras de interesse percentual, tendo como opção de resposta “sim” ou “não”, para que dessa

forma fosse possível mensurar o quantitativo de pessoas que atendiam a um determinado critério.

As perguntas qualitativas foram organizadas de acordo com a Escala Likert, na qual os respondentes foram solicitados a indicar seu nível de concordância com uma série de afirmações. O questionário foi disponibilizado na plataforma Google Forms, ferramenta gratuita e de fácil acesso. Visando abranger toda comunidade acadêmica, o que inclui discentes, docentes e servidores técnico-administrativo, foi divulgado no Sistema Acadêmico da Universidade - SIGAA, ficando disponível no período de 26 de junho e 11 de julho de 2024 para coleta de dados. Foram obtidas 334 respostas, nas quais 13 pessoas não consentiram em participar da pesquisa, o que resultou em 321 respostas efetivas e usadas.

Os dados foram processados conforme a metodologia apresentada por Oliveira (2015), com conversão das escalas em notas entre 0 e 1. Como 2 dos 20 indicadores originais não se aplicavam à realidade do Campus Bacanga, foi necessária a normalização dos pesos para garantir a consistência da análise. Após o cálculo do IMSCamp geral, procedeu-se à estratificação dos resultados por função, renda, gênero e modo de transporte, permitindo observar desigualdades entre os grupos. Por fim, os dados de 2024 foram comparados com os obtidos por Carvalho e Santos (2018) demonstrando tendências e lacunas na evolução da mobilidade sustentável no campus Bacanga da UFMA

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultado Geral

No trabalho realizado por Carvalho e Santos (2018), foi aplicado um questionário online aos usuários da UFMA, no Campus Bacanga, com o objetivo de avaliar a sustentabilidade da mobilidade urbana no local. Na aplicação, dois indicadores não foram considerados devido à sua inaplicabilidade ao campus: *Infraestrutura de transporte público urbano* e *Medidas de gestão das áreas de estacionamento*.

No presente trabalho, realizado em 2024, os indicadores excluídos foram *Transporte coletivo interno/entre áreas do campus* e *Medidas de gestão das áreas de estacionamento* também devido à sua inaplicabilidade ao campus. Logo, observa-se, que houve a exclusão distinta dos indicadores em cada estudo, o que compromete a comparação direta. Dessa forma, com o intuito de garantir uma comparação mais efetiva após a exclusão dos indicadores *Infraestrutura de transporte público urbano*, no estudo de 2018 e *Transporte coletivo interno/entre áreas do campus* no presente estudo, os mesmos não foram considerados para comparação. Com isso, foi aplicado a metodologia para normalizar os pesos dos 17 indicadores remanescentes. Essa normalização foi realizada tanto para o índice geral quanto para as estratificações, garantindo que a soma total dos pesos continuasse igual a 1,000 em ambas as aplicações.

Os índices gerais analisados para os diferentes estudos no campus são baixos, indicando níveis similares de sustentabilidade na mobilidade urbana, o resultado está exposto na Tabela 1.

Tabela 1: Comparativo do IMSCamp por função (2018 x 2024)

	IMSCamp 2018	**IMSCamp 2024**
Indice geral	0,259	0,257

O IMSCamp obtido em 2018 foi de 0,266, mas após a exclusão do indicador *Infraestrutura de transporte público urbano* para a comparação, o índice ajustado resultou em 0,259, evidenciando que esse indicador contribuía positivamente para o índice. Já no presente estudo, o IMSCamp foi de 0,255, e após a exclusão do indicador *Transporte coletivo interno/entre áreas do campus,* o valor aumentou para 0,257, revelando que esse indicador contribuía negativamente para o índice. Essa comparação indica leve queda na mobilidade sustentável. Embora os valores sejam próximos, a análise revelou que essa redução está relacionada a percepções distintas dos usuários. A diminuição do índice de 2018 é devido à baixa pontuação de alguns indicadores do tema *Campanhas educativas* e *Modos não motorizados,* o que indica ausência de ações educativas e infraestrutura adequada para pedestres e ciclistas. Já em 2024, a redução se está associado aos temas *Segurança, Transporte coletivo* além das *Campanhas educativas.*

3.2 Análise Comparativa Estratificada

A Tabela 2 mostra a comparação da estratificação segundo a função na universidade e revela diferenças sutis

entre os diferentes grupos de trabalho.

Tabela 2: Comparativo do IMSCamp por função (2018 x 2024)

Função	IMSCamp 2018	IMSCamp 2024
Discentes	0,259	0,258
Docentes	0,220	0,244
Técnico-administrativos	0,266	0,264

No estudo de 2018 o grupo Técnico-administrativo obteve o maior índice, assim como no atual estudo. Em sequência, os Discentes com índices próximos nos diferentes estudos. Já os docentes apresentaram menores índices com um valor de 0,220 no primeiro estudo, enquanto no segundo obteve 0,244. O menor índice apresentado pelos docentes pode estar relacionado ao fato de que, em sua maioria, esse grupo utiliza transporte privado para acessar o campus. No entanto, o aumento do índice no atual estudo para esse grupo, está relacionado a valoração maior a alguns indicadores como *Adequação do modo de transporte*, *Infraestrutura de estacionamento* e *Qualidade das calçadas dentro e de acesso ao campus*, os quais fazem parte do Domínio *Infraestrutura*, isso evidencia percepções distintas sobre a baixa qualidade da infraestrutura do campus, para este grupo. Os índices estratificados por renda mostram tendências diferentes entre os dois estudos conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Comparativo do IMSCamp por faixa de renda (2018 x 2024)

Faixa de Renda (SM)	IMSCamp 2018	IMSCamp 2024
Até 1	0,179	0,266
1 a 3	0,146	0,258
3 a 5	0,183	0,260
5 a 10	0,251	0,242
Mais de 10	0,089	0,245

No estudo realizado por Carvalho e Santos (2018), o melhor índice foi observado no grupo de 5 a 10 salários-mínimos (0,251), enquanto o grupo com renda acima de 10 salários-mínimos teve o menor índice. Em contraste, no presente estudo, os grupos de menor renda (até 1 salário-mínimo) apresentaram o maior índice (0,266), enquanto o grupo de faixa de renda entre 5 e 10 salários obtiveram uma valoração menor, cujo índice foi 0,242, sugerindo, respectivamente, maior e menor dependência de modos sustentáveis. De modo geral, todos os grupos do atual estudo apresentaram índices maiores com relação aos demais, o que pode ter contribuído para melhoria significativa em relação ao estudo anterior é a existência alguns indicadores no Domínio *Infraestrutura* que apresentaram score maior no presente trabalho.

A análise da estratificação por modo de transporte mostrada na Tabela 4 destaca diferenças importantes nos índices dos dois trabalhos.

Tabela 4: Comparativo do IMSCamp por modo de transporte (2018 x 2024)

Modo de Transporte	IMSCamp 2018	IMSCamp 2024
A pé	0,325	0,265
Bicicleta	0,295	Não disponível
Moto	0,222	0,301
Carro	0,184	0,263
Transporte coletivo	0,208	0,253

Atualmente os motociclistas apresentaram a maior valoração, refletindo no índice de 0,301, enquanto no estudo anterior os pedestres e ciclistas obtiveram os melhores índices 0,325 e 0,295, respectivamente. O maior índice entre os usuários de motos pode estar relacionado a maior valoração para os indicadores do Domínio *Conscientização*, o que sugere que esse grupo ouve ou participa de ações educativas voltadas para utilização de modos sustentáveis, mas não necessariamente colocam em prática. De modo geral, a valoração dos índices atuais é melhor, com exceção para o modal a pé e bicicleta. Dos ciclistas, não foi possível calcular o índice devido à ausência de respondentes usuários de bicicleta no campus. Já a queda no índice para pedestres está associada a falta de segurança percebida pelos pedestres, à baixa valoração dos indicadores direcionados aos modos não motorizados e à falta de percepção ou inexistência de ações e campanhas educativas sobre mobilidade sustentável. Os índices estratificados por gênero revelam mudanças interessantes, conforme a

Tabela 5.

Tabela 5: Comparativo do IMSCamp por gênero (2018 x 2024)

Modo de Transporte	IMSCamp 2018	IMSCamp 2024
Feminino	0,298	0,249
Masculino	0,262	0,267

No IMSCamp de 2018, as mulheres avaliaram a mobilidade de forma mais positiva, acontecendo principalmente pela alta valoração dos indicadores relacionados ao tema *Modos não motorizados*. Já no estudo realizado em 2024, teve a inversão desse padrão com os homens apresentando um índice levemente superior. Esse resultado é explicado também pela maior pontuação do público masculino para os indicadores do tema *Acessibilidade*. Dessa forma, no atual trabalho os homens contribuem mais positivamente para o índice global, enquanto no estudo anterior são as mulheres que fazem essa contribuição. Essa inversão indica mudanças nas percepções individuais de sustentabilidade com relação a modos de transporte mais sustentáveis e acessibilidade do campus que afetam cada gênero de modo diferente.

4. CONCLUSÃO

A aplicação do IMSCamp no Campus Bacanga da UFMA em 2024 mostrou desafios já sinalizados em 2018, mas agora com uma ligeira piora no índice geral, que caiu de 0,259 para 0,257 em uma escala de 0 a 1. Essa redução denota a presença de desafios quanto a mobilidade no campus, e embora pequena, sinaliza que as medidas adotadas ao longo dos últimos seis anos foram ineficazes ou insuficientes para promover avanços significativos na mobilidade interna. Houve a persistência de pontuações baixas em domínios como *Conscientização* e *Infraestrutura para modais sustentáveis* que reforçam essa conclusão.

Entre os indicadores com pior valoração estão *Ações de conscientização do uso de modos alternativos*, *Educação no trânsito* e *Incentivo à utilização de modos alternativos*, além de *Instalações de apoio a modos sustentáveis* e *Segurança pública*. Esses resultados indicam que não houve evolução nas campanhas educativas e também não houve melhoria na oferta de estrutura física para ciclistas e pedestres, agravando a percepção de insegurança e consequentemente desestimulando o uso de transportes não motorizados, visto pela ausência de respondentes ciclistas na amostra. A comparação também revela que, apesar do aumento de ações de conscientização da mobilidade urbana sustentável no meio acadêmico, ainda faltam ações concretas integradas de modo a articular comunicação infraestrutura. A ausência de melhorias em indicadores importantes e o retrocesso em outros aspectos apontam para uma gestão pouco eficaz na priorização da mobilidade como tema estratégico dentro do campus.

Com base nesses resultados, é proposto intervenções conjuntas em diversas áreas como a intensificação de campanhas educativas, com distribuição de cartazes em locais estratégicos, uso das redes sociais da universidade e divulgação dos benefícios da mobilidade ativa através do Sistema Acadêmico da Universidade. No âmbito do incentivo aos modos alternativos, é sugerido a criação de bicicletários, que são inexistentes na universidade, criação de vestiários com chuveiro para pedestres e ciclistas, além de requalificação das calçadas com pavimentação mais adequada e sinalização. Já para a segurança dos usuários, é necessário a instalação de iluminação pública eficiente em áreas de maior fluxo, aumento da patrulha de vigilância em horários críticos, além de ampliar o monitoramento por câmeras. Quanto ao transporte coletivo, é urgente a necessidade do aumento da frequência dos ônibus nos horários de pico e implantação de uma linha exclusiva para a circulação entre as áreas internas da universidade. Outra medida é oferecer incentivos como prioridade em matrícula aos usuários que comprovarem o uso regular de modos sustentáveis.

Ressalta-se que este trabalho possui limitações que este relacionado ao seu caráter de pesquisa amostral, sujeita a diferentes vieses e à representatividade dos respondentes. Outro ponto é a quantidade de respostas, embora significativa, pode não ser representativa para toda comunidade acadêmica. Além disso, a ausência de investimentos em infraestrutura e dados institucionais atualizados dificultou uma análise mais aprofundada e comparações mais amplas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei n° 10.257 de 10 de julho de 2001. Estatuto das Cidades. *Diário Oficial da União*, Brasília-DF, 10 de julho

de 2001.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável (PNMUS). *Diário Oficial da União*, Brasília-DF, 3 de janeiro de 2012.

Carvalho, H. H. S. de e A. B. P. S. dos Santos (2018) Aplicação de índice de mobilidade urbana sustentável na Universidade Federal do Maranhão – campus Bacanga. In: *32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, Gramado - RS. Anais. Gramado.

Costa, M. da S. (2008) *Um índice de mobilidade urbana sustentável.* Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-01112008-200521/. (acesso em 29/06/2025).

Oliveira, A. M. (2015) *Um índice para o planejamento de mobilidade com foco em grandes Polos Geradores de Viagens - Desenvolvimento e aplicação em um campus universitário.* Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-23022016-143827/pt-br.php (acesso em 29/06/2025).

Reis, M. F. M. (2011) *Gestão da mobilidade - plano de mobilidade FEUP*. Dissertação (mestrado). Universidade do Porto, Porto. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61841?locale=pt (acesso em 29/06/2025).

Stein, P. P. (2013) *Barreiras, motivações e estratégias para mobilidade sustentável no campus São Carlos da USP*. 277 f. Dissertação (mestrado). Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-27062013-163702/. (acesso em 29/06/2025).

Luanderson Barbosa Almeida (luanderson.barbosa@discente.ufma.br)
Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, Av. dos Portugueses, 1996, Bacanga, São Luís – MA, Brasil.
Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos (ana.segadilha@ufma.br)
Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Civil, Av. dos Portugueses, 1996, Bacanga, São Luís – MA, Brasil.

ESTUDO SOBRE OS PADRÕES DE DESLOCAMENTO NO CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO (UFOP), EM OURO PRETO (MG)

Emiliane das Graças Dornelas[1], Bárbara Abreu Matos[1], Bárbara Cristina Mendanha Reis[1], Raianny Gonçalves Almeida[1], Yuri Queiroz Abreu Torres[1]
[1]Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO
Este estudo teve como objetivo identificar os padrões de deslocamento da comunidade acadêmica do campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Foi aplicada uma pesquisa de Origem e Destino (OD), com questionário digital respondido por 404 participantes entre julho e agosto de 2024. A análise dos dados permitiu caracterizar os modos de transporte utilizados, horários de deslocamento, bairros de origem e portarias de acesso ao campus. Os resultados apontam para diferenças marcantes entre os grupos: docentes e técnicos utilizam preferem o automóvel particular, enquanto estudantes utilizam predominantemente o transporte coletivo e o deslocamento a pé. A Portaria 1 é a mais acessada, refletindo sua posição estratégica. A maior parte das viagens tem origem na residência dos respondentes, sendo frequente a busca por moradias próximas ao campus. O estudo fornece subsídios para o planejamento da mobilidade universitária e para políticas mais equitativas e sustentáveis.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da urbanização, o consequente crescimento populacional e a diversificação das atividades econômicas, houve um aumento expressivo na demanda por transportes e mudanças nos padrões de deslocamento, o que impacta diretamente a sustentabilidade da mobilidade urbana (Kneib, 2009). Um desses exemplos, foco do presente estudo, se caracteriza pelas viagens de vínculo acadêmico, tendo como destino final, entre outras, as Instituições de Ensino Superior (IES). Nesse contexto, as universidades assumem um papel estratégico no planejamento da mobilidade, uma vez que se configuram como importantes Polos Geradores de Viagens (PGV), visto que esses espaços concentram atividades usualmente de grande porte e relevância, gerando um número significativo de viagens diárias e exigindo, portanto, medidas e estratégias específicas de gestão da mobilidade (Portugal; Goldner, 2003). A pesquisa de Origem e Destino (OD) surge como uma importante ferramenta para identificar os padrões de deslocamento diários da população, inclusive de campi universitários, permitindo identificar os locais de origem e destino, horários das viagens, os meios de transporte utilizados entre outras características essenciais para o planejamento estratégico da mobilidade desses locais (Lessa e Oliveira, 2016).

Cidades que se localizam campus universitários têm se atentado à necessidade de adotar soluções voltadas à integração da mobilidade e planejamento urbano, buscando evitar fluxos excessivos e viagens longas. Essas estratégias fundamentam-se no princípio da combinação de usos do solo e dos serviços de transporte, reduzindo os movimentos pendulares e promovendo, assim, uma mobilidade mais sustentável e uma melhor qualidade de vida para a comunidade acadêmica e os moradores do entorno (Ribeiro *et al.*, 2020). São iniciativas que trazem grande contribuição para o campo da mobilidade urbana, uma vez que os campi universitários são ambientes controlados, multifuncionais e com fluxos variados, características que os tornam um modelo reduzido de uma cidade real, ideal para ser utilizado como um "laboratório vivo" para simulação de sistemas urbanos e de transporte, conforme debatido em estudos sobre essa temática por Abreu e Oliveira (2014), Meira *et al.* (2015), Azzali e Sabour (2018) e Ribeiro *et al.* (2020).

Diante do exposto, o objetivo do presente estudo é identificar os padrões de deslocamento da comunidade acadêmica do campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), a partir da aplicação de uma pesquisa OD. A pesquisa justifica-se pela contribuição para o avanço da literatura no âmbito de estudos voltados à campi universitários, bem como para o contexto local, uma vez que ainda não há dados consolidados sobre os padrões de deslocamento dessa comunidade que representativamente é muito relevante para o município de Ouro Preto (MG).

2. METODOLOGIA

O estudo foi realizado no campus Morro do Cruzeiro (UFOP), localizado na cidade histórica de Ouro Preto (MG) (Figura 1), envolvendo alunos de graduação e pós-graduação, docentes e técnicos administrativos da instituição. Antes do início da coleta de dados, o projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP),

por meio da Plataforma Brasil (CAAE 76643223.2.0000.5150). Para isso, foi elaborado um questionário, combase no estudo desenvolvido por Abreu e Oliveira (2014), contendo 19 perguntas relacionadas à caracterização dos respondestes e das viagens de origem e destino ao campus.

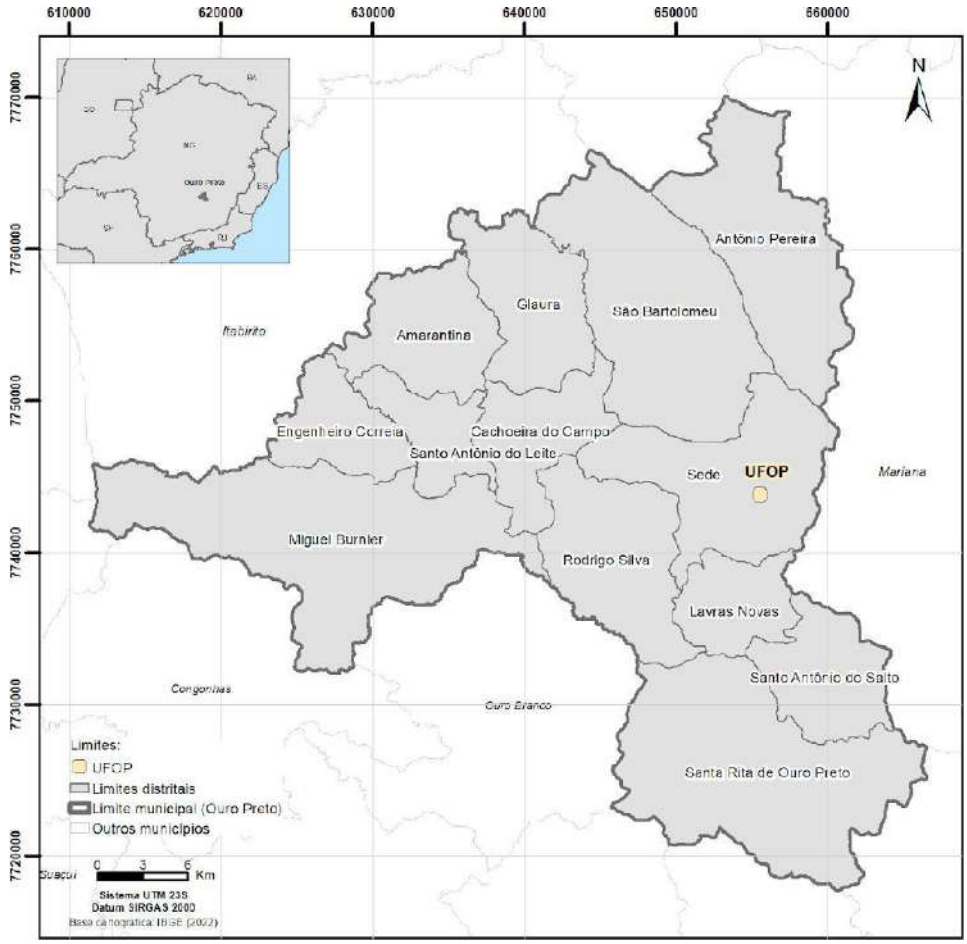


Figura 1: Localização da Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto (MG).
Fonte: Elaborada pelos autores.

A coleta de dados ocorreu por meio de um formulário digital utilizando a ferramenta Google Forms, com divulgação impressa, através de panfletos com QR Code, por meio de mídias sociais (Instagram, grupos de WhatsApp) e e-mails institucionais, o que ampliou o alcance entre o público-alvo. A pesquisa ficou disponível para resposta entre o período de 18 de julho a 5 de agosto de 2024. A amostra inicialmente prevista era de 365 participantes, considerando erro amostral de 5% e confiança em 95%, mas esse número foi superado em 10,7%, totalizando 404 respostas válidas. Todas as respostas foram anônimas, com o consentimento livre e esclarecido dos participantes. A análise dos dados quantitativos foi realizada com o auxílio dos softwares Microsoft Excel e QGIS, que permitiram a tabulação e representação gráfica das informações. Ademais, para os dados qualitativos, foi realizada uma leitura interpretativa, identificando percepções, obstáculos e sugestões relacionadas à mobilidade da comunidade acadêmica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A pesquisa contemplou 404 respostas, sendo 224 mulheres (55,4%), 176 homens (43,6%) e 4 pessoas não binárias (0,99%). Observa-se uma leve predominância de discentes mulheres no campus, o que está alinhado com os dados do Relatório de Gestão 2023 da UFOP, que informa que as mulheres representam 50,7% da população discente da instituição (UFOP, 2023). Em contraste, os dados oficiais sobre o corpo docente e os técnicos administrativos (TAE's) mostram uma maior quantidade de homens, com 59,4% e 55,6%, respectivamente. A faixa etária de 21 a 30 anos obteve a maior taxa de resposta, com 41,1%, seguido de 31 a

40 anos (20%).

A adesão à pesquisa de OD apresentou variações significativas entre as diferentes categorias analisadas. Entre o universo de alunos de graduação (7.174), a taxa de participação foi de 3,1%, e entre alunos de pós-graduação (2060) a participação foi de 1,3%. Em contrapartida, docentes (920) e TAE's (656) alcançaram, respectivamente, uma taxa de participação de 10,4% e 9,2%. Por sua vez, foi possível notar claramente a ocorrência de picos de respostas imediatamente após a divulgação (e reenvio) da pesquisa, conforme demonstrado na Figura 2, fenômeno condizente com pesquisas realizadas em formato digital e amplamente debatido por Abreu e Oliveira (2014).

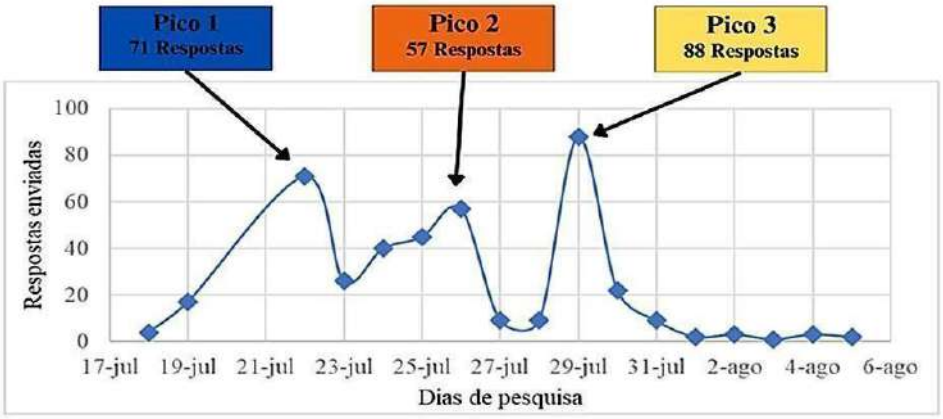


Figura 2: Quantidade de respostas recebidas, com destaque para os picos de participação.
Fonte: Elaborada pelos autores.

O estudo realizado revelou diferentes padrões de deslocação entre os grupos da comunidade acadêmica. Há uma diferença notória entre o deslocamento de discentes e docentes, reflexo de uma combinação de fatores estruturais e socioeconômicos que influenciam a mobilidade no ambiente universitário. Destaca-se o uso expressivo do automóvel particular por professores (79%) e técnicos-administrativos (48%), enquanto os estudantes optam por meios de transporte ativos e coletivos, sendo o ônibus responsável por 32% dos deslocamentos e o modo a pé 46%. Esse cenário não se difere das tendências observadas em nível nacional, nas quais o aumento de renda está associado ao crescimento do uso do transporte individual motorizado — mesmo entre classes médias e baixas —, enquanto pessoas de menor renda permanecem dependentes de modos ativos e coletivos (Pereira *et al.*, 2021).

O horário de entrada no campus é mais comum na faixa de 08h, especialmente para alunos de graduação (60%) e pós-graduação (50%), enquanto as saídas se concentram na faixa das 17h. Esse perfil coincide com o início e término do funcionamento das atividades administrativas e das aulas, inclusive ressalta a relevância da oferta de cursos no período diurno, assim como identificado por Meira *et al.* (2015). Por sua vez, as origens das viagens com destino ao Campus Morro do Cruzeiro foram em sua maioria das residências dos respondentes (> 90%), para todos os grupos. Estes resultados estão alinhados com as descobertas de Azzali e Sabour (2018), revelou que a maior parte dos usuários fazia seus percursos principalmente entre suas casas e a universidade, com um número reduzido de viagens destinadas ao trabalho ou outras tarefas. Esse padrão enfatiza a importância das atividades acadêmicas na vida diária dos usuários e destaca a universidade como o principal destino diário.

A análise do padrão de deslocamento no campus Morro do Cruzeiro revelou que a maioria dos membros da comunidade acadêmica tende a utilizar a mesma portaria tanto para entrada quanto para saída, com variações mínimas geralmente associadas a transportes privados ou deslocações atípicas. Pesquisas semelhantes, como a desenvolvida por Ribeiro *et al.* (2020), confirmam essa tendência em outros campus universitários, destacando a concentração do tráfego em vias arteriais. No caso específico da UFOP, que possui cinco portarias (Figura 3), foi identificada a preferência pela Portaria 1, utilizada por 59% e 50% dos respondentes para entrar e sair do campus, respectivamente, devido à sua localização estratégica, com acesso direto a uma via arterial e

com mais opções de transporte público. As demais portarias dão acesso a vias locais ou de menor fluxo veículos(com a Portaria 2 - Repúblicas; Portaria 3 - Vila dos Operários) ou, ainda, portarias de acesso exclusivo para pedestres (Portaria 4 - Proex/Escola de Minas; Portaria 5 - IFMG), sendo, em sequências, as mais demandas as Portarias 3 e 2, com 20% e 11% de utilização para entrar e 22% e 16% para sair do campus, respectivamente.



Figura 3: Portarias de acesso ao Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto (MG).
Fonte: Elaborada pelos autores.

Foi possível identificar, ainda, que as áreas mais próximas ao campus Morro do Cruzeiro apresentam uma maior proporção de deslocamentos, destacando-se os bairros Bauxita (33,4%), Morro do Cruzeiro (8,3%), e Lagoa (6,9%). Em contraste, bairros mais distantes como Jardim Alvorada (2,4%) e Rosário (1,0%) registram porcentagens significativamente menores. Essa diferença está frequentemente relacionada com a busca por residências mais próximas ao ambiente universitário, principalmente por alunos, e reflete a cultura de moradia em repúblicas universitárias que normalmente são instaladas à uma curta distância do campus, visando maior comodidade e rapidez nos deslocamentos diários. Por fim, entender essa dinâmica é crucial para formular estratégias de planejamento e administração do campus, com o objetivo de aprimorar a infraestrutura e satisfazer de forma mais eficiente as demandas de mobilidade da comunidade acadêmica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou identificar os padrões de deslocamento da comunidade acadêmica da UFOP, campus Morro do Cruzeiro, a partir da aplicação de uma pesquisa de Origem e Destino. Partindo da premissa de que as universidades funcionam como Pólos Geradores de Viagens, o trabalho contribuiu para a compreensão das dinâmicas de mobilidade em um ambiente acadêmico com forte influência sobre o território urbano de Ouro Preto (MG). A análise das respostas evidenciou desigualdades nos modos de deslocamento entre os diferentes segmentos institucionais. Estudantes tendem a utilizar meios ativos e coletivos, enquanto docentes e técnicos optam majoritariamente pelo automóvel particular. Também se observou a concentração dos acessos pela Portaria 1 e a predominância de viagens com origem nas residências dos usuários, localizadas sobretudo nos bairros próximos ao campus.

Os dados obtidos respondem ao objetivo proposto e revelam a importância do campus como destino central da rotina dos respondentes. Em paralelo, apontam desafios para a gestão da mobilidade universitária, como a sobrecarga viária nos horários de pico, o descompasso entre a oferta de transporte público e a demanda, e a

necessidade de melhorias na infraestrutura de acesso. Como propostas, recomenda-se a implementação de medidas de incentivo à mobilidade sustentável, como a promoção de caronas solidárias oficializadas pela instituição e a elaboração de um plano estratégico em prol da mobilidade ativa no campus e no entorno, em conjunto com a gestão municipal. Por fim, sugere-se que pesquisas futuras incorporem variáveis socioeconômicas e dados sobre deslocamentos internos para aprofundar o diagnóstico. A continuidade desses estudos contribuirá para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes, inclusivas e integradas ao planejamento urbano de Ouro Preto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, B. R. A. e L. K. Oliveira (2014) The potential of response rate in online transportation surveys. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 162, p. 34–41.

Azzali, S. e E. A. Sabour (2018) A framework for improving sustainable mobility in higher education campuses: The case study of Qatar University. *Case Studies on Transport Policy*, v. 6, n. 4, p. 603–612.

Kneib, E. C. (2009) Subcentros urbanos: contribuição conceitual e metodológica à sua definição e identificação para planejamento de transportes. (Tese de doutorado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Lessa, D. A. e L. K. Oliveira (2016) Discutindo a mobilidade em campus universitário: o caso da UFMG. In Anais do Seminário Pluris – Mobilidade e Transportes (Belo Horizonte, MG). Belo Horizonte: UFMG. Disponível em: https://fau.ufal.br/evento/pluris2016/files/Tema%203%20-%20Mobilidade%20e%20Transportes/Paper706.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

Meira, L. H.; M. O. Andrade; M. L. A. Maia e A. Brasileiro (2015) O transporte e a consolidação de um campus regional no interior do Nordeste. *Transportes*, v. 23, n. 1, p. 5–13. DOI: 10.14295/transportes.v23i1.776.

Pereira, R. H. M.; L. B. Silva; V. Schwanen; D. Oliveira; A. S. Sanches e L. Braga (2021) Tendências e desigualdades da mobilidade urbana no Brasil I: o uso do transporte coletivo e individual. Brasília: Ipea. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10713. Acesso em: 26 jun. 2025.

Portugal, L. S. e L. G. Goldner (2003*) Estudo de Pólos Geradores de Tráfego e seus impactos nos sistemas viário e de transportes.* São Paulo: Edgard Blücher.

Ribeiro, P.; F. Fonseca e T. Meireles (2020) Sustainable mobility patterns to university campuses: Evaluation and constraints. *Case Studies on Transport Policy*, v. 8, n. 2, p. 639–647.

UFOP (2023) Relatório de Gestão 2023. Ouro Preto: Pró-Reitoria de Planejamento e Desenvolvimento da UFOP. Disponível em: https://proplad.ufop.br/sites/default/files/relatorio_de_gestao_2023_06.05.pdf. Acesso em: 05 jun. 2024.

Bárbara Abreu Matos (barbara.matos@ufop.edu.br)
Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Urbana, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil.

Uso do Solo e Transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RODOVIA CUIABÁ-SANTARÉM (BR-163) NA TRANSFORMAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO NA AMAZÔNIA DE 1985 A 2023

Alan Monteiro Borges[1], **Nuria Perez Gallardo**[1], **Maurício Oliveira de Andrade**[2], **Ana Carla da Silva Monteiro**[2]
[1]Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, [2]Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este estudo analisa a dinâmica do uso do solo em 45 municípios atravessados pela BR-163 nos estados do Pará e Mato Grosso, entre 1985 e 2023, com foco nos percentuais de cobertura florestal e de área destinada à agropecuária. Utilizando análise descritiva, agrupamento de municípios por meio do algoritmo K-means e correlação de Spearman, o trabalho identifica padrões de transformação territorial ao longo do tempo. Os resultados mostram uma tendência clara de substituição de áreas de floresta por atividades agropecuárias, com mudanças significativas na distribuição dos municípios entre os grupos identificados. A forte correlação negativa entre as duas variáveis confirma esse padrão. Os achados evidenciam os impactos do corredor logístico da BR-163 na reconfiguração do uso da terra, destacando a necessidade de políticas públicas que conciliem desenvolvimento econômico com conservação ambiental na Amazônia.
Palavras-chave: BR-163, Uso do solo, Correlação, Agropecuária, Cobertura florestal.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A expansão da infraestrutura de transportes na Amazônia Legal tem exercido papel central na transformação do uso da terra, impactando diretamente a cobertura florestal e estimulando novas dinâmicas territoriais, especialmente ligadas à agropecuária (Soares-Filho *et al*., 2006; Laurance *et al*., 2014). Dentre os eixos mais relevantes, destaca-se a rodovia BR-163, que liga o município de Itiquira, no sul de Matto Grosso a Santarém, no Pará. Essa infraestrutura de transporte é uma das mais importantes do país e funciona como um corredor estratégico para o escoamento da produção agrícola do Centro-Oeste brasileiro aos mercados internacionais (Viana, 2021).

A pavimentação da BR-163 e a ampliação de seus acessos logísticos vêm promovendo mudanças socioeconômicas significativas nos municípios ao longo de sua extensão, mas também têm sido associadas à intensificação do desmatamento, à expansão da fronteira agropecuária e à conversão de grandes áreas de floresta em sistemas produtivos (Margulis, 2004; Nepstad *et al*., 2008). Tal cenário reforça a importância de compreender como essas transformações se distribuem espacialmente e ao longo do tempo, a fim de subsidiar políticas públicas voltadas à gestão sustentável desses territórios.

Este artigo tem como objetivo analisar a evolução do uso e cobertura da terra entre 1985 e 2023 em 45 municípios dos estados do Mato Grosso e Pará atravessados pela BR-163, com foco nas variáveis de percentual de área florestal e percentual de área agropecuária. A pesquisa busca identificar padrões de transformação territorial e possíveis correlações entre os dois usos do solo, além de agrupar os municípios conforme suas características dominantes, por meio de técnicas de agrupamento multivariado. Ao integrar análise descritiva, métodos estatísticos e técnicas de agrupamento, este estudo contribui para o debate sobre os impactos das infraestruturas de transportes no uso e cobertura do solo e na sustentabilidade dos territórios amazônicos. Os resultados podem apoiar decisões de planejamento territorial e ambiental, indicando a necessidade de estratégias que conciliem desenvolvimento econômico, conservação ambiental e inclusão social na região.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A expansão de infraestrutura de transportes em regiões tropicais tem sido historicamente associada à intensificação de processos de uso e ocupação do solo, em especial à conversão de florestas em áreas agropecuárias (Geist; Lambin, 2002; Laurance *et al*., 2014). No caso da Amazônia brasileira, rodovias como a BR-163 e outras infraestruturas têm desempenhado papel central na reorganização espacial de atividades produtivas e na abertura de novas frentes de desmatamento (Fearnside, 2017).

Estudos demonstram que a construção e pavimentação de rodovias estimulam a ocupação fundiária e o avanço da agropecuária, criando corredores de pressão ambiental (Soares-Filho *et al*., 2006). BR-163 rodovia se tornou importante no escoamento da produção agrícola do norte do Mato Grosso, especialmente soja e milho, para os portos de Miritituba (distrito pertencente ao município de Itaituba) e Santarém, no Pará (Viana, 2021), funcionando como eixo logístico estratégico e impactando diretamente os municípios que atravessa. A

facilidade de escoamento da produção promove não apenas o crescimento econômico, mas também contribui para a substituição de áreas de floresta por lavouras e pastagens (Graesser *et al*., 2015).

Nesse contexto, a análise de padrões territoriais do uso da terra torna-se essencial. A utilização de abordagens estatísticas como o agrupamento (*clustering)* de municípios com características semelhantes permite identificar territórios com dinâmicas ambientais e produtivas distintas, subsidiando estratégias específicas de gestão territorial. O método de agrupamento K-means, amplamente utilizado em estudos ambientais e geográficos (Lesschen et. al, 2005), possibilita classificar unidades territoriais com base em similaridades multivariadas, destacando áreas com maior pressão antrópica ou maior preservação. Esse algoritmo de particionamento é eficiente na classificação de unidades territoriais com base em variáveis contínuas, utilizando a distância Euclidiana para alocar observações em grupos que minimizam a variabilidade intra-cluster e maximizam a variabilidade entre clusters (Tan; Steinbach; Kumar, 2016). Proposto inicialmente por MacQueen (1967), o K-means requer que os dados sejam numéricos e previamente padronizados, sendo uma técnica robusta e interpretável, frequentemente adotada em análises exploratórias multivariadas aplicadas à sustentabilidade e ao planejamento regional.

Além disso, o uso de indicadores de correlação auxilia na compreensão das relações entre variáveis territoriais, como área florestal e agropecuária, identificando padrões de substituição e exclusão entre diferentes formas de uso do solo. Em estudos com dados de séries temporais extensas e variáveis não normalmente distribuídas, como os realizados na Amazônia, a correlação de Spearman é recomendada por sua robustez a desvios de normalidade (Gauthier, 2001). Assim, esta pesquisa dialoga com a literatura que associa infraestrutura de transporte ao uso da terra, aplicando ferramentas estatísticas consolidadas para revelar padrões territoriais e suas transformações ao longo de quase quatro décadas de dados.

3. ETAPAS METODOLÓGICAS

Este estudo adota uma abordagem quantitativa, explorando dados secundários sobre uso e cobertura do solo para 45 municípios localizados ao longo da BR-163, 38 municípios do Mato Grosso 7 do Pará, conforme apresentado na Figura 1. A extensão da rodovia analisada nesta pesquisa está dentro da Amazônia Legal e corresponde a 2.125 km. A análise cobre o período de 1985 a 2023, com foco em duas variáveis principais: percentual de área com cobertura florestal e percentual de área ocupada com agropecuária, conforme dados disponibilizados pela plataforma do projeto MapBiomas (2025). Os testes estatísticos e gráficos foram gerados no software R, com auxílio da interface RStudio. O RStudio é um software de acesso aberto para a linguagem de programação R, amplamente utilizado para análise de dados estatísticos e gráficos (Kopczewska, 2020).

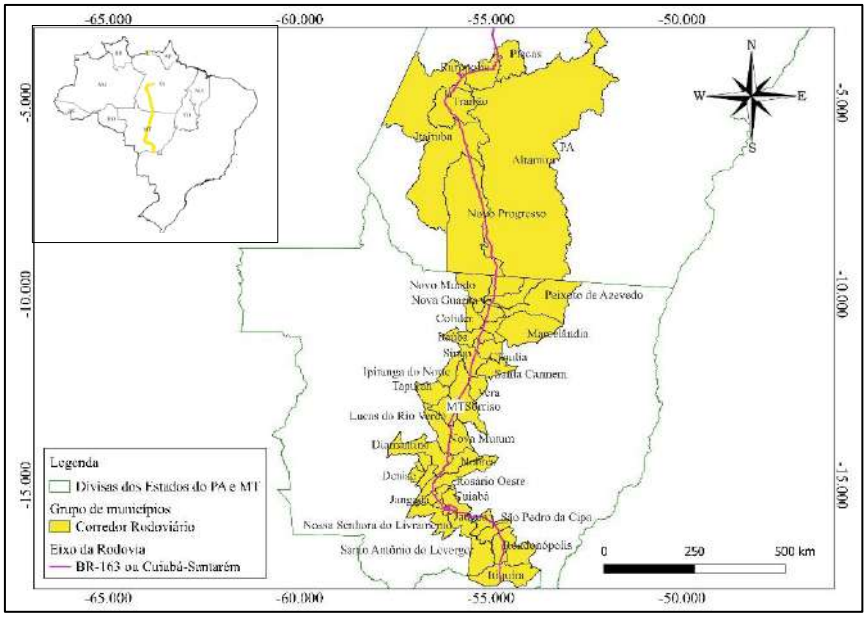


Figura 1: Munícios da área de estudo.

A primeira etapa metodológica consistiu na análise descritiva das variáveis selecionadas, com o objetivo de compreender padrões iniciais, tendências temporais e dispersão dos dados. Foram calculadas medidas de tendência central (média e mediana), variabilidade (desvio padrão) e distribuição (quartis e amplitude), seguindo recomendações metodológicas de autores como Hair *et al*. (2009) e Montgomery *et al*. (2021). Essa análise permitiu identificar a evolução histórica das transformações no uso do solo associadas à presença da infraestrutura de transporte. Na segunda etapa, foi aplicado o método de agrupamento K-means, com o propósito de classificar os municípios em perfis distintos segundo suas características de uso do solo ao longo do tempo. O algoritmo K-means é amplamente utilizado na literatura para segmentação de dados e identificação de padrões ocultos (MacQueen, 1967). A técnica consiste em particionar os dados em k grupos mutuamente exclusivos, minimizando a variabilidade intra-grupos e maximizando a variabilidade entre os grupos. Para definir o número ideal de *clusters,* foram considerados critérios como o método do cotovelo (*elbow method*) e a análise da variabilidade explicada (Rousseeuw, 1987).

Na etapa final, foi realizada uma análise de correlação não paramétrica, utilizando o coeficiente de Spearman (ρ), para avaliar a associação monotônica entre os percentuais de floresta e de agropecuária ao longo da série histórica. A escolha do teste de Spearman se justifica pela rejeição da normalidade das variáveis (verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk), característica frequente em dados com ampla variabilidade temporal (Astivia; Zumbo, 2017). A interpretação dos coeficientes seguiu a classificação sugerida por Mukaka (2012), em que valores de |ρ| superiores a 0,70 indicam correlação forte. Esse conjunto metodológico permite compreender não apenas os níveis absolutos das variáveis analisadas, mas também identificar padrões espaciais e relações de dependência entre o avanço da agropecuária e a redução da cobertura florestal na área de influência da BR-163.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados são apresentados em três etapas complementares: inicialmente, a análise descritiva das variáveis “percentual de área de floresta” e “percentual de área destinada à agropecuária” oferece uma visão geral da evolução dessas coberturas ao longo do período analisado; em seguida, aplica-se o método de agrupamento K-means para classificar os municípios segundo suas características predominantes de uso da terra, revelando perfis territoriais distintos; por fim, a análise de correlação busca compreender a relação entre os dois tipos de cobertura, avaliando a existência de padrões estatísticos de substituição ou coexistência.

4.1. Análise descritiva

A Tabela 1 apresenta o resumo estatístico das variáveis utilizadas na análise descritiva dos municípios atravessados pela rodovia, no período de 1985 a 2023. A série histórica contempla 39 anos consecutivos, permitindo a observação de tendências temporais. Em relação à área dos municípios, verifica-se uma grande disparidade territorial, com destaque para São Pedro da Cipa-MT, como o menor município da amostra (344,33 km²) e Altamira-PA, como o maior (159.533,3 km²), esse último sendo, inclusive, o maior município do Brasil e o terceiro maior do mundo em extensão territorial. Essa heterogeneidade de área reflete diretamente nas dinâmicas de uso do solo, uma vez que municípios extensos tendem a apresentar padrões distintos de ocupação e conservação, especialmente na Amazônia Legal.

Tabela 1: Resumo das análises descritivas.

Variáveis	Min.	1º Qu	Median	Mean	3º Qu	Max.
Área do município	344.3	2399.7	4327.4	10528.9	8263.4	159533.3
Percentual de floresta	16.56	40.21	59.81	59.65	78.79	98.84
Percentual de Agropecuária	0.30	15.86	34.32	36.12	56.52	79.43

Quanto ao percentual de cobertura florestal, observou-se uma média de 59,65% ao longo da série, com valores extremos indicando processos distintos de ocupação territorial. Em 1985, Novo Progresso-PA apresentava o maior percentual de floresta da amostra (98,84%), porém, em 2023, essa cobertura caiu para 80,61%, evidenciando uma redução significativa. Por outro lado, Nova Guarita-MT, em 2023, registrou o menor percentual de floresta (16,56%) e, simultaneamente, o maior percentual de área agropecuária (79,43%),

indicando uma clara substituição da vegetação nativa por uso agropecuário. Esse padrão é corroborado pela média de 36,12% de cobertura agropecuária para o conjunto dos municípios analisados. Altamira-PA, apesar de sua vasta extensão territorial, apresentava apenas 0,30% de área agropecuária em 1985, valor que cresceu para 7,20% em 2023, indicando a intensificação recente da atividade produtiva. Esses dados apontam para a consolidação de diferentes perfis de uso e ocupação do solo ao longo da BR-163, com forte influência das dinâmicas agropecuárias, especialmente no estado do Mato Grosso.

4.2. Aplicação do K-means *clustering* para 1985, 2004 e 2023

A aplicação do algoritmo K-means *clustering* para os anos de 1985, 2004 e 2023 permitiu identificar padrões de agrupamento dos municípios da BR-163, a partir das variáveis percentuais de floresta e agropecuária. Em 1985 (Figura 2), observou-se uma clara predominância do *Cluster* 3 (representado pela cor verde), composto majoritariamente por municípios com altos percentuais de cobertura florestal e baixos níveis de uso do solo para agropecuária. Esse grupo possui 22 municípios e é representativo de um território ainda amplamente preservado, com poucas intervenções antrópicas relacionadas à agricultura extensiva. O *Cluster* 2 (azul), por sua vez, congrega 9 municípios com baixos percentuais de floresta e altos percentuais de agropecuária, indicando que mesmo no início da série temporal já havia localidades com uso intensivo do solo para atividades produtivas. Já o *Cluster* 1 (vermelho), compreende uma condição intermediária, possui 14 municípios com níveis médios de cobertura florestal e agropecuária, possivelmente em transição para maior ocupação antrópica. Ao avançar para o ano de 2004 (Figura 3), percebe-se uma mudança significativa nos agrupamentos. O Cluster 3 (com 9 municípios), representando áreas de alta cobertura florestal, reduziu em tamanho, enquanto os clusters 1 (com 19 municípios) e 2 (com 17 *municípios*) ganharam maior expressão. Essa transição evidencia um processo de intensificação do uso do solo ao longo da BR-163, com expansão das atividades agropecuárias em detrimento da floresta. Esse padrão é condizente com a literatura que descreve a expansão da fronteira agrícola na Amazônia ao longo da década de 1990, intensificando-se nos anos 2000 com o avanço da criação de gado e de grãos (Margulis, 2004; Becker, 2005; Nepstad *et al*., 2008). Tais autores ressaltam o papel das políticas de incentivo à produção e da especulação fundiária nesse avanço sobre áreas de floresta.

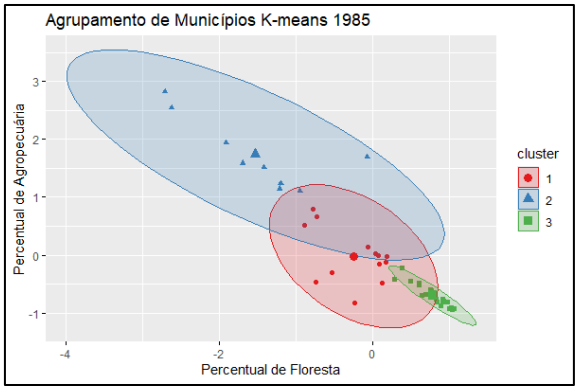


Figura 2: *Cluster* dos municípios em 1985.

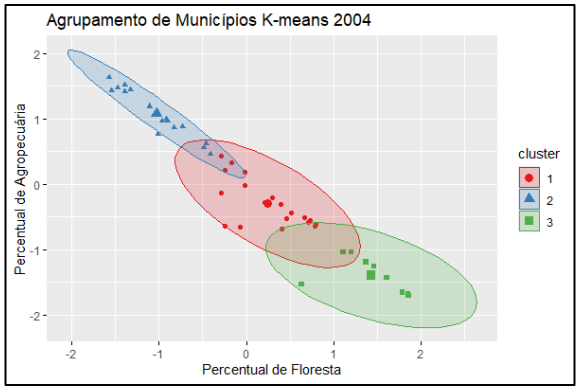


Figura 3: *Cluster* dos municípios em 2004.

Em 2023 (Figura 4), a tendência de avanço da agropecuária se intensifica ainda mais. O Cluster 2 torna-se o grupo dominante, composto por 19 municípios altamente agropecuários e com baixas taxas de cobertura florestal. O *Cluster* 1, por sua vez, agrupa 18 municípios em uma situação intermediária, enquanto o *Cluster* 3 é composto por um número reduzido de municípios, apenas 8 (Marcelândia e Peixoto de Azevedo no MT; Altamira, Itaituba, Novo Progresso, Rurópolis, Santarém e Trairão no PA) que conseguiram manter altas taxas de cobertura florestal. Esse cenário aponta para a consolidação do uso agropecuário do solo em grande parte da BR-163, especialmente nos municípios do Mato Grosso, como Colíder (74,96%), Denise (77,34%), Arenápolis (78,31%), Terra Nova do Norte (78,72%). Os agrupamentos, portanto, evidenciam a transformação da paisagem amazônica ao longo de quase quatro décadas, refletindo um processo contínuo de substituição da floresta por atividades agropecuárias, cuja intensificação tende a impactar diretamente a sustentabilidade dos territórios da região. Laurance *et al*. (2014) destacam que a intensificação das atividades agropecuárias, a exploração predatória de recursos naturais e a urbanização desordenada em países tropicais (América do Sul e África Subsaariana) têm gerado efeitos diretos sobre a fragmentação e a degradação dos ecossistemas.

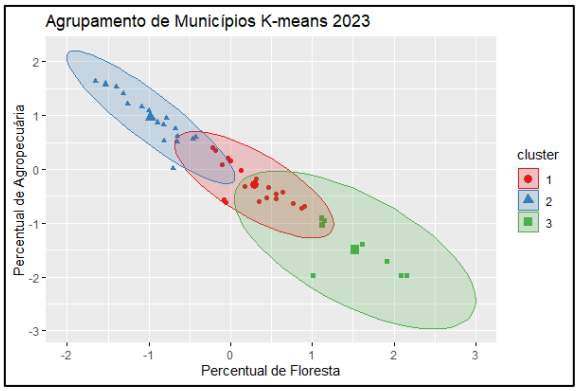


Figura 4: *Cluster* dos municípios em 2023.

4.3. Análise de correlação

A análise de correlação utilizando o teste de Spearman revelou uma correlação negativa muito forte entre o percentual de área de floresta e o percentual de área destinada à agropecuária nos municípios cortados pela BR-163, com um coeficiente de correlação $\rho = -0{,}967$ e p-valor $< 2{,}2e\text{-}16$. Esse resultado estatisticamente significativo indica que, à medida que aumenta a proporção do território municipal ocupada por atividades agropecuárias, há uma tendência clara de redução da cobertura florestal. A força dessa correlação evidencia um padrão consistente de substituição da vegetação nativa por áreas produtivas ao longo das últimas décadas, confirmando as observações anteriores dos agrupamentos e análises descritivas. Esse achado é coerente com diversos estudos que apontam a expansão agropecuária como principal vetor de desmatamento na Amazônia, especialmente em zonas de influência direta de eixos de transporte, como a BR-163 (Simon; Garagorry, 2005); Soares-Filho *et al*., 2006); Graesser *et al*., 2015).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam transformações expressivas na configuração do uso e cobertura do solo nos municípios atravessados pela BR-163, especialmente no Estado do Mato Grosso. A análise descritiva revelou um aumento significativo da ocupação agropecuária e uma consequente redução da cobertura florestal, ainda que com variações importantes entre os municípios. A aplicação do algoritmo K-means permitiu identificar três grupos distintos de municípios: aqueles com predomínio de cobertura florestal, os com predominância agropecuária e um grupo intermediário. A transição de muitos municípios dos *clusters* mais preservados para os mais antropizados ao longo das décadas sugere uma tendência consistente de substituição de vegetação nativa por atividades agropecuárias nessa região. Essa dinâmica foi confirmada pela forte correlação negativa entre percentual de floresta e agropecuária, indicando um padrão estrutural de uso intensivo do solo impulsionado pela expansão econômica, especialmente da agropecuária. Tais transformações não se restringem ao âmbito regional, mas reverberam em escalas mais amplas, uma vez que a Amazônia desempenha papel estratégico na regulação do clima e no ciclo hidrológico. A intensificação do desmatamento e da conversão florestal para usos agropecuários, portanto, não apenas pressiona ecossistemas locais e comunidades tradicionais, mas também amplia as vulnerabilidades climáticas, inserindo a Amazônia no centro do debate nacional e internacional sobre sustentabilidade e mudanças climáticas.

As evidências reforçam a hipótese de que a BR-163 desempenha papel estratégico na transformação territorial da região, ao facilitar o escoamento da produção e atrair investimentos que, por sua vez, pressionam os recursos naturais locais. Ainda que o setor agropecuário represente um motor de desenvolvimento econômico para muitos municípios da área de estudo, os dados apontam para a urgência de políticas públicas que conciliem crescimento produtivo com conservação ambiental. O uso de métodos quantitativos, como a análise de agrupamento e a correlação estatística, mostrou-se eficaz na identificação tendências e pode ser uma ferramenta importante para subsidiar decisões em planejamento territorial e gestão ambiental. Os resultados aqui apresentados reforçam a importância de estratégias diferenciadas por município, reconhecendo a diversidade de contextos socioambientais ao longo da BR-163 e a necessidade de uma governança territorial mais integrada e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTIVIA, O. L. O.; ZUMBO, B. D. Population models and simulation methods: The case of the Spearman rank

BECKER, B. K. Amazônia: geopolítica na virada do III milênio. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.
correlation. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, v. 70, n. 3, p. 347–367, nov. 2017.
GAUTHIER, T. D. Detecting trends using Spearman's rank correlation coefficient. Environmental Forensics, v. 2, n. 4, p. 359-362, 2001.
GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. BioScience, v. 52, n. 2, p. 143–150, 2002.
HAIR, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). Multivariate Data Analysis (7th ed.). Pearson.
KOPCZEWSKA, Katarzyna. Estatística espacial aplicada e econometria: análise de dados em R. Londres: Routledge, 2020.
LAURANCE, William F.; SAYER, Jeffrey; CASSMAN, Kenneth G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. Trends in ecology & evolution, v. 29, n. 2, p. 107-116, 2014.
LESSCHEN, Jan Peter; VERBURG, Peter H.; STAAL, Steven J. Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. Kenya: International Livestock Research Institute, 2005.
MACQUEEN, J. (1967) 'Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations', in 5th Berkeley
MAPBIOMAS – Coleção 9 da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 04 jun. 2025 através do link: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura.
MARGULIS, Sergio. Causes of deforestation of the Brazilian Amazon. World Bank Publications, 2004.
MONTGOMERY, Douglas C.; PECK, Elizabeth A.; VINING, G. Geoffrey. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons, 2021.
MUKAKA, Mavuto M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. Malawi medical journal, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.
NEPSTAD, Daniel C. et al. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences, v. 363, n. 1498, p. 1737-1746, 2008.
ROUSSEEUW, Peter J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of computational and applied mathematics, v. 20, p. 53-65, 1987.
SIMON, Marcelo Fragomeni; GARAGORRY, Fernando Luis. The expansion of agriculture in the Brazilian Amazon. Environmental Conservation, v. 32, n. 3, p. 203-212, 2005. DOI: https://doi.org/10.1017/S0376892905002201.
SOARES-FILHO, Britaldo S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. Nature, v. 440, n. 7083, p. 520-523, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nature04389. Acesso em: 16 maio 2025.
Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley, CA, USA: University of California Press, pp. 281-297.
TAN, Pang-Ning; STEINBACH, Michael; KUMAR, Vipin. Introduction to Data Mining. 2. ed. Harlow: Pearson, 2019.
VIANA, Antonia Ieda Delfino. BR 163 Cuiabá-Santarém: do Projeto de Integração Nacional aos desafios do Desenvolvimento Regional. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa (Portugal).

Alan Monteiro Borges (alan@unifesspa.edu.br)
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia Civil, Endereço: Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, S/N, Nova Marabá, Marabá, PA, Brasil.
Nuria Perez Gallardo (nuria_perez@unifesspa.edu.br)
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia Civil, Endereço: Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, S/N, Nova Marabá, Marabá, PA, Brasil.
Maurício Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil.
Ana Carla da Silva Monteiro (carla.monteiro@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia Civil, Endereço: Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil.

AVALIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS FUTURAS DO MODELO *MARS* PORTO ALEGRE COM BASE NOS DADOS DO IBGE 2022

Sabrina Priebe Zmovirzynski, Andrea Holz Pfützenreuter, Renata Cavion, Simone Becker Lopes
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
Este estudo avaliou, em caráter ex-post, as projeções do modelo MARS POA 2003 frente aos dados do Censo 2022, verificando sua eficácia como ferramenta de apoio ao planejamento urbano e da mobilidade em Porto Alegre/RS. A análise utilizou métodos estatísticos e espaciais para comparar estimativas de população e domicílios, revelando correlações relevantes ($R^2 > 0,73$), mas também discrepâncias em áreas de expansão urbana recente. Conclui-se que o modelo possui potencial para orientar políticas integradas de transporte e uso do solo, porém demanda recalibração com dados atualizados, incluindo a pesquisa O-D 2023 e os impactos de eventos recentes, como a pandemia de COVID-19 e as enchentes de 2024.

1. INTRODUÇÃO

A rápida transformação das cidades brasileiras tem intensificado os desafios do planejamento urbano, exigindo novas ferramentas para interpretar, prever e planejar a cidade. Em Porto Alegre, questões como uso do solo, mobilidade e crescimento desordenado tornam essa necessidade ainda mais evidente.

Entre essas ferramentas, destacam-se os modelos de interação entre uso do solo e transportes *(LUTI – Land Use and Transport Interaction),* que simulam os efeitos mútuos entre decisões de moradia, emprego e deslocamento. Utilizados em diversas partes do mundo, esses modelos apoiam o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes ao simular os efeitos de intervenções na dinâmica da cidade (Wegener, 2004; Waddell, 2002). Dentre os modelos LUTI, o *Metropolitan Activity Relocation Simulator (MARS)*, desenvolvido por Pfaffenbichler (2003) na Universidade de Viena, se destaca por sua abordagem dinâmica e integrada. Baseado em submodelos de transportes e de uso do solo implementados no software VENSIM®, o MARS simula a reorganização das atividades urbanas ao longo do tempo em resposta a alterações na infraestrutura ou em políticas públicas, ano a ano, por um período de 30 anos. O modelo MARS é uma ferramenta útil que permite aos planejadores testar diferentes combinações de políticas e compreender melhor os efeitos sistêmicos sobre transporte e uso do solo, inclusive considerando sinergias, contradições e efeitos ao longo do tempo (Lopes, 2010).

No contexto brasileiro, o modelo foi aplicado por Lopes (2010) na capital gaúcha, demonstrando sua viabilidade e relevância para o planejamento estratégico urbano. No entanto, a aplicação ficou limitada pela escassez de dados históricos anteriores para calibrar o modelo para Porto Alegre. Foi ajustado um modelo MARS com ano base 2003 (MARS POA 2003), baseado no Censo Demográfico de 2000 e na Pesquisa Origem-Destino de 2003. Porém, para completar o processo, conforme proposto por Pfaffenbichler (2003), ficou faltando, na época, a validação do modelo para previsões futuras. Mais recentemente, Fontana (2021) propôs uma metodologia em blocos para avaliar as estimativas futuras do MARS POA 2003 com base no Censo de 2010, estruturando uma abordagem sistemática para compatibilização de dados, tratamento geoespacial e validação estatística.

Com a divulgação dos dados preliminares do Censo Demográfico 2022 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), surge a oportunidade de revisar essas projeções, avaliando as projeções do modelo com base em uma nova realidade urbana. Essa avalição é fundamental não apenas para dar suporte ao início do processo de calibração dos submodelos de uso do solo do MARS POA 2003, como, também, para testar sua capacidade de estimar adequadamente a distribuição da população e dos domicílios na cidade de Porto Alegre/RS.

Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar as estimativas futuras geradas pelo modelo MARS para a cidade de Porto Alegre, utilizando os dados do Censo 2022 como base de comparação. A calibração com base em dados atuais pode reduzir incertezas do modelo e fortalecer seu uso como ferramenta de apoio à tomada de decisão, especialmente envolvendo políticas integradas de transporte e uso do solo. O uso da análise de regressão entre dados observados e estimados é essencial para validar o ajuste do MARS, garantindo que os coeficientes e interceptos reflitam adequadamente as interações entre transporte

e uso do solo, conforme discutido por Lopes (2010). Busca-se verificar o grau de coerência entre as projeções do modelo e os dados observados e, a partir dessa análise, espera-se contribuir para o aprimoramento do modelo e ampliar seu uso em contextos urbanos brasileiros.

2. METODOLOGIA

O estudo adota uma abordagem quantitativa, voltada a avaliar a aderência das projeções geradas pelo modelo MARS POA 2003 em relação aos dados observados no Censo Demográfico de 2022. Foram priorizados os dados compatíveis com as informações já disponibilizadas pelo IBGE, em especial a população residente e o número de domicílios por setores censitários. Dessa forma, a análise concentrou-se na comparação desses dados para o ano de 2022, considerando a distribuição espacial da população e dos domicílios no município de Porto Alegre. Para a realização do estudo, foram utilizadas as estimativas extraídas do modelo MARS por meio do software Vensim®. Os dados foram filtrados para o ano 19, que corresponde a 2022. As variáveis exportadas incluíram *Residents J[ai]*, representando a população por zona de tráfego, e *HU occupied J[ai],* referente ao número de domicílios ocupados por zona de tráfego. Paralelamente, foram obtidos os dados oficiais do Censo 2022, organizados por setores censitários.

Para realizar a análise comparativa, foi necessário garantir que os dados estivessem no mesmo nível de agregação espacial. Enquanto os dados do Censo Demográfico 2022, disponibilizados pelo IBGE, são apresentados por setores censitários, as estimativas geradas pelo modelo MARS POA 2003 referem-se a zonas de tráfego da Pesquisa O-D de 2003. Diante dessa diferença, procedeu-se a uma etapa de compatibilização geográfica por meio do software QGIS. O método adotado baseou-se na proporção de áreas de interseção entre as 96 zonas de tráfego e os setores censitários, conforme orientações propostas por Fontana (2021), possibilitando a redistribuição adequada dos dados. Após o tratamento e a compatibilização das bases, foi construída uma planilha comparativa no Excel, contendo, para cada zona de tráfego, os valores estimados pelo MARS e os valores observados no Censo 2022, tanto para a população quanto para os domicílios. Essa planilha serviu de base para duas etapas de análise:

- Análise estatística, utilizando regressão linear simples, foi possível verificar o grau de correlação entre os valores estimados e os observados, com cálculo do coeficiente de determinação (R^2) como indicador de aderência dos resultados;
- Análise espacial, por meio da elaboração de mapas temáticos graduados no QGIS, permitindo visualizar a distribuição espacial das variáveis e dos erros relativos entre projeção e dado real.

A regressão linear foi realizada utilizando a ferramenta de análise de dados do Microsoft Excel e a planilha comparativa previamente elaborada. Inicialmente, comparou-se a variável *Residents* estimada pelo modelo MARS com a variável V0001 do Censo 2022, correspondente à população residente. Em seguida, aplicou-se o mesmo procedimento para a variável *HU occupied*, relativa ao número de domicílios, em comparação com a variável V0007 do Censo.

Zonas de tráfego	População		Domicílios	
	Mars Residents	População (V0001)	Mars HU occupied	Domicílios (V0007)
1	603,71875	439,696	603,71875	289,247
2	5324,764648	4516,789	4119,891113	2495,326
3	3060,671387	3096,871	2067,29541	1693,716
4	12602,75391	10908,696	9901,636719	6391,877
5	17725,28711	12598,893	11234,33691	7486,124
6	45,00524521	1189,728	45,00524521	388,254
7	5548,998047	4588,03	5155,198242	2472,284
8	7160,522949	5625,12	4302,123535	3251,367
9	10,99999809	819,134	10,99999809	443,065
10	10523,62109	8602,075	5576,375488	5140,356

Figura 1: Planilha de dados para comparação.

Para a análise espacial, foram elaborados mapas graduados no QGIS para representar a distribuição de cada variável. Foi realizada a criação de uma camada correspondente às zonas de tráfego, à qual se associaram os valores estimados e observados obtidos na planilha. Utilizando os recursos de simbologia do software, construíram-se mapas temáticos para cada variável, totalizando quatro mapas comparativos. Além disso, foram produzidos mapas de erros relativos, calculados a partir do percentual de diferença entre os valores estimados e os valores observados em cada zona de tráfego. Esses mapas possibilitaram identificar, de forma

espacializada, as áreas com maiores distorções entre as projeções do modelo e os dados do Censo 2022.

3. RESULTADOS

A partir da comparação entre os dados estimados pelo modelo MARS POA 2003 para o ano de 2022 e os dados observados pelo Censo Demográfico, foi possível realizar uma análise quantitativa e espacial da acurácia das estimativas. Após o tratamento dos dados conforme descrito na seção de metodologia, essa comparação foi conduzida por meio de dois métodos complementares: (i) análise estatística, utilizando regressão linear, e (ii) análise espacial, com mapas de distribuição das variáveis por zona de tráfego.

Na análise estatística, os resultados da regressão linear revelaram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8007 para a variável População e de 0,7395 para a variável Domicílios. Esses valores indicam uma boa correlação entre os dados estimados e os observados, especialmente para a população. No entanto, por estarem abaixo do ideal (R^2 próximo de 1,0), os resultados também sugerem a existência de discrepâncias relevantes em algumas zonas. A Figura 2 a seguir ilustra os dois gráficos de regressão linear.

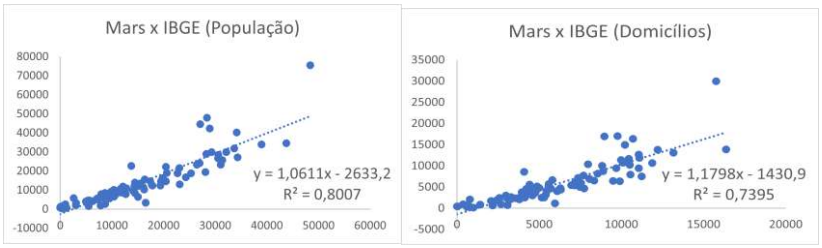


Figura 2: Gráficos de regressão linear.

A Figura 3 apresenta a comparação espacial da variável População por zona de tráfego em Porto Alegre. Observa-se que, apesar de uma correspondência geral satisfatória, algumas áreas revelam diferenças expressivas entre os dados estimados (à esquerda) e os valores observados (à direita).

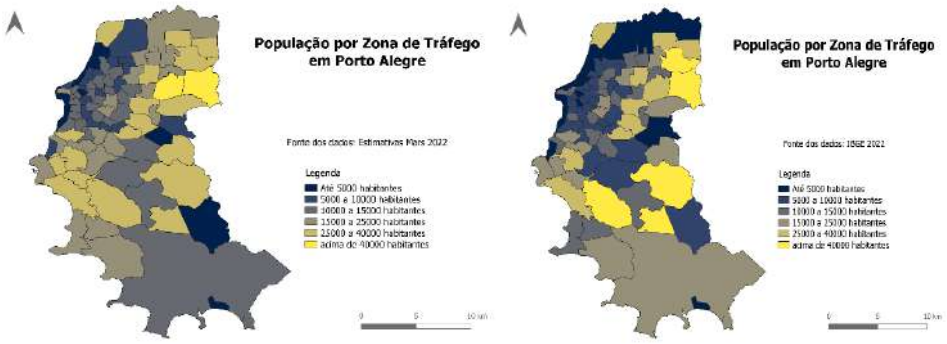


Figura 3: Comparação entre mapas da variável População.

A variável Domicílios apresentou discrepâncias ainda mais acentuadas. A partir da visualização dos mapas comparativos, nota-se que os dados estimados pelo MARS POA 2003 para o ano de 2022 divergem significativamente dos dados observados pelo Censo, especialmente em áreas com crescimento urbano recente ou transformações territoriais não capturadas adequadamente pelo modelo.

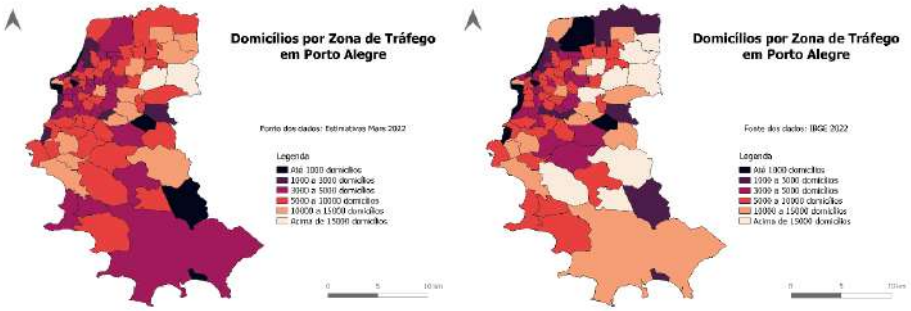


Figura 4: Comparação entre mapas da variável Domicílios.

Para aprofundar essa análise, foi calculada e representada graficamente a distribuição espacial dos erros percentuais entre os valores estimados e observados. A Figura 5 exibe dois mapas: à esquerda, o mapa de erro da variável População, e à direita, o da variável Domicílios. As áreas em vermelho indicam subestimação pelo modelo (valores observados maiores que os estimados), enquanto as áreas em azul representam superestimação (valores estimados superiores aos observados).

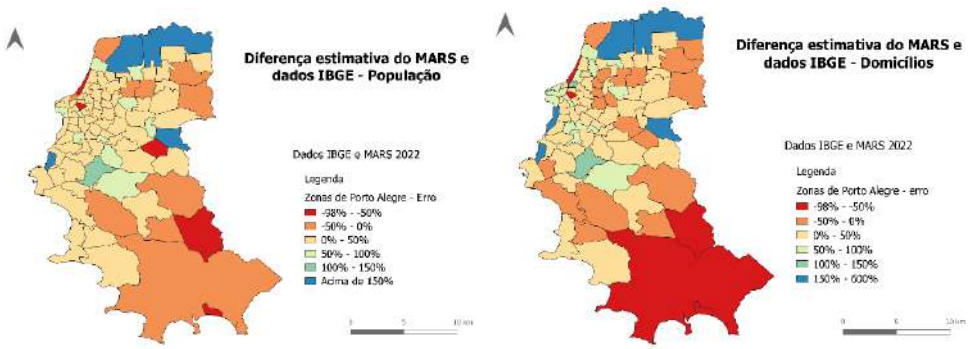


Figura 5: Mapas distribuição espacial dos erros variável População (esquerda) e Domicílios (direita).

No caso da população, identificam-se cinco zonas com distorções significativas, onde o modelo MARS subestimou consideravelmente os dados recenseados. Por outro lado, algumas zonas em azul mostram superestimação relevante. A variável domicílios segue padrão semelhante, com destaque para quatro zonas em que o número de domicílios observados foi substancialmente maior do que o estimado.

Esses resultados indicam a necessidade de revisar as políticas inseridas no MARS POA 2003, que, a época, foram consideradas as propostas nos planos estruturais. No entanto, muitas alterações podem ter ocorrido desde 2003 e inclusive a pandemia pode ter impactado. A incorporação de dados mais atualizados e refinados poderá contribuir para uma melhor calibração do modelo, tornando-o mais sensível às dinâmicas territoriais em curso na cidade de Porto Alegre.

4. CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa confirmam o potencial do modelo MARS como ferramenta estratégica de apoio ao planejamento urbano em Porto Alegre, em linha com estudos anteriores (Fontana, 2021; Lopes, 2010). A comparação com o Censo de 2022 evidenciou correlações relevantes entre as estimativas e os dados observados, mas também revelou discrepâncias significativas em áreas de expansão urbana recente, refletindo a necessidade de calibração contínua do modelo diante das rápidas transformações territoriais.

É importante destacar que, no momento do ajuste do MARS POA 2003, não havia dados históricos disponíveis para a realização de uma análise ex-post. Por essa razão, recorreu-se a uma análise ex-ante, complementada por meta-análises comparativas com estudos semelhantes (Lopes, 2010). Vinte anos depois, a divulgação do Censo 2022 possibilitou, pela primeira vez, a realização dessa avaliação ex-post, permitindo confrontar as projeções originais com a realidade observada. Nesse sentido, este estudo deve ser compreendido como uma análise exploratória inicial de verificação de conformidade dos dados, e não como uma validação definitiva, visto que a calibração mais precisa só poderá ser realizada agora, incorporando as transformações urbanas efetivamente ocorridas ao longo das últimas duas décadas.

Os mapas de distribuição espacial dos erros indicaram sub-representação ou exclusão de certas áreas, possivelmente decorrentes da expansão urbana desordenada e da criação de novas zonas residenciais e comerciais sem mapeamento adequado. Além disso, eventos recentes, como a pandemia de COVID-19 e as enchentes de 2024, alteraram padrões de deslocamento, ocupação do solo e atividades econômicas, reforçando a importância da atualização periódica dos insumos do MARS. A recente disponibilização da pesquisa O-D 2023 representa uma oportunidade para calibrar o modelo de forma mais robusta, incorporando as novas dinâmicas urbanas pós-pandemia e pós-desastres climáticos.

O estudo também corrobora a perspectiva de Pfaffenbichler (2003) sobre a natureza dinâmica e adaptável do

MARS e destaca, à semelhança de Lara e Silva (2024), que a resiliência da mobilidade urbana depende da integração entre subsistemas sociais, institucionais e de transporte. Dessa forma, futuras pesquisas devem reforçar o papel do MARS como ferramenta estratégica de apoio ao planejamento urbano, avaliando suas estimativas com base na pesquisa O-D 2023 para permitir uma calibração mais precisa e representativa da realidade atual. Recomenda-se ainda a incorporação de variáveis socioeconômicas e ambientais sensíveis a eventos extremos, a revisão da divisão das zonas para contemplar áreas em expansão ou recentemente transformadas, e o desenvolvimento de simulações voltadas à resiliência urbana, com foco na mitigação de impactos e na adaptação às mudanças climáticas.

Em síntese, a avaliação do MARS deve considerar não apenas a aderência estatística, mas também sua capacidade de orientar políticas públicas integradas de transporte e uso do solo. As discrepâncias identificadas possuem implicações práticas para a alocação de infraestrutura, oferta de transporte coletivo e organização territorial. Comparações com estudos nacionais e internacionais (Wegener, 2004; Waddell, 2002) indicam que desafios em áreas de expansão recente são recorrentes, reforçando a necessidade de modelos urbanos recalibrados e alinhados a políticas públicas sustentáveis e socialmente equitativas.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional, por meio da concessão de bolsa de Iniciação Científica, a qual foi essencial para a viabilização e o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fontana, A. V. (2021) *Avaliação das estimativas futuras de um modelo Luti Dinâmico: estudo de caso para o modelo MARS Porto Alegre*. Engenharia de Transportes e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/223282. (acesso em 03/07/2024).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico 2022.html?edicao=39499&t=resultados. (acesso em 03/05/2025).

Lara, Daniela Vanessa Rodriguez; Silva, Antônio Nélson Rodrigues da. RESILIENCE OF URBAN MOBILITY IN THE FACE OF ANTHROPOGENIC THREATS: A QUALITATIVE SYSTEM DYNAMICS APPROACH. In: ANAIS DO 38º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos..., Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/resilience-of-urban-mobility-in-the-face-of-anthropogenic-threats-a-qualitative?lang=pt-br> Acesso em: 15 Set. 2025.

Lopes, S. B. (2010) *Uma ferramenta para planejamento da mobilidade sustentável com base em modelo de uso do solo e transportes.* Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. https://doi.org/10.11606/T.18.2010.tde-13122010-161312.

PFAFFENBICHLER, P. *The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)*; development, testing and application. 2003. Tese de Doutorado.

Porto Alegre. Empresa Pública de Transportes e Circulação. Entrevista Domiciliar: Pesquisa de Origem e Destino para Porto Alegre. Porto Alegre: EPTC, 2004.

Porto Alegre. Empresa Pública de Transportes e Circulação. Entrevista Domiciliar: Pesquisa de Origem e Destino para Porto Alegre. Porto Alegre: EPTC, 2023.

Waddell, P. (2002). *UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning.* Journal of the American Planning Association, 68(3), 297–314.

Wegener, M. (2004). *Overview of land use transport models. In Handbook of Transport Geography and Spatial Systems.* Elsevier.

Sabrina Priebe Zmovirzynski (sabrina.priebe@grad.ufsc.br)
Andrea Holz Pfützenreuter (andrea.hp@ufsc.br)
Renata Cavion (r.cavion@ufsc.br)
Simone Becker Lopes (simone.lopes@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Departamento de Engenharias da Mobilidade. Estr. Dona Francisca, 8300 - Bloco U - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-600, Brasil

BAYESIAN MODELING OF AIRCRAFT NOISE COMPLAINTS AROUND CONGONHAS AIRPORT

Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira[1], **Renata Cavion**[2]
[1]Universidade Federal de Goiás (UFG), [2]Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

ABSTRACT
This study aims to model the occurrence of aircraft noise complaints around Congonhas Airport (São Paulo, Brazil), considering operational, urban, and environmental factors. A Bayesian Network was developed using representative variables such as runway distance, flight paths, land use, building height, population density, and tree coverage. The dataset was based on the geospatial analysis of 303 real complaint records. Noise contours were weighted according to their sound intensity (dB) and linked to conditional probabilities derived from empirical frequencies. The results show that the accumulation of high-impact factors significantly increases the likelihood of noise disturbance, confirming the model's predictive value. The proposed approach enables the simulation of future scenarios and supports decision-making in urban planning and airport management, particularly regarding noise mitigation strategies.

1. INTRODUCTION

Aircraft noise exposure is one of the main negative externalities of airport operations, directly affecting the quality of life of populations living near airports. In densely urbanized areas such as the surroundings of Congonhas Airport (CGH) in São Paulo, the conflict between airport infrastructure and the urban fabric intensifies as air traffic growth coexists with predominantly residential zones.

Although regulations such as Brazil's RBAC No. 161 (ANAC, 2021; INFRAERO, 2022) define noise zoning plans based on standardized metrics like the Day-Night Level (DNL), empirical evidence shows that a significant portion of complaints arise from areas outside the officially delimited noise contours (Oliveira, 2024; Southgate, 2007). This misalignment reveals the limitations of current models in capturing the social perception of noise and highlights the need for more integrated approaches.

Noise annoyance is shaped not only by acoustic indicators but also by environmental, urban, social, and perceptual variables. As emphasized by Schultz (1978), Kang (2007), Fidell and Mestre (2020), and Flores et al. (2018), the perception of discomfort is modulated by elements such as population density, land use, vegetation, building height, and runway proximity, while relevant for low-frequency urban noise, offers limited mitigation for aircraft noise, especially in dense city contexts (Zaporozhets et al., 2011).

Complaints recorded by airport authorities serve as a measurable indicator of community discomfort, offering essential input for spatial noise impact assessment. Recent studies (Oliveira, 2024; Fidell and Mestre, 2020) confirm that noise complaints are highly concentrated along flight corridors, but often occur in zones considered "acceptable" by current zoning models. In 2024, Congonhas Airport (SBSP) handled over 23.1 million passengers, ranking second in Brazil (Instituto Aviação, 2025), and reinforcing the importance of responsive planning tools. This study uses a Bayesian Network to model the probability of noise complaints around Congonhas Airport based on 303 georeferenced real complaint records. By integrating operational, urban, and environmental spatial variables, the model enables scenario simulations and supports public policy design in urban planning and airport management.

2. THEORETICAL FRAMEWORK

Aircraft noise is defined as an undesirable environmental sound occurring in areas surrounding airports, generated primarily by aircraft operations during takeoff and landing. Its impact has intensified due to increasing air traffic and urban expansion near airports, resulting in operational constraints and community dissatisfaction (Revoredo et al., 2013).

Several parameters influence noise propagation and perception. Operational factors include aircraft types, operation schedules, flight paths, and atmospheric conditions. At Congonhas Airport, for instance, 83.1% of complaints coincide with flight corridors, confirming the significance of route layout as highlighted by Boucsein et al. (2017) and Infraero (2023). While acoustic intensity typically decreases with distance, complaints were most frequent within 2 to 4 km from the runway—suggesting that distance alone does not account for annoyance patterns.

Urban planning variables such as land use, building height, and population density critically affect both sound propagation and its perceived disturbance. According to Fidell and Mestre (2020) and Flores et al. (2018), residential zones, particularly medium- to high-density ones, are more prone to complaints. In the case of CGH, over 87% of records originated from residential areas. Although taller buildings may influence wave reflection and shadowing, the data showed modest effects from verticality, especially in higher-income zones. Environmental variables also play a role. Population density impacts the absolute number of complaints, yet interestingly, records at CGH were more concentrated in low-density zones (≤ 20 inhab/km²), which may reflect heightened individual perception or socio-cultural responsiveness (Elliff, 2021). Vegetation, although generally mitigating for urban noise, has limited effectiveness for high-frequency aircraft sound (Zaporozhets et al., 2011).

Given the complexity of these interactions, computational models are needed to handle multivariate uncertainty. Bayesian Networks (BNs) are suitable for this task, allowing for probabilistic reasoning and causal representation. As emphasized by López Puga (2013), BNs can integrate both empirical and expert-driven data. Recent applications in spatial noise modeling have shown promising results in combining vector data, zoning maps, and perceptual data for localized impact assessment (Boucsein et al., 2017; Duarte Filho et al., 2019; Cavion & Bandeira, 2024). This study adopts a structured BN model categorized into three domains—operational, urban, and environmental—each influencing complaint probability. This framework supports both diagnostic interpretation and predictive simulation.

3. PROCEDURAL METHODS

Bayesian Networks (BNs) are graphical models that describe how variables are conditionally dependent using a directed acyclic graph. Each variable is represented as a node, and directed links between nodes express causal or statistical relationships. The joint probability of all variables is given by Eq. (1), where $P_a(X_1)$ represents the parent nodes of X_1.

$$PX_1, X_2, \ldots, X_n = \prod_{i=1}^{n} PX_1\left(P_a\left(X_1\right)\right) \quad (1)$$

If a node has no parents, its probability is unconditional. Each node's conditional probabilities are defined in a Conditional Probability Table (CPT). These tables define the probability of each state given every possible configuration of its parent nodes.

3.1 Data Collection and Processing

This study is based on 303 aircraft noise complaints registered in the vicinity of Congonhas Airport (SBSP) between 2021 and 2023. The records were obtained from official datasets maintained by the airport's environmental management team (Aena, 2023) and supported by planning documents such as the PEZR SBSP technical report (Infraero, 2019). The complaint locations were georeferenced in QGIS 3.28, using the SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S coordinate system. Each record was processed through overlay analysis combining multiple geospatial layers from verified institutional sources.

3.2 Definition of Nodes and States

Table 1 presents the nodes used in the Bayesian Network, including their respective states, marginal probabilities based on the empirical dataset of 303 complaints, and the data sources used for classification. Spatial processing was performed in QGIS 3.28 using the SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S coordinate system. The complaint points were analyzed through overlay techniques combining multiple layers. A detailed spatial analysis of each factor is available in Cavion and Bandeira (2024).

Table 1: Characterization of nodes, states, and data sources used in the Bayesian Network.

Node	States with Probabilities (%)	Data Source
Flight_Paths	Inside paths (83.1); Outside paths (16.9)	ANAC; DECEA; INFRAERO (2011); Cavion and Bandeira (2024)
Runway_Distance	≤ 2 km (10.5); 2–4 km (34.3); 4–6 km (30.7); > 6 km (24.5)	Infraero (2022); QGIS-based Euclidean distance analysis

Node	States with Probabilities (%)	Data Source
Land_Use	Residential (79.2); Commercial (16.2); Others (4.6)	Geosampa (2017); Prefeitura de São Paulo (2014); ANAC (2021) – RBAC 161
Building_Height	≤ 20 m (48.1); > 20 m (51.9)	Geosampa (2017) – 2.5D models; Technical Note ANAC; DECEA; INFRAERO (2011)
Population_Density	≤ 20 inhab/km² (70.0); > 20 inhab/km² (30.0)	IBGE (2022); QGIS-based census sector aggregation
Tree_Density	≤ 19 trees/ha (74.2); ≥ 30 (25.8)	Geosampa (2017); PMSP (2023); Kernel Density Estimation; ANAC (2021) – RBAC 161
PEZR_Zones	Inside Curves (30.0); Outside Curves (70.0)	Infraero (2022); ANAC (2021); PEZR SBSP
Noise_65dB	Present (96), Absent (4.00)	Infraero (2022); PEZR SBSP
Noise_70dB	Present (98), Absent (2.00)	Infraero (2022); PEZR SBSP
Noise_75dB	Present (99.5), Absent (0.05)	Infraero (2022); PEZR SBSP

Probability was derived by calculating the absolute frequency of each state relative to the total number of records (n = 303), using the empirical probability formula $P(E_i) = \frac{n_i}{N}$. Where: $P(E_i)$ is the empirical probability of state E_i; n_i is the number of occurrences of state E_i; N is the total number of observed records.

3.3 Construction of the CPTs

The Conditional Probability Tables (CPTs) that define the Bayesian Network structure were built through a step-by-step procedure, integrating spatial logic, empirical data, and interpretative modeling. This process ensured that each node reflected both observed phenomena and theoretical principles governing noise exposure. Below is the structured methodology:

- **Step 1 – Empirical classification of states and marginal distributions:** All variables were defined as discrete categorical nodes, with state probabilities derived from the complaint dataset and spatial overlays. For example, 83.1% of complaints occurred within flight paths, and 34.3% were located 2–4 km from the runway. Land use, building height, population, and tree density were similarly categorized using geoprocessed urban and environmental data (see Table 1).

- **Step 2 – Construction of intermediate nodes (Operational, Urban, Environmental):** Three domain-specific nodes were constructed: Operational_Exposure_Level (Flight_Paths × Runway_Distance) assigned 70% HighImpact to *InsidePaths + 2–4 km*; Urban_Sensitivity_Level (Land_Use × Building_Height) assigned 90% HighImpact to residential zones with tall buildings; Environmental_Modulation_Level (Tree_Density × Population_Density) assigned 85% HighImpact to areas with low vegetation and sparse population. All CPTs for these nodes were interpolated proportionally and normalized.

- **Step 3 – Estimation of acoustic zoning (PEZR_Zone):** The PEZR_Zone node integrates the three intermediate nodes to estimate whether a location falls *InsidePEZR* or *OutsidePEZR*. A weighted logic was used: Operational (3), Urban (2), Environmental (1). Full HighImpact convergence led to 90% InsidePEZR; mixed inputs were interpolated.

- **Step 4 – Linking to noise contour bands (Noise_65dB, Noise_70dB, Noise_75dB):** Noise bands (65 dB, 70 dB, 75 dB) depend only on PEZR_Zone. If *InsidePEZR*, presence probabilities were 96%, 98%, and 99.5%, respectively. These values reflect the official zoning maps and empirical distributions; values dropped sharply when *OutsidePEZR*.

- **Step 5 – Final node construction (Noise_Impact), validation and normalization of CPTs:** Node *Noise_Impact* aggregates the influence of the three acoustic thresholds (65, 70 and 75 dB) and classifies the resulting noise exposure as either High or Low. The conditional probability logic follows an ordinal principle: when all three bands are present, the probability of *High* impact is set to 95%; when only 65 dB is present, *High* impact is limited to 30%, reflecting lower perceptual annoyance; if none of the curves are present, the impact is assumed to be *Low* with 100% certainty. All CPTs were normalized and tested in Netica®, ensuring inference consistency with complaint patterns.

4. RESULTS AND DISCUSS

4.1 Global Results of the Bayesian Network

This distribution reflects the structural sensitivity of the model, with the majority of complaints aligned to areas classified as *Inside the PEZR* and exposed to overlapping noise contours (65 dB, 70 dB, 75 dB). The node *PEZR_Zone* assigned 55.3% of the sample to within the Protection Zone, consistent with official zoning maps (PEZR SBSP, 2019). The presence of noise curves was substantial: 65 dB = 53.1%, 70 dB = 54.2%, and 75 dB = 55.0%, reinforcing the spatial correlation between complaint density and high-intensity noise. The final Bayesian Network architecture (Fig. 1) shows the probabilistic distribution of noise impact without introducing any external evidence.

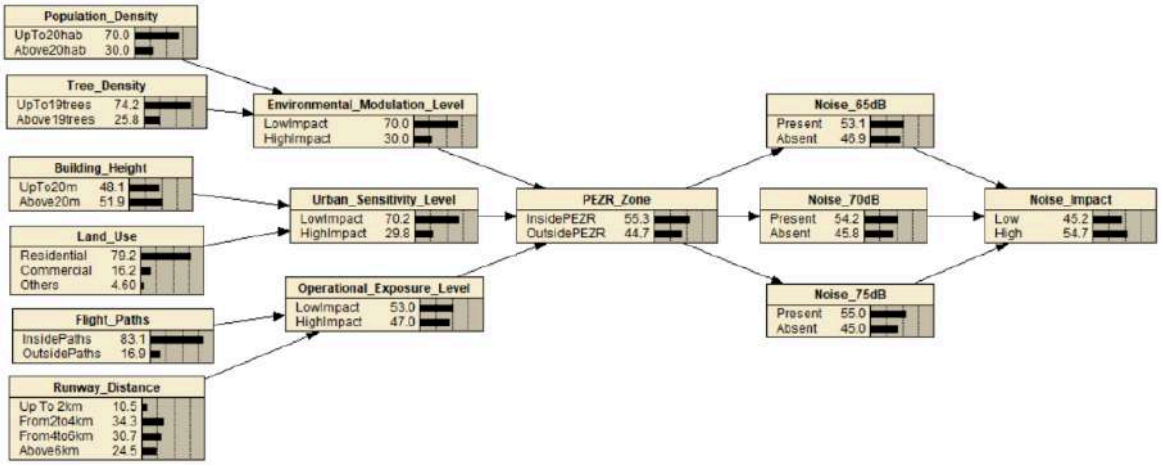


Figure 1: Final Structure of the Bayesian Network for Aircraft Noise Impact Estimation at Congonhas Airport.

The configuration of intermediate nodes confirms that combinations such as flight corridor proximity, residential use, and low vegetative cover tend to amplify perceived exposure. These findings validate the model's ability to replicate spatial noise annoyance patterns in the Congonhas region.

4.2 Scenario-Based Inference: Strategic Simulations

To assess the predictive performance of the Bayesian Network beyond the baseline scenario, three strategic simulation scenarios were defined. Each represents a realistic spatial-operational configuration relevant to key stakeholders, allowing the model to test hypotheses on exposure, zoning, and mitigation. Table 2 summarizes the evidence inputs, objectives, and stakeholder focus for each scenario (Table 3).

Table 2: Definition of strategic scenarios for Bayesian simulation.

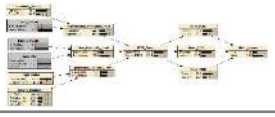
Scenario	RB Model	Key Evidence Inserted	Stakeholder	Objective of Simulation
1 Maximum Risk		Flight_Paths = InsidePaths, Runway_Distance = From2to4km, Land_Use = Residential, Population_Density = UpTo20hab, Tree_Density = UpTo19trees	DECEA, ANAC, airport operator	Quantify maximum exposure risk in densely flown corridor with low environmental absorption.
2 Urban Mitigation Zone		Land_Use = Commercial, Building_Height = Above20m, Tree_Density = Above19trees	Local government, real estate	Evaluate whether vertical urbanization and commercial zoning reduce perceived noise impact.
3 Outside PEZR Contrast		OutsidePaths, Above6km, Land_Use = Others, Tree_Density = Above19trees, Population_Density = UpTo20hab	Policy makers, community outreach	Validate model prediction in areas *outside PEZR* with minimal expected impact.

Table 3: Comparative Probabilities of Noise Complaint Risk (Low and High) Across Bayesian Network Scenarios.

Scenario	Low (%)	High (%)	Δ Low (%)	Δ High (%)
Baseline (Fig. 1)	45.22	54.78	0.00	0.00
1	44.84	55.16	- 0.38	+ 14.13
2	31.1	68.9	- 14.1	+ 14.2
3	32.39	67.60	- 28.33	+ 23.44

The three simulated scenarios demonstrated the sensitivity of the Bayesian Network to spatial and operational configurations representative of the surroundings of Congonhas Airport. Scenario 1 – Critical Zone (2 km from the runway in residential flight paths) raised the probability of high noise impact to 55.2%, an increase of Δ +0.5 compared to the baseline scenario without evidence, confirming the elevated risk in central areas of the PEZR. Scenario 2 – High Vegetation and Density Fringe reached the highest probability of high impact (68.9%; Δ +14.2), indicating that even with mitigating urban and environmental features, operational exposure (flight paths + critical distance) remains the dominant driver of annoyance. Lastly, Scenario 3 – High Commercial Strip (land use classified as "Commercial" with buildings >20 m) also

showed a significant increase (Δ +13.6) in noise perception, contradicting expectations of urban mitigation in areas with lower residential sensitivity.

5. CONCLUSIONS

The study confirms that noise complaints around Congonhas Airport (SBSP) are strongly influenced by spatial-operational factors, particularly runway distance and flight path proximity. The Bayesian network model proved effective in capturing the role of urban morphology and population distribution, offering a transparent probabilistic framework to support decision-making. These findings challenge conventional zoning assumptions and provide a refined basis for improving airport noise management in dense urban environments.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. (2021) *RBAC nº 161 – Regulamento Brasileiro da Aviação Civil: Planos de Zoneamento de Ruído de Aeródromos – PZR*. Available at: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-161

Boucsein, B.; Christiaanse, K.; Kasioumi, E.; Salewski, C. (2017). *The noise landscape: A spatial exploration*. Rotterdam: nai010 publishers.

Cavion, R.; Bandeira, M. C. G. S. P. (2024) *A spatial analysis of aircraft noise complaints*. In: Anais do XXI Simpósio de Transporte Aéreo - SITRAER 2024. Anais...Fortaleza (CE) Centro Universitário Farias Brito (FB UNI), 2024. DOI: 10.29327/xxi-sitraer-2024.912816

Duarte Filho, N. L.; Calheiros, R. N. (2002). Reconhecimento automático de padrões utilizando redes bayesianas: uma abordagem paralela e distribuída. *Symposium on High Performance Computing Systems*.

Puga, J. L. (2012). *Cómo construir y validar redes bayesianas con Netica*. [S.l.]: [s.n.].

Elliff, T.; Cremaschi, M.; Huck, V. (2020). *Impact of aircraft noise pollution on residents of large cities*. Brussels: Policy Department for Citizens' Rights and Constitutional Affairs, European Parliament. Available at: https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU (2020) 65078. Accessed on: 22 Jun. 2025.

Flores, P.; Grigoriadis, E.; Zannin, P. H. T. (2018) *Relationship between urban morphology and the sound environment in five different districts of a Latin American city*. Building and Environment, 144, 502–517. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.038

Fidell, S.; Mestre, V. (2020) *Community response to aircraft noise: A critical review and recommendations*. The Journal of the Acoustical Society of America, 148(2), 680–697. https://doi.org/10.1121/10.0001712

García-Moreno, S.; Sánchez-Cambronero, S. (2008). *Traffic prediction models using Bayesian networks and other tools*. [S.l.]: [s.n.].

Infraero. (2022). *Planos Específicos de Zoneamento de Ruído (PEZR) Registrados para Aeródromos Públicos*. Open data available at: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/planejamento-aeroportuario/PZRREGISTRADOS.pdf

Instituto Aviação. (2025). *23 milhões de passageiros passaram por Congonhas em 2024*. Retrieved from https://institutoaviacao.org/noticias/23-milhoes-de-passageiros-passaram-por-congonhas-em-2024/

Kang, J. (2007) *Urban sound environment*. CRC Press.

Oliveira, T. C. (2024) *Análise das limitações do zoneamento acústico aeroportuário: o caso de Congonhas*. Relatório técnico. Universidade Federal de Goiás.

Prefeitura do Município de São Paulo. (2014). *Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo – Lei nº 16.050/2014*. São Paulo: PMSP. Disponível em: https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/

Puga, J. L. (2012). *Cómo construir y validar redes bayesianas con Netica*. [S.l.]: [s.n.].

Revoredo, T. C.; Slama, J. G.; Mora-Camino, F. (2013). Redes neurais artificiais aplicadas à simulação de cenários complexos de ruído aeronáutico. *Acústica e Vibrações*.

Rivera, C. (2012). *Aportaciones a los sistemas de discriminación de fuentes sonoras en la medida de ruido en aeropuertos*. [S.l.]: [s.n.].

Rodríguez, R. R. (2003). *Modelos de redes bayesianas con variables discretas y continuas*. [S.l.]: [s.n.].

Schultz, T. J. (1978) *Synthesis of social surveys on noise annoyance*. The Journal of the Acoustical Society of America, 64(2), 377–405. https://doi.org/10.1121/1.382013

Southgate, D. (2007) *Aircraft noise and land use planning: The Sydney experience*. Environmental Management, 39(3), 334–345. https://doi.org/10.1007/s00267-005-0336-4

Zaporozhets, O.; Tokarev, V.; Attenborough, K. (2011) *Aircraft noise: Assessment, prediction and control*. CRC Press.

*Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira (*michelle.galvao@ufg.br*)* - Federal University of Goiás, Faculty of Science and Technology (FCT), Estrada Municipal, Lote 04 - Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia/GO, 74971-451, Brazil.
Renata Cavion (rcavion@ufsc.br) - Federal University of Santa Catarina, Mobility Engineering Department (EMB), Transportation and Logistics Laboratory (LabTL). Rua Delfino Conti, s/n – Trindade, Florianópolis – SC, 88040-900, Brazil.

CRITÉRIOS DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS DE MOBILIDADE COMPARTILHADA: UMA REVISÃO CRÍTICA DO ESTADO DA ARTE

João Guilherme da Costa Braga França, Helena Beatriz Bettella Cybis, Ana Margarita Larrañaga Uriarte
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este estudo explora, a partir de uma Revisão Sistemática Simplificada da Literatura, os critérios de localização de Hubs de Mobilidade Compartilhada com o objetivo de analisar as abordagens e lacunas. O processo permitiu a definição de seis dimensões de critérios de localização: modos e acesso, uso do solo, perfil demográfico e socioeconômico, operação e facilidades, sustentabilidade e políticas públicas existentes. A análise detalhada mostrou que a maioria dos estudos se concentra no Norte Global e focam nas dimensões de modos e acesso e sustentabilidade, quais são quase universalmente considerados. Custos de implementação, incerteza da demanda e aspectos qualitativos do *design* ainda são lacunas. Há escassez de estudos em contextos emergentes, criando oportunidades para que futuras pesquisas foquem nas particularidades dessas regiões e em abordagens mais holísticas para o planejamento da mobilidade urbana sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e a demanda por soluções eficientes de transportes ambientalmente responsáveis têm impulsionado a adoção de estratégias de mobilidade sustentável como pilar do planejamento das cidades. Nesse contexto, os Hubs de Mobilidade Compartilhada (HMC) emergem como uma possibilidade para facilitar viagens intermodais mais sustentáveis (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Pimenta *et al.*, 2024; Xanthopoulos *et al.*, 2024). O conceito dos HMC parte da ideia central dos Terminais Intermodais, conceito amplamente difundido na literatura, que, somado ao incentivo à mudança do uso do carro particular para alternativas mais sustentáveis, visa contribuir para a redução do congestionamento, das emissões e do consumo de espaço público (Bencekri *et al.*, 2024; Blad *et al.*, 2022; Jaber *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2023; Stadnichuk *et al.*, 2024).

Segundo Roukouni *et al.* (2023), o conceito de HMC é emergente e dinâmico, e não apresenta uma definição totalmente estabelecida. Weustenenk & Mingardo (2023) propuseram diferentes tipologias de hubs com base na inter-relação, dentre outros fatores, entre a quantidade e complexidade dos modos de transporte e facilidades ofertadas e a escala (local, regional ou nacional). De forma mais abrangente, um HMC pode ser definido como um local estrategicamente posicionado onde diferentes modos de transporte - públicos e/ou privados, motorizados e/ou não motorizados, tradicionais e/ou compartilhados - estão disponíveis e se integram (Bencekri *et al.*, 2024; Blad *et al.*, 2022; Ciriaco e Wong, 2022; Hached *et al.*, 2023; Roukouni *et al.*, 2023; Trygg e Grundel, 2025). Além de facilitarem a transferência entre os modos (Jaber *et al.*, 2024; Moslem *et al.*, 2024; Petrović *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020), estes locais frequentemente oferecem serviços auxiliares agregam valor ao usuário e estimulam sua utilização (Arnold *et al.*, 2023; Petrović *et al.*, 2019).

Um dos desafios no contexto dos HMC diz respeito à definição da localização, que representa uma decisão estratégica de alta complexidade (Arnold *et al.*, 2023; Blad *et al.*, 2022; Jaber *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2023; Ren e Chow, 2025; Stadnichuk *et al.*, 2024). Isso porque os critérios de escolha não são triviais, envolvem a ponderação de múltiplos fatores e precisam retratar o comportamento de viagens e as constantes mudanças das necessidades urbanas (Ren e Chow, 2025). O objetivo desse trabalho é explorar e discutir os elementos considerados na localização dos HMCs de mobilidade, permitindo uma análise estruturada e crítica das abordagens existentes, critérios adotados e lacunas. O estudo contribui para sistematizar o conhecimento disponível sobre modelos e práticas de localização, identificar a existência de estudos no contexto brasileiro e propor reflexões sobre características locais que devem ser incorporadas em futuras aplicações.

2. METODOLOGIA

Este artigo foi conduzido como uma Revisão Sistemática Simplificada da Literatura com base nas diretrizes do PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021), segundo uma estrutura de busca estruturada nas bases de dados científicas *Web of Science* e *Scopus*. Esse processo concentrou-se na identificação de artigos científicos que abordasse critérios de localização de HMC, de modo que foram utilizadas as combinações de palavras-chave "*mobility hub(s) and site location*" e "*mobility hub(s) and location selection*" como objeto de busca. Para assegurar a inclusão de pesquisas mais recentes para o conceito emergente de HMCs, o período de publicação foi restrito entre 2015 e 2025 e a busca foi limitada à artigos de periódicos revisados por pares, com poucas exceções de publicações em conferências internacionais. Foram identificados 69 estudos sem repetições.

O trabalho foi estruturado em duas etapas principais. Inicialmente, os artigos foram avaliados visando identificar se os estudos abordavam (ou não) critérios de localização. Nesse primeiro filtro, 28 estudos foram selecionados. Como o foco é HMCs para transporte terrestre de passageiros, foram descartados estudos sobre hubs de carga, para mobilidade aérea e marítima ou sobre infraestruturas específicas.

Os 28 artigos, inclusive os de Revisão da Literatura, foram analisados sob a ótica dos aspectos considerados na análise da localização dos HMCs. Estes critérios levaram à definição das "dimensões" que serviram como base para as análises. O presente artigo envolve apenas os estudos selecionados que abordavam pelo menos uma dessas dimensões. Para além da avaliação, foram extraídas informações sobre (i) os tipos/classificação de *hubs* abordados; (ii) os locais dos estudos; e (iii) as técnicas/métodos empregados.

3. CLASSIFICAÇÃO DAS DIMENSÕES DE CRITÉRIOS CONSIDERADAS

Para estruturar a análise de localização dos HMCs, como resultado da avaliação dos artigos, foram definidas seis dimensões principais a partir de características comuns utilizadas como critérios de entrada para modelos e metodologias de localização. Essas características, que influenciam a decisão locacional, foram identificadas a partir da leitura dos artigos selecionados, analisadas e agrupadas com base na recorrência e importância destacadas nos estudos revisados, formando então as seis dimensões.

3.1. Modos e Acesso

Esta primeira dimensão buscou avaliar como a localização dos HMCs é determinada pela capacidade de integração de diferentes modos de transporte e pela facilidade de acesso dos usuários. De forma geral, os artigos revisados que trataram dessa dimensão indicam que a proximidade a sistemas de transporte público, principalmente os de alta capacidade (metrô, por exemplo), e a conexão a grandes redes viárias são critérios essenciais na escolha da locação dos HMCs (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Arias-Molinares *et al.*, 2023; Aydin *et al.*, 2022; Blad *et al.*, 2022; Jaber *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2023; Kang *et al.*, 2023; Moslem *et al.*, 2024; Petrović *et al.*, 2019; Pimenta *et al.*, 2024; Ren e Chow, 2025; Stadnichuk *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2020). Ainda, foi possível identificar que a micromobilidade, a "*última milha*" e o acesso de pedestres e de ciclistas são temas focais para a consideração de instalação de HMCs (Jaber *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2023).

3.2. Uso do Solo

Esta dimensão explorou como as características do ambiente construído e os padrões de uso do solo influenciam a escolha do local dos HMCs. Da literatura avaliada, observou-se que a adequação física do "terreno", restrições estruturais e de zoneamento, são critérios cruciais nas análises de viabilidade, haja vista contemplar a parcela de custo de implementação (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Aydin *et al.*, 2022; Blad *et al.*, 2022). Ainda, a diversidade de uso do solo - uso misto - e a proximidade de facilidades (a exemplo de centros comerciais, instituições de ensino e hospitais) são fatores-chave para atrair demanda e viabilizar a instalação dos HMCs (Arias-Molinares *et al.*, 2023; Bencekri *et al.*, 2024; Jaber *et al.*, 2024; Pimenta *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2020). Núcleos urbanos densos ou em áreas de requalificação urbana também são aspectos explorados como critérios de localização (Kang *et al.*, 2023; Pimenta *et al.*, 2024; Ren e Chow, 2025).

3.3. Perfil Demográfico e Socioeconômico

Esta terceira dimensão contempla as características da população e o contexto socioeconômico das áreas de estudo, analisando sua influência na decisão de localização dos HMCs. A densidade populacional e de empregos são fatores cruciais nos estudos (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Arias-Molinares *et al.*, 2023; Aydin *et al.*, 2022; Blad *et al.*, 2022; Pimenta *et al.*, 2024). Renda e nível educacional também são considerados na literatura pelo seu impacto na demanda (Jaber *et al.*, 2024; Moslem *et al.*, 2024; Pimenta *et al.*, 2024). De forma emergente, estudos têm considerado áreas historicamente mal servidas por transporte ou em zonas de pobreza concentrada como critério para instalação de HMCs que contribuam na promoção da equidade (Arnold *et al.*, 2023; Bencekri *et al.*, 2023, 2024; Palaguachi *et al.*, 2024; Rodriguez-Roman *et al.*, 2024).

3.4. Operação e Facilidades

Esta dimensão envolve aspectos práticos e econômicos da implantação dos HMCs. A minimização dos custos de implementação e operacionais é um objetivo comum dos estudos que consideram essa dimensão (Aydin *et al.*, 2022; Blad *et al.*, 2022; Jaber *et al.*, 2024; Moslem *et al.*, 2024; Stadnichuk *et al.*, 2024; Xanthopoulos *et al.*, 2024). Outras características associadas são: facilidade de conexão à infraestrutura existente e disponibilidade de serviços auxiliares - como pontos de carregamento elétrico e Wi-Fi, segurança e eficiência

da operação, no que se refere ao equilíbrio entre oferta e demanda (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Jaber *et al.*, 2024; Palaguachi *et al.*, 2024; Stadnichuk *et al.*, 2024; Trygg e Grundel, 2025; Wang *et al.*, 2020).

3.5. Sustentabilidade

Esta é uma dimensão central quando alinhada ao contexto de implantação de HMCs para a promoção de viagens mais sustentáveis. Em grande parte dos estudos encontrados nesta revisão, os *hubs* apresentam sustentabilidade como objetivo primordial de sua localização. Nestes contextos, os critérios buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o congestionamento nas cidades e a distância percorrida pelos veículos (Arias-Molinares *et al.*, 2023; Arnold *et al.*, 2023; Aydin *et al.*, 2022; Bencekri *et al.*, 2024, 2023; Blad *et al.*, 2022; Jeong *et al.*, 2023; Ku *et al.*, 2022; Moslem *et al.*, 2024; Pimenta *et al.*, 2024; Ren e Chow, 2025; Tran e Draeger, 2021; Wang *et al.*, 2020). A promoção da mudança do carro particular para modos mais sustentáveis é um resultado esperado da localização estratégica dos HMCs, segundo os estudos avaliados (Jaber *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2023; Stadnichuk *et al.*, 2024). Ainda, a presença de espaços verdes e a qualidade ambiental do entorno também podem ser critérios (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Jaber *et al.*, 2024).

3.6. Políticas Públicas Existentes

Esta última dimensão considera de que maneira as diretrizes e planos de políticas públicas vigentes no contexto dos estudos influenciam a localização dos HMCs. Embora essas questões não sejam tão evidentes na literatura, a integração dos *hubs* em planos diretores e planos de mobilidade urbana sustentável é apontada como crucial em alguns estudos (Aydin *et al.*, 2022; Bencekri *et al.*, 2024; Moslem *et al.*, 2024; Pimenta *et al.*, 2024; Trygg e Grundel, 2025). A perspectiva governamental e o apoio político também são fatores indicados em alguns modelos (Blad *et al.*, 2022; Jaber *et al.*, 2024; Stadnichuk *et al.*, 2024). Em alinhamento com outras dimensões de critérios, a localização dos HMCs também é vista como uma ferramenta para implementar políticas de gestão da demanda de transporte, de equidade social e de desenvolvimento urbano sustentável (Bencekri *et al.*, 2023; Frank *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2023; Moslem *et al.*, 2024; Trygg e Grundel, 2025).

4. ANÁLISE DA LITERATURA

A partir da definição das dimensões e dos dados de contextualização geográfica e funcional coletados, a análise da literatura foi realizada de forma detalhada, revelando padrões e lacunas importantes nos critérios de localização de HMCs. Inicialmente, foi identificado que a grande maioria dos estudos está concentrada no Norte Global, com destaque para os países da Europa - Holanda, Alemanha, Reino Unido, Espanha, Áustria, Croácia (Aquilué Junyent *et al.*, 2024; Arias-Molinares *et al.*, 2023; Aydin *et al.*, 2022; Blad *et al.*, 2022; Frank *et al.*, 2021; Petrović *et al.*, 2019; Pimenta *et al.*, 2024; Stadnichuk *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2020), Estados Unidos e Canadá (Mahmoud *et al.*, 2015; Ren e Chow, 2025; Tran e Draeger, 2021). Há também um número crescente de estudos na Ásia, especialmente na Coreia do Sul e na China (Bencekri *et al.*, 2023, 2024; Jeong *et al.*, 2023; Kang *et al.*, 2023; Ku *et al.*, 2022). A representatividade da América Latina é limitada, com poucos estudos focados na localização de *park and ride* e sem artigos referentes ao contexto brasileiro.

As análises revelaram também que a literatura tem se concentrado na otimização da eficiência e na sustentabilidade ambiental como objetivos de localização dos HMCs. Isso porque as dimensões “modos e acesso” e “sustentabilidade” são quase universalmente consideradas nos estudos avaliados. Temas como a equidade social tem ganhado mais atenção na determinação dos critérios de localização. Na contrapartida, custos de implementação dos *hubs*, incerteza da demanda, preferências e comportamento do usuário em tempo real e relação com o design urbano - abarcados na dimensão de Operação - são menos consideradas nos trabalhos mais recentes.

Ao cruzar as dimensões avaliadas pelos estudos de localização, observa-se que a maioria dos artigos tende a considerar de forma variada três das seis dimensões como critérios de entrada para seus modelos. Alguns artigos, no entanto, demonstram uma abordagem mais abrangente, considerando todas as seis dimensões avaliadas (Aydin *et al.*, 2022; Bencekri *et al.*, 2023, 2024; Blad *et al.*, 2022; Jaber *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2023; Ku *et al.*, 2022; Moslem *et al.*, 2024; Pimenta *et al.*, 2024). Esses estudos representam abordagens mais holísticas na determinação da localização dos HMCs, melhor integrando a complexidade urbana.

Destaca-se que a consideração recorrente da mais de uma dimensão, acompanhada da alta recorrência das dimensões “modos e acesso” e “operação e facilidade”, dialoga diretamente com a complexidade da própria definição dos HMCs corroborando que os hubs não são entidades homogêneas e que seus critérios de

localização não podem ser universalizados. A decisão da localização, assim, exige uma compreensão prévia de qual tipo de hub é mais adequado para um determinado contexto urbano e de quais dimensões se aplicam e se entrelaçam para aquela natureza de HMCs.

A caracterização da população-alvo e as condições socioeconômicas da área de estudo também se mostraram cruciais para a determinação da localização, condição que, conforme apontam os estudos, pode limitar a generalização. Ainda, a maioria dos modelos de localização dos HMCs avaliados assumem cenário estático de demanda, deixando de considerar a dinâmica temporal das viagens e a incerteza da demanda futura.

Embora alguns estudos utilizem dados de preferência declarada para avaliar o uso emergente de HMCs para viagens da última milha, a complexidade do comportamento humano em tempo real e a sua influência direta na localização ideal são menos aprofundadas. Aspectos mais qualitativos e detalhados do *design* dos *hubs*, como atratividade do espaço, conforto e proteção climática, não aparecem como critérios diretos de localização (Jeong *et al.*, 2023). A Análise de Decisão Multicritério emerge como uma abordagem robusta e frequentemente empregada na seleção de localizações de hubs de mobilidade.

Considerando que representatividade da América Latina em estudos de localização de HMCs ainda é limitada, nota-se oportunidades para pesquisas e aplicação no contexto brasileiro. Isso porque estudos no Brasil podem usar das dimensões identificadas para tratar da diversidade urbana e socioeconômica e fornecer contextos ricos para a validação e adaptação de modelos de localização.

5. CONCLUSÕES

A revisão realizada revelou um campo de pesquisa em expansão - já que dos 28 artigos avaliados, 22 são datados de 2022 a 2025 – e com avanços significativos em metodologias de otimização e análise multicritério. A maioria dos estudos analisados considerou, como critérios de seleção para instalação dos *hubs*, dimensões referentes aos modos presentes dos HMCs e a integração com as redes existentes. À essas dimensões, somam-se aquelas que tratam das condições socioeconômicas locais e as que avaliam o potencial de instalação dos HMCs em conexão com a busca por um transporte mais sustentável e/ou por modos ativos.

Não foram encontrados estudos sobre esse tema no contexto brasileiro, o que, considerando a importância do tema, mostra uma lacuna relevante. Nesse sentido, surgem elementos fundamentais para orientar a definição de localizações adequadas ao contexto brasileiro, como (i) padrões de demanda e uso do solo; (ii) equidade e inclusão social; (iii) potencial de uso de modos sustentáveis; e (iv) viabilidade financeira e integração de custos.

Outrossim, a localização dos HMCs é uma decisão estratégica complexa, que demanda critérios - que abranjam desde a eficiência operacional até a sustentabilidade e a equidade social - e abordagens multidisciplinares. Ao endereçar as lacunas identificadas, especialmente no contexto de países emergentes como o Brasil, em que diretrizes reforçam a necessidade de integração modal, pesquisas sobre HMCs e suas localizações podem avançar para contribuir no planejamento de cidades mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aquilué Junyent, I., Martí Casanovas, M., Roukouni, A., Moreno Sanz, J., Roca Blanch, E., & Correia, G. H. de A. (2024). Planning shared mobility hubs in European cities: A methodological framework using MCDA and GIS applied to Barcelona. Sustainable Cities and Society, 106, 105377. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105377

Arias-Molinares, D., Xu, Y., Büttner, B., & Duran-Rodas, D. (2023). Exploring key spatial determinants for mobility hub placement based on micromobility ridership. Journal of Transport Geography, 110, 103621. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103621

Arnold, T., Dale, S., Timmis, A., Frost, M., & Ison, S. (2023). An exploratory study of Mobility Hub implementation. Research in Transportation Economics, 101, 101338. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101338

Aydin, N., Seker, S., & Özkan, B. (2022). Planning Location of Mobility Hub for Sustainable Urban Mobility. Sustainable Cities and Society, 81, 103843. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103843

Bencekri, M., Kim, S., Fan, Y. Van, & Lee, S. (2024). Locating carbon neutral mobility hubs using artificial intelligence techniques. Scientific Reports, 14(1), 12328. https://doi.org/10.1038/s41598-024-62701-z

Bencekri, M., Lee, D., Kim, S., Shin, S., & Lee, S. (2023). Equity-Based Allocation of Mobility Hubs in Seoul. Chemical Engineering Transactions, 106, 265–270. https://doi.org/10.3303/CET23106045

Blad, K., Homem de Almeida Correia, G., van Nes, R., & Anne Annema, J. (2022). A methodology to determine suitable locations for regional shared mobility hubs. Case Studies on Transport Policy, 10(3), 1904–1916. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.08.005

Ciriaco, T. G. M., & Wong, S. D. (2022). Review of resilience hubs and associated transportation needs. Transportation Research

Interdisciplinary Perspectives, 16, 100697. https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100697
Frank, L., Dirks, N., & Walther, G. (2021). Improving rural accessibility by locating multimodal mobility hubs. Journal of Transport Geography, 94, 103111. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103111
Hached, W., L'Hostis, A., & Gragera, A. (2023). Exploring the concept of " mobility hubs " and assessing their impacts in two European cities. Transportation Research Procedia, 72, 3497–3504. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.763
Jaber, A., Ashqar, H., & Csonka, B. (2024). Determining the Location of Shared Electric Micro-Mobility Stations in Urban Environment. Urban Science, 8(2), 64. https://doi.org/10.3390/urbansci8020064
Jeong, I., Choi, M., Kwak, J., Ku, D., & Lee, S. (2023). A comprehensive walkability evaluation system for promoting environmental benefits. Scientific Reports, 13(1), 16183. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43261-0
Kang, G., Lee, J., Kwak, J., Choi, M., & Lee, S. (2023). Air Pollution Reduction by Optimizing Locations of Mobility Parking Hub. Chemical Engineering Transactions, 106, 241–246. https://doi.org/10.3303/CET23106041
Ku, D., Choi, M., Lee, D., & Lee, S. (2022). The effect of a smart mobility hub based on concepts of metabolism and retrofitting. Journal of Cleaner Production, 379, 134709. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134709
Mahmoud, M. S., Habib, K. M. N., & Shalaby, A. (2015). Survey of Cross-Regional Intermodal Passenger Travel. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2526(1), 108–118. https://doi.org/10.3141/2526-12
Moslem, S., Ortega, J., Ortega, J., Padilla, M., Ouelhadj, D., & Esztergár-Kiss, D. (2024). Optimizing park and ride location selection using the novel parsimonious full consistency method: Insights from Cuenca, Ecuador. Research in Transportation Business & Management, 56, 101171. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101171
Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. BMJ, n160. https://doi.org/10.1136/bmj.n160
Palaguachi, J., Padilla, M., Ortega, M., Solorzano, M. R., Uvidia, R. V., Ortega, J., & Veloz-Cherrez, D. (2024). Evaluating the Location of the Park-and-Ride System Using Multi-Criteria Methods: A Systematic Review. Sustainability, 16(23), 10187. https://doi.org/10.3390/su162310187
Petrović, M., Mlinarić, T. J., & Šemanjski, I. (2019). Location Planning Approach for Intermodal Terminals in Urban and Suburban Rail Transport. PROMET - Traffic&Transportation, 31(1), 101–111. https://doi.org/10.7307/ptt.v31i1.3034
Pimenta, A., Rahmah, U., Jayawardhena, M., & Kamruzzaman, L. (2024). Site Selection for Future Mobility Hubs in Melbourne: A Multicriteria Location-Allocation Analysis. Findings. https://doi.org/10.32866/001c.94389
Ren, X., & Chow, J. Y. J. (2025). A Data Fusion Approach for Mobility Hub Impact Assessment and Location Selection: Integrating Hub Usage Data into a Large-Scale Mode Choice Model. https://doi.org/10.2139/ssrn.5200375
Rodriguez-Roman, D., Carlo, H. J., Sperling, J., Duvall, A., Leoncio-Cabán, R. E., & López del Puerto, C. (2024). Optimizing the location and configuration of disaster resilience hubs under transportation and electric power network failures. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 24, 101079. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101079
Roukouni, A., Junyent, I. A., Casanovas, M. M., & Correia, G. H. de A. (2023). An Analysis of the Emerging "Shared Mobility Hub" Concept in European Cities: Definition and a Proposed Typology. Sustainability, 15(6), 5222. https://doi.org/10.3390/su15065222
Stadnichuk, V., Merten, L., Larisch, C., & Walther, G. (2024). Optimisation of mobility hub locations for a sustainable mobility system. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 26, 101193. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101193
Tran, M., & Draeger, C. (2021). A data-driven complex network approach for planning sustainable and inclusive urban mobility hubs and services. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 48(9), 2726–2742. https://doi.org/10.1177/2399808320987093
Trygg, K., & Grundel, I. (2025). Strategic spatial planning in the implementation of mobility hubs. Journal of Urban Mobility, 7, 100105. https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2025.100105
Wang, W., Su, S., Fu, M., Nong, Y., Scriba, T., & Fadhil, D. N. (2020). Research of 3-Tier Mobility Stations System with bike and car sharing— Case study of small–scale city in Germany. E3S Web of Conferences, 145, 02017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502017
Weustenenk, A. G., & Mingardo, G. (2023). Towards a typology of mobility hubs. Journal of Transport Geography, 106, 103514. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103514
Xanthopoulos, S., van der Tuin, M., Sharif Azadeh, S., Correia, G. H. de A., van Oort, N., & Snelder, M. (2024). Optimization of the location and capacity of shared multimodal mobility hubs to maximize travel utility in urban areas. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 179, 103934. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103934

João Guilherme da Costa Braga França (joao.franca@ufrgs.br)
Helena Beatriz Bettella Cybis (helenabc@ufrgs.br)
Ana Margarita Larrañaga Uriarte (analarra@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia de Produção e Transportes (DEPROT), Av. Osvaldo Aranha, 99 - 5º andar, Porto Alegre, RS, Brasil

DESAFIOS URBANOS E ODS: ESTUDO DE CASO DO COMPLEXO DA LAGOINHA EM BELO HORIZONTE

Luiz Carlos Alves da Silva Junior, Matheus Mauricio Chaves, Ana Paula Alves, Ewerton Souza e Mussa Raja
Instituto de Geociências – UFMG, Departamento de Transportes e Geotécnica - UFMG

RESUMO
O Complexo da Lagoinha, em Belo Horizonte, reflete os desafios urbanos causados pelo crescimento desordenado, como precariedade habitacional, mobilidade desconectada e exclusão social. Este estudo propõe a requalificação do território com base nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), priorizando a mobilidade ativa, a qualificação dos espaços públicos, a valorização cultural e a habitação social. A proposta contempla a submersão da linha férrea e da Avenida dos Andradas, viabilizando a criação de um boulevard que conecta bairros, incentiva o caminhar e promove a inclusão social. Usando a matriz *SDG Cities*, os resultados apontam melhorias significativas na integração urbana, redução das desigualdades, fortalecimento da cultura local e garantia de moradia digna. A articulação entre planejamento urbano, cultura e sustentabilidade revela-se essencial para garantir o direito à cidade, tornando o Complexo da Lagoinha e suas adjacências um território mais humano, acessível e inclusivo.

Palavras Chaves: Geografia do Transporte; ODS; Mobilidade Urbana; Espaço Público; Habitação Social.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as grandes cidades brasileiras cresceram de forma acelerada, muitas vezes sem o devido planejamento. Esse processo revelou uma série de problemas urbanos, especialmente em áreas historicamente negligenciadas, como é o caso do Complexo da Lagoinha, em Belo Horizonte (CARMO, 2024). Situado entre bairros importantes e com acesso direto ao centro, o local é hoje um dos principais pontos de conexão viária da capital, integrando metrô, linha férrea e viadutos (ÂNGELO E BITTENCOURT, 2021). Apesar disso, a região sofre com desigualdade social, fragmentação urbana e a exclusão de modos ativos de mobilidade (BAPTISTA *et al.*, 2024).

O território, que anteriormente abrigava espaços de convivência como a Praça Vaz de Melo e a Praça do Peixe, perdeu grande parte de sua função social com a expansão da malha viária e a remoção de passagens em nível. Hoje, é dominado por veículos motorizados, carecendo de infraestrutura adequada para mobilidade ativa e manifestações culturais. Soma-se a isso uma realidade marcada por desigualdade social, fragmentação do espaço urbano e exclusão dos modos ativos de mobilidade (BAPTISTA *et al*., 2024).

Esse cenário se insere em um contexto urbano mais amplo. Belo Horizonte, a sexta maior cidade do Brasil, com população estimada em 2.521.564 habitantes em 2020 (IBGE, 2022), enfrenta desafios estruturais comuns a outras grandes metrópoles brasileiras, como crescimento populacional acelerado, pressão sobre serviços públicos essenciais, moradia precária, infraestrutura deficiente e um sistema de mobilidade desigual (LEITE *et al*., 2012; DE OLIVEIRA *et al*., 2023). A distância entre bairros centrais e áreas historicamente negligenciadas, como o bairro Lagoinha e o Concórdia, evidencia não apenas um afastamento físico, mas também simbólico, refletido no acesso desigual a direitos básicos e na fragilização da coesão social (NETO, 2009; SALCEDO, 2012).

Nesse contexto, a reflexão proposta por Jan Gehl (2013) em *Cidades para Pessoas* torna-se atual:

> *"- é preciso pensar as cidades a partir da escala humana. A cidade precisa voltar a ser um lugar onde se caminha, se encontra, se permanece, não apenas um território de passagem ou de consumo".*

Investir em mobilidade ativa, requalificar espaços públicos, valorizar a cultura local e promover políticas de habitação social são passos fundamentais para reconstruir laços e criar pertencimento.

Diante disso, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU em 2015, emergem como um marco global voltado à promoção da justiça social, sustentabilidade ambiental e

crescimento econômico (NARDONE, 2023; RAMIRO, 2021). A Agenda 2030 propõe 17 objetivos interligados, entre os quais destacam-se, neste estudo, os ODS 1 (erradicação da pobreza), ODS 10 (redução das desigualdades), ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 12 (consumo e produção responsáveis).

A efetividade dos ODS no planejamento urbano requer a compreensão das realidades socioeconômicas locais, especialmente em territórios com alta concentração de vulnerabilidades, como o Complexo da Lagoinha (DE OLIVEIRA, 2021). Implementar esses objetivos implica adotar estratégias que articulem políticas públicas, participação cidadã e governança local. É necessário transformar metas globais em ações concretas adaptadas à realidade do território (PIERRE, 2023; TAVARES *et al.*, 2022).

Dito isto, de forma prática o estudo se encontra com o problema de responder como reestruturar o Complexo da Lagoinha de forma a integrar mobilidade urbana, espaço público, vida cultural e habitação social, enfrentando as desigualdades territoriais e promovendo o direito à cidade em uma área historicamente fragmentada e negligenciada? Parte-se da hipótese de que a predominância da mobilidade motorizada contribuiu para a fragmentação simbólica e física do território.

O objetivo deste estudo é propor caminhos para a reestruturação urbana do Complexo da Lagoinha, a partir de uma abordagem integrada que considere os eixos de mobilidade, espaço público, vida cultural e habitação social, com base nos princípios do direito à cidade e nas diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Analisando a aplicabilidade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no território da Lagoinha, por meio de indicadores urbanos.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação dos impactos das intervenções urbanas propostas no Complexo da Lagoinha em relação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, foi adotada a matriz diagnóstica do *SDG Cities Global Initiative*, desenvolvida pelo UN-Habitat (2020). Essa ferramenta permite mensurar os indicadores urbanos em escala local, alinhando as dimensões de mobilidade, espaço público, habitação social e vida cultural aos ODS 1, 10, 11 e 12. A partir dela, foram comparados os indicadores atuais da Lagoinha com cenários simulados de reestruturação urbana proposta, possibilitando verificar o potencial de avanço do território no cumprimento das metas da Agenda 2030, caso seja realizadas intervenções no Complexo da Lagoinha.

A reestruturação urbana proposta para o Complexo da Lagoinha prevê a requalificação urbana da região do Complexo da Lagoinha, com ênfase na submersão da linha férrea e da Avenida dos Andradas no trecho entre a Rodoviária e a Praça Vaz de Melo, criando uma área contínua de integração urbana. Essa nova configuração possibilitará a unificação espacial da Praça da Rodoviária à Praça do Peixe, promovendo não apenas a integração física entre os modos de transporte (metrô, BRT e ônibus), mas também a reativação simbólica e cultural de um território historicamente desarticulado. intervenção foi concebida de forma integrada, contemplando quatro eixos principais: (1) mobilidade, (2) espaços públicos, (3) vida cultural e (4) habitação social.

O eixo da mobilidade (1) propõe a submersão da linha férrea e da Avenida dos Andradas no trecho central da Lagoinha, com o objetivo de eliminar barreiras físicas que historicamente fragmentaram o território e dificultaram o acesso ao hipercentro. Essa reconfiguração visa integrar a Lagoinha aos bairros vizinhos e ao centro, promovendo maior fluidez e acessibilidade por meio da criação de um boulevard arborizado que prioriza pedestres, ciclistas e o transporte coletivo. Além de eliminar a passarela existente e substituí-la por uma nova praça central acessível e segura, a intervenção prevê a implantação de ciclovias conectadas ao centro e à Avenida Afonso Pena, com bicicletários e paraciclos estrategicamente localizados para estimular o uso da bicicleta como meio de transporte cotidiano. A integração física e tarifária entre a Estação Lagoinha do metrô e os terminais BRT das avenidas Cristiano Machado e Antônio Carlos também é central para garantir deslocamentos mais rápidos e inclusivos, reduzindo a dependência do transporte individual motorizado.O eixo dos espaços públicos (2) busca resgatar a função social das áreas livres do Complexo da Lagoinha, transformando-as em um grande eixo público destinado ao lazer, à cultura e aos serviços. As praças Vaz de Melo e Elifas Levi (Peixe), os baixios dos viadutos e a faixa da antiga linha férrea serão revitalizados com novo paisagismo, mobiliário urbano qualificado e áreas de convivência para encontros comunitários e eventos

culturais. A proposta inclui a implantação de uma feira permanente que resgata a tradição histórica do Mercado do Peixe, contribuindo para dinamizar a economia local e estimular a presença de moradores e visitantes no território. Os espaços sob os viadutos, hoje subutilizados e degradados, ganharão novas funções comunitárias, como hortas urbanas, espaços culturais e serviços de apoio, contribuindo para reduzir a sensação de insegurança. A articulação desses espaços será reforçada por corredores verdes e percursos afetivos com sinalização histórica, valorizando a memória coletiva e a identidade urbana da Lagoinha.

O eixo (3) vida cultural reforça a centralidade da cultura como elemento de resistência e identidade para a Lagoinha, reconhecendo sua importância histórica como polo boêmio e criativo da cidade. A criação da Feira Livre Conexão Lagoinha, instalada no espaço liberado pela submersão da linha férrea e da Avenida dos Andradas, integrará economia popular, sustentabilidade e manifestações culturais, promovendo a diversidade e a inclusão social. O projeto prevê um ambiente vibrante, com áreas para arte urbana, arborização e hortas comunitárias, além de um calendário cultural construído colaborativamente com os coletivos locais, garantindo protagonismo aos moradores na programação de eventos e na gestão dos espaços. Complementa-se com um circuito de memória e afetividade, que inclui sinalizações físicas e QR Codes que narram episódios e personagens marcantes da história da Lagoinha, fortalecendo os vínculos identitários e estimulando o pertencimento ao território.

O eixo da habitação social (4) trata diretamente das desigualdades habitacionais que afetam a Lagoinha, propondo medidas para garantir moradia digna, infraestrutura e integração urbana para a população vulnerabilizada. A revitalização de prédios abandonados para fins de Habitação de Interesse Social é uma estratégia fundamental para conter processos de expulsão e permitir que os moradores permaneçam no bairro após as intervenções. Além disso, está prevista a criação do Centro de Acolhimento e Inclusão Social (CAIS), que oferecerá serviços de acolhimento emergencial, apoio psicossocial, orientação para acesso a programas habitacionais e políticas públicas, além de iniciativas de capacitação profissional e geração de renda. Essa estrutura será articulada às ações culturais e econômicas propostas, incentivando a inclusão produtiva por meio da participação dos moradores na Feira Conexão Lagoinha, fortalecendo os laços comunitários e promovendo o desenvolvimento local.

Assim, a metodologia adotada neste estudo articula análise diagnóstica, simulação de cenários e proposição de diretrizes integradas, fundamentadas nos ODS e adaptadas às especificidades do Complexo da Lagoinha. A aplicação da matriz *SDG Cities* possibilitou avaliar o potencial das intervenções em termos de integração urbana, inclusão social e valorização cultural, fornecendo subsídios para orientar políticas públicas voltadas à requalificação de territórios urbanos vulnerabilizados.

3. RESULTADOS

O modelo de reestruturação proposto para o Complexo da Lagoinha promove uma transformação estrutural no território, alinhando-se aos princípios do direito à cidade e às diretrizes globais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os resultados obtidos por meio da aplicação da matriz SDG Cities evidenciam melhorias significativas em todos os quatro eixos analisados mobilidade, espaços públicos, vida cultural e habitação social, em comparação com a situação diagnosticada atualmente, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre diagnostico atual e o cenário proposto

Eixo	Indicadores	Situação atual	Proposta	ODS	SDG Cities
Mobilidade	Proporção de deslocamentos por transporte ativo (a pé/bicicleta)	Muito baixa, limitada pela falta de infraestrutura segura	Aumento da mobilidade ativa com melhor infraestrutura	ODS 11, 12	Acesso ao transporte sustentável e seguro (%)
	Tempo médio de deslocamento casa-trabalho	Elevado, impactado pela baixa integração dos modos e	Redução com foco no transporte coletivo, e mobilidade ativa	ODS 11, 12	Tempo médio de deslocamento (tendência de redução)

Eixo	Indicadores	Situação atual	Proposta	ODS	SDG Cities
		congestionamentos			
	Incidência de acidentes viários	Alta, devido à precariedade viária e ausência de infraestrutura segura	Queda, com melhorias viárias e redução de conflitos entre modos.	ODS 1, 11	Taxa de acidentes (tendência de queda)
	Cobertura de infraestrutura cicloviária e acessibilidade	Muito limitada, com poucas vias acessíveis	Expansão com ciclovias, acessibilidade e espaços compartilhados.	ODS 11, 10	Tendência de aumento de vias seguras, completas e acessíveis.
Espaço Público	Disponibilidade e acesso a espaços públicos de qualidade	Insuficiente, com espaços degradados e de baixa atratividade	Aumento de espaços seguros e inclusivos.	ODS 11	Acesso a espaços públicos seguros e inclusivos (%)
	Qualidade da iluminação pública e segurança ambiental	Deficiente em diversos pontos, favorecendo sensação de insegurança	Melhoria significativa, com iluminação eficiente e segurança ativa	ODS 11	Cobertura de iluminação pública eficiente (%)
	Ocorrência e frequência de atividades comunitárias	Pouco frequentes, com ocupação esporádica dos espaços	Aumento de atividades culturais e comunitárias.	ODS 11	Vitalidade dos espaços públicos em expansão.
Vida Cultural	Dinamismo cultural: eventos e diversidade	Baixo, devido à carência de infraestrutura e apoio cultural.	Diversificação de eventos e fortalecimento identitário.	ODS 11, 10	Acesso e participação na vida cultural (%)
	Geração de trabalho na economia criativa	Muito limitado, restrito a iniciativas informais	Crescimento com fortalecimento da cultura e economia criativa.	ODS 10, 11	Aumento da contribuição cultural na economia local.
	Preservação do patrimônio material e imaterial.	Insuficiente, com risco de perda de referências culturais	Fortalecimento da preservação e ativação do patrimônio.	ODS 11	Proporção de patrimônio preservado e ativo (%)
	Acesso democrático às atividades culturais.	Restrito, com barreiras econômicas e falta de oferta.	Acesso cultural ampliado e mais inclusivo.	ODS 10, 11	Acesso inclusivo à cultura (tendência de aumento).
Habitação Social	Acesso a moradia digna e adequada	Déficit significativo, presença de ocupações precárias e situação	Redução do déficit habitacional com políticas públicas integradas.	ODS 11, 10	Proporção crescente de moradias adequadas.

Eixo	Indicadores	Situação atual	Proposta	ODS	SDG Cities
		de rua			
	Incidência de população em situação de rua ou habitações precárias	Alta, com processos de vulnerabilidade social agudos	Redução com fortalecimento das políticas habitacionais e sociais	ODS 1, 11	Queda na população em situação de rua ou moradia precária

4. CONCLUSÃO

O estudo evidencia que a reestruturação do Complexo da Lagoinha, orientada pelos ODS e operacionalizada com o apoio da matriz diagnóstica do SDG Cities, apresenta elevado potencial para reverter processos históricos de exclusão e fragmentação urbana. As diretrizes propostas demonstram como é possível alinhar mobilidade sustentável (1), qualificação dos espaços públicos (2), valorização cultural (3) e habitação social (4) a um modelo de desenvolvimento urbano mais inclusivo e equitativo.

As análises realizadas mostram que intervenções integradas e sensíveis ao contexto local não apenas promovem melhorias físicas e funcionais no território, mas também fortalecem a coesão social, ampliam oportunidades econômicas e culturais e garantem condições de moradia digna para a população vulnerabilizada, reafirmando a relevância dos eixos (1), (2), (3) e (4) como pilares para um território mais justo.

Por fim, a articulação entre planejamento urbano, cultura e sustentabilidade, orientada pelos ODS, reforça a importância de políticas públicas que respeitem as especificidades dos territórios e envolvam a comunidade em seu processo de transformação. A experiência do Complexo Lagoinha, nesse sentido, pode inspirar outras iniciativas voltadas à construção de cidades mais humanas, acessíveis e justas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÂNGELO, Carla; BITTENCOURT, Gabriela. Lagoinha: território em disputa. In: Dossiê Modernidades em Disputa: A cidade como campo de confronto de memórias. Belo Horizonte: UFMG, 2021.

BAPTISTA, Jéssica Pereira Alves et al. Revitalização do hipercentro de Belo Horizonte e seus impactos nas relações econômicas e sociais: uma análise do programa" Centro de Todo Mundo" da prefeitura de Belo Horizonte. 2024.

CARMO, Roberto Luiz Do. POPULAÇÃO E DOMICÍLIOS NAS CIDADES BRASILEIRAS: DESAFIOS SOCIOAMBIENTAIS DO SÉCULO XXI. 2024.

DE OLIVEIRA, Leise Kelli; NOBREGA, Rodrigo Affonso Albuquerque; DE SOUZA COELHO, Pedro. Exploring the transport landscape in Belo Horizonte, Brazil. Latin American Transport Studies, v. 1, p. 100001, 2023.

GEHL, Jan. Cidades para pessoas. São Paulo: Perspectiva, 2013.

LEITE, Carlos; AWAD, Juliana di Cesare. 2012.Cidades Sustentáveis, Cidades Inteligentes: desenvolvimento sustentável num planeta urbano. Porto Alegre: Bookman.

NARDONE, José Paulo. A Assimilação dos ODS, da Agenda 2030, pelos Municípios Brasileiros. Cadernos, v. 1, n. 11, p. 107-128, 2023.

NETO, Arnaldo Lopo Mont Alvao. Deslocamentos urbanos e desigualdades sociais: um estudo do movimento diário da população de Belo Horizonte. 2009.

RAMIRO, Rodrigo Correa. As Agendas ODS no Plano Plurianual 2016-2019. 2021.

PIERRE, Dieugo. Desigualdade, pobreza e renda: análise das estratégias de mitigação das políticas públicas para migrantes no Paraná. Terra Livre, v. 2, n. 61, p. 136-168, 2023.

SALCEDO, R. Mapas afetivos e intervenções culturais no espaço urbano. Revista Ponto Urbano, v. 6, n. 9. Universidade de São Paulo.2012

DESENHO DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO VARIÁVEIS DE USO DO SOLO - UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ana Luíza Mazalotti Teixeira[1], Amanda Evellyn da Silva Andrade[1], Narciso Ferreira dos Santos Neto[1], João Batista Mendes[1], Clara Gonçalves Ribeiro[1], Guilherme de Castro Leiva[2], Renato Guimarães Ribeiro[2], José Luiz Lopes Teixeira Filho[3]

[1]Universidade Estadual de Montes Claros, [2]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, [3]Universidade Federal de Juiz de Fora

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a incorporação de variáveis de uso do solo em modelos de desenho de redes de transporte público. Utilizando uma metodologia adaptada do protocolo PRISMA, identificou-se uma notável escassez de trabalhos diretamente focados no tema. Os estudos selecionados demonstram a eficácia da integração entre planejamento de transportes e uso do solo, aplicando otimização multiobjetivo e heurísticas. Contudo, revelam limitações como a abordagem estática da demanda e a subjetividade dos parâmetros. A pesquisa conclui pela relevância do tema e aponta para a necessidade de futuras contribuições mais abrangentes.

1. INTRODUÇÃO

A inter-relação entre o planejamento do transporte público e o uso do solo em áreas urbanas é complexa e ainda mal compreendida. Embora muitos estudos tenham sido conduzidos nas últimas seis décadas sobre a interação entre transportes e uso do solo (Acheampong e Silva, 2015; Ali *et al*., 2021; Iacono *et al.*, 2008), os mecanismos através dos quais esses sistemas se impactam mutuamente têm sido difíceis de se isolar e medir empiricamente, havendo uma lacuna notável quanto à ênfase insuficiente dada à mediação das redes de transporte e ao papel da acessibilidade na determinação das preferências de uso do solo (Acheampong e Silva, 2015).

As intervenções nas redes e serviços de transporte transformam os padrões de acessibilidade territorial e podem estimular mudanças no uso do solo, que por sua vez, geram novas demandas de viagens e retornam impactos sobre a eficiência do próprio sistema de transportes (Wegener, 2004; Zhang *et al*., 2015). No entanto, modelos existentes de desenho de redes de transporte público frequentemente desconsideram essas interdependências, o que pode levar à indução de transformações indesejadas no espaço urbano. A aplicação de abordagens integradas de planejamento de transporte e o uso do solo ao desenho de redes propriamente dito ainda é limitada. Trabalhos como os de Los (1978), Feng e Lin (1999) e Shan e Gao (2000) propõem modelos que se restringem a enfrentar o problema de projeto de redes viárias, com foco no dimensionamento da capacidade das vias, e não tratam os problemas referentes aos serviços de transporte público.

Diante da lacuna existente na integração entre o planejamento do desenho de redes de transporte público e o uso do solo, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a incorporação de variáveis representativas do uso do solo em modelos de desenho de redes de transporte público, com o objetivo de identificar, selecionar e analisar, de forma estruturada, os estudos científicos mais relevantes sobre o tema proposto. Abordar essa lacuna é importante para avançar as práticas de planejamento e promover uma compreensão mais profunda da dinâmica urbana.

2. METODOLOGIA

A revisão conduzida seguiu, de forma simplificada, os princípios do protocolo PRISMA, reconhecido por organizar de maneira clara e estruturada as etapas de uma revisão sistemática. Não se aplicaram integralmente todas as diretrizes formais do protocolo, que tem sido mais usualmente empregado em pesquisas na área da saúde, optando-se por uma adaptação mais adequada ao contexto da engenharia. O processo foi estruturado em sete etapas sequenciais, visando manter a lógica da revisão sistemática, mas com maior objetividade e aplicabilidade à realidade do estudo.

A primeira etapa consistiu na definição clara e objetiva da pergunta de pesquisa, que orientou toda a revisão: “como o uso do solo é incorporado aos modelos de desenho de redes de transporte público?”. Na segunda etapa, elaborou-se a estratégia de busca, definindo-se descritores e operadores booleanos de forma estruturada. Considerando-se a pergunta de pesquisa formulada, os termos definidos para a pesquisa preliminar foram *transit network design* e *land use*. Assim, utilizou-se preliminarmente na estratégia de

busca, apenas estas duas palavras-chave. A busca foi realizada no título, no resumo, ou na própria relação de palavras-chave, sem nenhuma forma extra de filtragem, como por período ou natureza da publicação, por meio da expressão booleana literal: ("land use") AND ("transit network design").

A terceira etapa envolveu a escolha da base de dados mais adequada ao tema. Foi selecionada a Scopus, uma das mais amplas plataformas de resumos e citações da literatura científica revisada por pares. Sua cobertura multidisciplinar permite uma visão integrada da produção científica global, sendo especialmente forte em áreas como engenharias e ciências sociais aplicadas, o que a torna adequada para este estudo. O acesso à Scopus foi realizado por meio do Portal de Periódicos da CAPES.

Para auxiliar na análise e organização dos dados, foram utilizados os programas Zotero e VOSviewer. O Zotero foi adotado para organizar e gerenciar as referências bibliográficas, com suporte para identificação de duplicatas. O VOSviewer foi aplicado para gerar e interpretar mapas de coocorrência de palavras-chave, identificando temas recorrentes. A integração entre Zotero e VOSviewer permitiu alinhar de forma sistemática a etapa qualitativa (fichamento) e a etapa quantitativa (análise de coocorrência e redes), promovendo maior consistência metodológica ao estudo.

Pela pesquisa preliminar na base Scopus, encontrou-se 7 referências, entre artigos em periódicos, revisões e uma revisão de conferência, publicadas entre os anos de 2018 e 2022. Na revisão de conferência, as palavras-chave estavam contidas no resumo e relacionadas a artigos sobre temas distintos. Portanto, essa referência foi desconsiderada. Realizando-se uma verificação das palavras-chave das 6 referências remanescentes, utilizando-se como suporte o programa VOSviewer, encontrou-se 76 diferentes termos. Delimitando-se apenas os que se repetiram em pelo menos 2 dos artigos, encontrou-se 11 diferentes palavras-chave, conforme ilustrado na Figura 1.

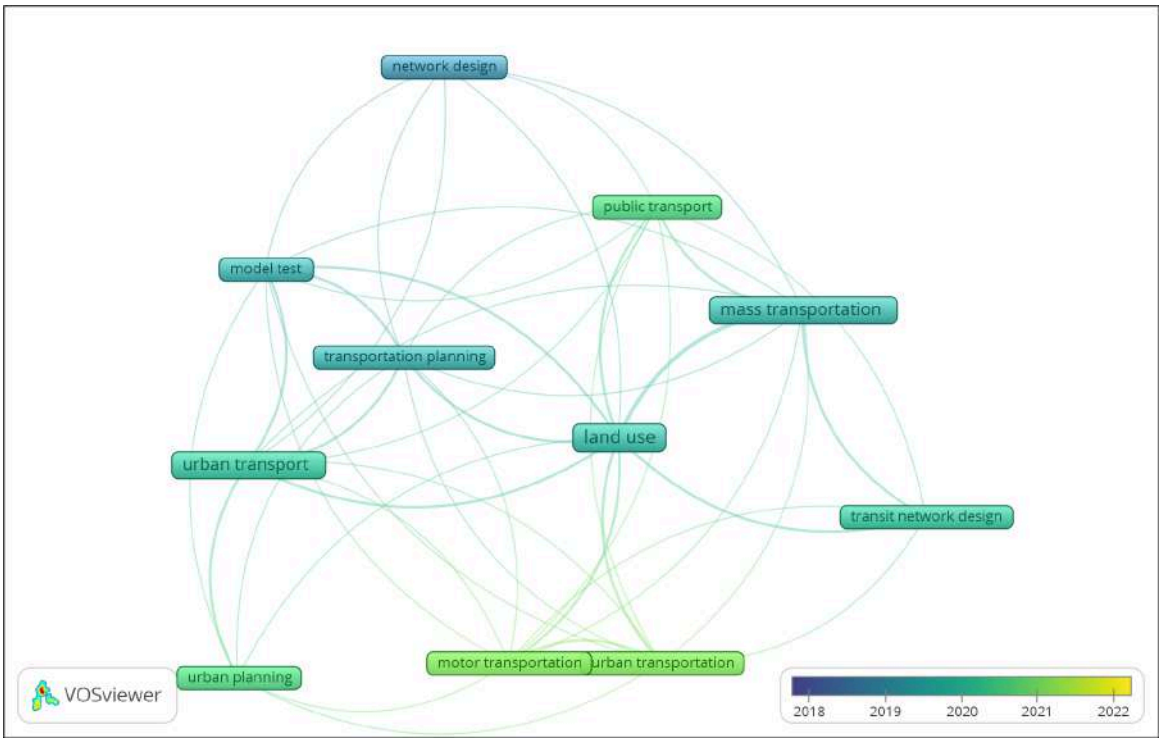


Figura 1: Representação do mapa de termos com suas ligações.

Após a busca inicial através de uma tratativa exploratória, foi feita uma segunda busca através de uma tratativa semântica, devido a ser necessário um estudo preliminar para melhor se definir as palavras-chave e expressões booleanas a serem efetivamente empregadas. Os termos encontrados podem ser divididos em três grupos maiores:(1) uso do solo; (2) transporte público, planejamento de transportes e planejamento urbano e; (3) desenho de redes.

A expressão booleana formulada, semanticamente agrupada a partir dos termos encontrados na primeira busca, foi: ("land use") AND ("public transport" OR “mass transportation” OR "transportation planning" OR "urban planning") AND ("network design" OR "transit network design"). Aplicando-se essa segunda expressão booleana na base Scopus ao título, resumo ou palavras-chave, sem nenhum outro tipo de restrição ou filtragem, seja temporal ou da natureza da fonte, encontrou-se 42 documentos.

Como a segunda expressão booleana continha dois AND e descritores distintos em relação à primeira, existia a possibilidade de haver documentos na pesquisa preliminar que não tivessem sido abrangidos na segunda pesquisa. Por isso, foi realizada uma terceira pesquisa, seguindo o mesmo procedimento realizado nas pesquisas anteriores (base Scopus sem filtragem), mas utilizando-se concomitantemente ambas as expressões booleanas concatenadas pelo operador OR. Dessa forma, a terceira expressão booleana formulada, por fim, foi: (("land use") AND ("transit network design")) OR (("land use") AND ("public transport" OR "mass transportation" OR "transportation planning" OR "urban planning") AND ("network design" OR "transit network design")). Nesta terceira pesquisa foram encontrados 44 documentos.

Assim, com esta nova base de 44 artigos definida, aplicou-se a quarta etapa: a definição dos critérios de inclusão e exclusão das referências. Optou-se por realizar uma triagem manual completa em cada artigo, sem aplicar filtros adicionais por área temática ou tipo de documento. Essa escolha se justificou pelo volume gerenciável de registros, permitindo uma avaliação criteriosa de cada item, o que minimiza o risco de excluir artigos potencialmente relevantes que, embora não mencionem explicitamente os termos buscados em título ou palavras-chave, abordam metodologias ou contextos complementares à pesquisa. Na quinta etapa, a triagem qualitativa manual, foi verificada a pertinência individual de cada um dos documentos, através da leitura dos seus títulos, resumos e palavras-chave e análise da compatibilidade dos artigos com o presente estudo.

Quatro estudos foram considerados, de fato, pertinentes ao tema abordado e passaram à sexta etapa. Seus conteúdos foram analisados, extraindo-se as informações relevantes, como objetivos, métodos e resultados, organizados por meio de uma planilha. Por fim, a análise e síntese dos resultados constituiu a sétima e última etapa do processo, na qual os dados foram organizados e interpretados de forma crítica. Esta etapa consolida o conhecimento existente e evidencia contribuições relevantes para o avanço científico e tecnológico no tema investigado, bem como as limitações encontradas nos estudos analisados e desafios que ainda precisam ser enfrentados em pesquisas futuras na área.

3. RESULTADOS

Os quatro estudos relevantes encontrados na revisão bibliográfica são artigos de periódicos, publicados no período entre 2009 e 2021, sendo que três deles foram publicados a partir de 2018. Três dos artigos apresentaram modelos de desenho de redes de transporte público que foram aplicados a estudos de casos de cidades reais, como forma de validar sua efetividade.

Barabino (2009) desenvolveu um modelo heurístico para o projeto de uma rede de rotas de ônibus urbanos, estruturado para otimizar uma função objetivo complexa, buscando a minimização dos custos totais, abrangendo tanto os custos da operadora (empresa de transporte) quanto os custos do usuário. O tempo de caminhada até o ponto de ônibus foi um dos componentes incorporados aos custos do usuário, de forma a garantir que o desenho da rede leve em consideração a acessibilidade a pé na localização das paradas. Na etapa de aquisição de dados de oferta e demanda, foi realizada a identificação dos nós propensos a gerar maior demanda graças à sua proximidade com escolas, serviços públicos etc. Assim, o modelo empregou o uso do solo como um dado de entrada para bonificar rotas que passassem por nós localizados próximos a áreas atratoras de grandes volumes de tráfego.

Em Gulhan *et al*. (2018), o desenho da rede de ônibus e medidas de acessibilidade foram integradas em um processo analítico. Os autores utilizaram medidas de acessibilidade potencial e acessibilidade baseada na utilidade no processo de investigação dos conjuntos de rotas mais eficientes através da avaliação multiobjetivo de decisões. A análise do *trade-off* entre funções objetivo convencionais em combinação com medidas de acessibilidade permitiu a obtenção de soluções que representaram os melhores compromissos entre benefício ao usuário, custos do operador e benefícios à sociedade.

Chai *et al.* (2019) desenvolveram um modelo quantitativo de desenho de rede de transporte ferroviário de passageiros urbano compatível com as características da malha viária, com os padrões de viagens estabelecidos e com o uso do solo local. O valor do desvio entre as dimensões fractais da intensidade de uso do solo e da distribuição de importância das estações candidatas foi utilizado para avaliar a adequação entre a rede e o uso do solo. Buscou-se maximizar o volume de tráfego de passageiros por unidade de comprimento da rede e minimizar o volume médio de transferências entre as linhas, empregando um algoritmo busca por vizinhança baseado no método de *simulated annealing* para resolver o problema de otimização NP-difícil.

Por último, Xu e Yan (2021) elaboraram um modelo integrado de urbanização e transporte baseado na teoria de Desenvolvimento Orientado ao Transporte (DOT) que considerou múltiplos objetivos dependentes de desenvolvimento sustentável. O modelo foi utilizado para prever a escolha de localização de estações ferroviárias de transporte de passageiros, o arranjo dos diferentes tipos de uso do solo e o desenho da rede de transportes, realizando o planejamento conjunto com otimização simultânea do uso do solo e da rede no estágio inicial do planejamento urbano. Formulado como um problema de atribuição quadrática que leva em conta tanto a atribuição de tráfego quanto o problema da divisão modal entre transporte ferroviário e rodoviário, esse modelo empregou um algoritmo de Sistema de Formigas Min-Max (MMAS) integrado aos algoritmos Frank-Wolfe e Dial para encontrar sua solução.

As aplicações dos modelos de Barabino (2009), Chai *et al.* (2019) e Xu e Yan (2021) a estudos de casos de cidades reais demonstraram suas capacidades em gerar benefícios como: propor redes de ônibus com melhor experiência do usuário e maior eficiência operacional; projetar uma rede de transporte ferroviário urbano que se integra e se harmoniza de maneira eficiente com a estrutura existente da cidade; produzir esquemas de planejamento que promovam um ambiente de vizinhança mais favorável; e aumentar a acessibilidade regional e a receita do transporte ferroviário.

A principal limitação dos modelos utilizados reside na sua abordagem estática e na simplificação da demanda, tratada como fixa, desconsiderando sua natureza elástica e dinâmica, que poderia variar significativamente em resposta às melhorias ou alterações na rede e no uso do solo. Essa simplificação pode levar a projeções imprecisas e a soluções que não se adaptam às evoluções complexas das dinâmicas urbanas, como mudanças populacionais ou valorização imobiliária. Devido à complexidade inerente de problemas NP-difíceis, os modelos dependem fortemente de algoritmos heurísticos e metaheurísticos. Embora essenciais para a viabilidade computacional, essas abordagens não garantem o atingimento de ótimos globais.

Em síntese, os estudos encontrados apresentam avanços significativos em direção à elaboração de modelos cada vez mais integrados, suportados por métricas quantitativas inovadoras e algoritmos de otimização multiobjetivo avançados, visando soluções que equilibrem eficiências operacionais com benefícios sociais e ambientais. Tais colaborações são importantes para possibilitar a concepção de redes de transporte público que se orientem não apenas em função dos maiores volumes de deslocamentos e centralidades consolidadas, mas também dos pólos de desenvolvimento emergentes e planejados que a cidade deseja incentivar, em consonância com as práticas de planejamento urbano sustentável.

4. CONCLUSÃO

Apesar de uma busca significativamente ampla, a escassez de trabalhos diretamente focados no problema a ser tratado é notável, confirmando que a área de pesquisa ainda carece de abordagens detalhadas e específicas sobre o desafio em questão, o que sublinha a relevância e a originalidade da presente investigação no avanço do conhecimento. Os trabalhos selecionados oferecem pontos fortes e *insights* valiosos, e demonstram a eficácia da integração do planejamento de transporte com o uso do solo, com a aplicação de modelos de otimização multiobjetivo e o uso de algoritmos heurísticos avançados para lidar com a complexidade inerente desses problemas.

Não obstante, as limitações dos trabalhos selecionados são igualmente importantes para a demarcação da nossa proposta. Observa-se uma tendência para a adoção de pressupostos de demanda fixa e a natureza estática do planejamento, desconsiderando a elasticidade da demanda e a dinâmica das interações uso do

solo-transporte. A dependência de heurísticas, embora necessária para a viabilidade computacional, implica em soluções que podem não atingir ótimos globais. Além disso, a subjetividade na ponderação de múltiplos objetivos e a priorização de análises estratégicas em detrimento de detalhes operacionais mais finos representam desafios a serem superados em pesquisas futuras, abrindo caminho para contribuições mais abrangentes e realistas.

Agradecimentos
Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - Brasil (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acheampong, R. A. e E. A. Silva (2015) Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions. *Journal of Transport and Land Use*, v. 8, n. 3, p. 11-38. doi:10.5198/jtlu.2015.806

Ali, N.; S. Nakayama e H. Yamaguchi (2022) A Review Study on the Historical Evolution of Different Land-use and Transport Integration (LUTI) Modeling Approaches and Future Research Challenges. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 14, p. 1125-1145. DOI: 10.11175/easts.14.1125

Barabino, B. (2009) Transit Bus Route Network Design: A model and its application in a real network. *WIT Trans. Built Environ.*, v.107, p. 369–382. DOI:10.2495/UT090331

Chai, S.; Q. Liang, Q. e S. Zhong. (2019) Design of urban rail transit network constrained by urban road network, trips and land-use characteristics. *Sustainability*, v. 11, n. 21, p. 6128–6151. DOI:10.3390/su11216128

Feng, C.-M., e J.-J. Lin (1999) Using a genetic algorithm to generate alternative sketch maps for urban planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 23, n. 2, p. 91-108. DOI:10.1016/S0198-9715(99)00004-6

Gulhan, G.; H. Ceylan e H. Ceylan (2018) Using accessibility measures in transit network design. *Transport*, v. 33, n. 2, p. 510–519. DOI:10.3846/16484142.2017.1295401

Iacono, M.; D. Levinson e A. El-Geneidy (2008) Models of Transportation and Land Use Change: A Guide to the Territory. *Journal of Planning Literature*, vol. 2, n.4, p. 323–340. DOI:10.1177/0885412207314010

Los, M. (1979) A discrete-convex programming approach to the simultaneous optimization of land use and transportation. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 13, n. 1, p. 33-48. DOI:10.1016/0191-2615(79)90005-5

Shan, L., e Z. Gao (2000) A Model of Urban Land-Use and Transportation Network Design. *Traffic and Transportation Studies*, v. 11, n. 21, p. 398–403. DOI:10.1061/40503(277)62

Wegener, M. (2004). Overview of Land-use Transport Models. *Transport Geography and Spatial Systems Handbook*, v. *5*, p. 127-146. DOI: 10.1108/9781615832538-009

Xu, H., e Y. Yan (2021) Integrated Planning Model of Land-Use Layout and Transportation Network Design for Regional Urbanization in China Based on TOD Theory. *Journal of Urban Planning and Development*, v. 147, n. 2, p. 04021013-1–04021013-14. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000676

Zhang, L.; A. Chiaradia e Y. Zhuang (2015) A Configurational Accessibility Study of Road and Metro Network in Shanghai, China. Q. Pan & J. Cao (Eds), *Recent Developments in Chinese Urban Planning*, v. 114, p. 219–245. DOI:10.1007/978-3-319-18470-8_13

Ana Luíza Mazalotti Teixeira (anamazalotti@gmail.com)
Amanda Evellyn da Silva Andrade (amandaevellyn8@gmail.com)
Narciso Ferreira dos Santos Neto (narciso.ferreira@unimontes.br)
João Batista Mendes (jbmmoc@yahoo.com.br)
Clara Gonçalves Ribeiro (clara2020flor@gmail.com)
Universidade Estadual de Montes Claros, CEAD UNIMONTES, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, Av. Prof. Rui Braga, s/n - Vila Mauriceia, Montes Claros - MG, Brasil.
Guilherme de Castro Leiva (guilherme.leiva@cefetmg.br)
Renato Guimarães Ribeiro (renato.ribeiro@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes,, Av. Amazonas, nº 5.253, Nova Suiça, Belo Horizonte, MG, Brasil.
José Luiz Lopes Teixeira Filho (jluiztx2015@gmail.com)
Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Transporte e Geotecnia, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, MG, Brasil.

ESTUDO EXPLORATÓRIO DA MATRIZ ORIGEM-DESTINO DA RMBH COM DADOS DE TELEFONIA MÓVEL: A QUESTÃO DA REPRESENTATIVIDADE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Henrique Costa Braga[1], Guilherme de Castro Leiva[1], Gray Farias Moita[1], Thiago Magela Rodrigues Dias[1], Gustavo Pimenta Cordeiro[1], Narciso Ferreira dos Santos Neto[2]
[1]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG,
[2]Universidade Estadual de Montes Claros - UNIMONTES

RESUMO
O uso de dados de telefonia móvel para a construção de matrizes origem-destino (OD) tem se consolidado como uma alternativa promissora às tradicionais pesquisas domiciliares, especialmente em função de sua ampla cobertura espacial e temporal. No entanto, entre pontos a serem mais bem discutidos, permanecem importantes desafios metodológicos relacionados à representatividade estatística desses dados. Este trabalho apresenta um estudo exploratório da matriz OD construída para a Região Metropolitana de Belo Horizonte. São discutidas algumas potencialidades dessa base bem como algumas de suas limitações, com destaque para a dificuldade em segmentar adequadamente a amostra por características sociodemográficas - o que compromete sua expansão e análise em termos populacionais. Defende-se que, apesar do grande volume de dados disponíveis, a ausência de representatividade amostral estruturada limita seu uso como única fonte para fins de planejamento. Assim, especificamente para a matriz OD pesquisada, a discussão propõe a necessidade da complementaridade entre métodos diversos, visando garantir maior robustez às análises de mobilidade urbana.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a intensificação do processo de urbanização e a crescente complexidade dos deslocamentos nas regiões metropolitanas têm exigido novas abordagens para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana. Para que o planejamento dos sistemas de transporte, a organização do território e a promoção do acesso equitativo aos serviços urbanos sejam eficazes, torna-se indispensável compreender os padrões cotidianos de deslocamento da população. Nesse contexto, as matrizes origem-destino (OD) assumem um papel estratégico, ao representarem os fluxos espaciais de pessoas ou mercadorias entre diferentes zonas geográficas, servindo de base analítica para diagnósticos e intervenções técnicas.

A matriz OD é uma ferramenta essencial no planejamento e na modelagem dos sistemas de transporte urbano, pois descreve quantitativamente os fluxos de deslocamento entre diferentes zonas geográficas de uma área urbana. Tradicionalmente, sua construção é realizada por meio de pesquisas domiciliares, que, embora demandem recursos significativos — resultando em baixa frequência de atualização e limitação da cobertura temporal, fornecem dados detalhados e segmentados sobre os padrões de mobilidade da população.

Nos últimos anos, contudo, tem crescido o interesse no uso de dados digitais passivos, especialmente aqueles gerados pelas redes de telefonia móvel. Dentre eles, destacam-se os registros de detalhes de chamadas – *Call Detail Records* (CDRs), que, por sua natureza automatizada e ampla cobertura, oferecem grande potencial para estudos de mobilidade. Esses registros são gerados pelas operadoras sempre que há alguma modalidade de interação com a rede celular, armazenando, de forma anonimizada, informações sobre a localização dos dispositivos ao longo do tempo. Isso, em tese, viabilizaria a reconstrução de trajetórias e padrões de deslocamento, com alto nível de detalhe tanto espacial quanto temporal, possibilitando análises precisas da mobilidade.

Entretanto, devido à necessidade de respeito à privacidade individual das pessoas, conforme exigido pela LGPD – Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (Brasil, 2018), os dados originais são tratados, tendo sua precisão teoricamente reduzida com o objetivo de anonimizar as informações e impedir o acesso a dados pessoais explícitos. Assim, a matriz origem-destino obtida de dados de telefonia móvel (ODT) configura-se como uma fonte secundária de dados, sendo a fonte primária totalmente sigilosa. O tratamento prévio aplicado na geração da matriz ODT é de tal ordem que muitas de suas informações podem perder relevância estatística, além de limitar sua granularidade espacial e temporal. Apesar disso, a matriz ODT ainda se mantém como uma ferramenta promissora de apoio ao planejamento da mobilidade urbana.

Nesse sentido, foi construída, para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), uma matriz ODT. A RMBH é composta por 34 municípios, incluindo a capital, Belo Horizonte, abrangendo uma área de 14.978,6 km² e uma população total de 5.733.783 habitantes (IBGE, 2023), sendo a terceira maior região metropolitana

do Brasil em população e de grande importância estratégica no contexto nacional. Os dados utilizados foram disponibilizados pela Secretaria de Estado de Infraestrutura de Minas Gerais (SEINFRA) e estão acessíveis no site: https://www.agenciarmbh.mg.gov.br/pesquisa-od/ (acesso em 09/06/2025).

A matriz ODT gerada oferece diversas informações relevantes sobre a mobilidade urbana na RMBH. No entanto, devido a algumas das limitações já apresentadas, apresenta restrições importantes — como a ausência de dados diretos sobre a divisão modal. Diante disso, torna-se fundamental uma discussão crítica tanto de suas potencialidades quanto de suas limitações. Este trabalho concentra-se especialmente na questão da representatividade estatística dos dados populacionais utilizados, aspecto essencial para que a matriz possa ser adequadamente interpretada e empregada como subsídio técnico ao planejamento urbano e de transportes.

2. METODOLOGIA

Este trabalho adota uma abordagem exploratória e comparativa entre os resultados de duas matrizes origem-destino da RMBH: a matriz OD convencional, obtida por pesquisa domiciliar amostral em 2012, e a matriz ODT, construída a partir de dados de telefonia móvel referentes aos anos de 2019 e 2021. A análise baseou-se em documentos técnicos públicos, bem como nos próprios conjuntos de dados disponíveis. Para a matriz ODT, foram inspecionadas as variáveis disponibilizadas, com o objetivo de caracterizar aspectos relacionados à sua granularidade, estrutura de agregação e método de inferência dos deslocamentos. As matrizes foram comparadas quanto à segmentação amostral, possibilidade de expansão estatística, cobertura sociodemográfica e detalhamento modal, com ênfase na discussão sobre a representatividade dos dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Levantamento Convencional da Matriz Origem-Destino

Tradicionalmente, a obtenção da matriz origem-destino é realizada por meio de pesquisas domiciliares que, embora demandem elevados recursos, fornecem dados detalhados sobre os padrões de mobilidade da população.

Nessas pesquisas, a área de estudo é dividida em zonas de tráfego, sendo selecionada uma amostra representativa de domicílios para entrevistas presenciais. Durante essas entrevistas, os moradores relatam todas as viagens realizadas no dia anterior, incluindo horários, modos de transporte, motivos, origens e destinos. Os dados são posteriormente expandidos estatisticamente para representar a totalidade da população da área estudada.

Um exemplo notável desse tipo de levantamento é a Pesquisa Origem-Destino realizada na RMBH em 2012, coordenada pela Agência de Desenvolvimento da RMBH (ADRMBH, 2013). A pesquisa coletou dados de aproximadamente 0,5% da população da região, abrangendo cerca de 1.288 áreas homogêneas. Os resultados indicaram um índice de mobilidade de 2,03 viagens por habitante por dia, totalizando cerca de 9,8 milhões de viagens diárias. A divisão modal observada foi de 41% para modos individuais, 32% para transporte coletivo e 27% para modos não motorizados.

Apesar de sua robustez metodológica, as pesquisas OD domiciliares enfrentam desafios relevantes, como altos custos - a de 2012 teve custo estimado de R$ 4 milhões (ADRMBH, 2022), longos prazos de execução e dependência da qualidade das respostas fornecidas pelos entrevistados. Tais limitações têm impulsionado a busca por métodos alternativos de coleta de dados, como registros de bilhetagem eletrônica, dados de telefonia móvel e informações oriundas de aplicativos de mobilidade.

3.2. Levantamento a partir de Dados de Telefonia Móvel

A matriz ODT da RMBH foi construída a partir de dados da operadora Vivo (controlada pela Telefónica Digital España), referentes aos anos de 2019 e 2021, em uma iniciativa conduzida pela própria empresa. A Vivo possuía, à época, o maior *market share* na região do DDD 31 (41,3%), o que a torna uma fonte relevante de dados de mobilidade (Telefonica, 2021). O custo declarado para a elaboração da matriz ODT foi de R$ 400 mil por ano, totalizando R$ 800 mil (ADRMBH, 2022).

Para essa finalidade, foi utilizada a plataforma LUCA Transit, desenvolvida pela própria Telefónica. Esta

ferramenta, baseada em infraestrutura de *big data*, já tem sido utilizada por instituições públicas e organismos multilaterais para análises de mobilidade urbana e formulação de políticas públicas (BID, 2017). A plataforma realiza análises de eventos de rede para estimar estadias, viagens e fluxos entre zonas de forma anônima e agregada, possibilitando a construção de matrizes OD. Segundo os desenvolvedores, parte da metodologia adotada baseou-se nos trabalhos de Tolouei *et al*. (2015) e Duduta *et al*. (2016).

Embora tenha possibilitado análises valiosas sobre padrões de deslocamento, a matriz ODT não foi capaz de fornecer, por si só, a divisão modal dos transportes — uma limitação importante frente à pesquisa convencional de 2012.

3.3. A matriz ODT

O conjunto de dados em análise que compõem a matriz ODT disponibilizada conta com um total de 9.353.982 linhas (ou registros) com 11 colunas cada, tendo aproximadamente 748 Megabytes de memória. Cada registro (linha) não representa um único usuário, mas sim um conjunto de usuários agregados para garantir a privacidade dos indivíduos. A Tabela 1 ilustra o trecho inicial e final desta matriz ODT.

Tabela 1: Trechos ilustrativos da matriz Origem-Destino obtida por dados de telefonia móvel da RMBH.

Nº	ZE		Renda (SM)	Idade (anos)	Hora		Motivo	População	Tipo dia	Período
	Origem	Destino			Início	Fim				
0	1	1	≤ 1	18-29	7	7	TE-outros	10	dia útil	maio 2021
1	1	1	≤ 1	18-29	8	9	TE-outros	10	domingo	maio 2021
2	1	1	≤ 1	18-29	14	14	outros -TE	10	dia útil	maio 2021
3	1	1	≤ 1	18-29	16	17	outros-outros	10	feriado	maio 2021
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9.353.978	393	392	5-10	60+	7	7	outros -TE	10	dia útil	nov. 2019
9.353.979	393	392	5-10	60+	8	8	outros -TE	10	dia útil	nov. 2019
9.353.980	393	392	5-10	60+	8	10	outros -TE	10	dia útil	nov. 2019

Legenda: TE – trabalho/estudo; SM – salário-mínimo; ZE – Zona de Estudo.

A primeira coluna indica um identificador sequencial. As colunas seguintes informam: a zona de origem e a de destino (códigos de 1 a 393), definidas com base no uso do solo e perfil sociodemográfico. A distribuição dessas zonas é desigual — por exemplo, Belo Horizonte possui 165 zonas densamente povoadas, enquanto municípios menos populosos como Confins ou Rio Acima são representados por apenas uma zona.

A quarta e quinta colunas contêm, respectivamente, a faixa de renda (segundo o Censo 2010, em oito categorias de salários-mínimos) e a faixa etária (dividida em cinco grupos: 18–29, 30–39, 40–49, 50–59 e 60+ anos). As colunas seis e sete indicam os horários de início e término da viagem, expressos em faixas horárias de uma hora.

A oitava coluna classifica o motivo do deslocamento, com base em sete combinações entre as categorias "domicílio", "trabalho/estudo" e "outros", inferidas a partir de padrões de permanência. Apenas viagens com distância superior a 500 metros e tempo mínimo de permanência de 30 minutos foram consideradas. A nona coluna indica o volume de viagens com os mesmos atributos, com variação de 10 a 7.391. As colunas finais referem-se ao tipo de dia (útil, sábado, domingo ou feriado) e ao período da coleta (1-20/novembro/2019 e 1-20/maio/2021).

3.4. A questão da representatividade estatística

Nas pesquisas OD convencionais, a amostragem é controlada e estruturada com base em planos amostrais

estratificados, considerando zonas geográficas e variáveis sociodemográficas como renda, idade, gênero, escolaridade e posse de veículos. Embora a cobertura direta tenha sido pequena (cerca de 0,5%), a segmentação planejada garante uma expansão estatística com alto grau de confiança, permitindo inferências com foco em equidade territorial, acessibilidade e inclusão.

Nas matrizes ODT, apesar do grande volume de registros, não há controle sobre a composição da amostra. Os dados refletem apenas comportamentos captáveis por dispositivos móveis com chips ativos e corretamente registrados, o que introduz vieses significativos. Grupos como idosos, populações vulneráveis e trabalhadores informais tendem a ser sub-representados – ou mesmo não representados (caso da população menor de idade), comprometendo análises voltadas à justiça espacial.

Além disso, a classificação funcional das zonas da matriz ODT da RMBH se baseia apenas em padrões de permanência temporal: "domicílio" é definido como o local de maior permanência entre 22h e 6h; "trabalho/estudo", entre 9h e 15h – com no mínimo 3 horas de permanência; os demais são classificados como "outros". Essa simplificação dificulta a análise de mobilidades não convencionais (como de cuidadores, entregadores ou trabalhadores por turnos) e exclui deslocamentos curtos, ainda que urbanamente significativos.

Assim, apesar da grande quantidade de dados, a ausência de segmentação sociodemográfica e de plano amostral dificulta a expansão estatisticamente válida dos dados ODT. Em contrapartida, a matriz OD convencional, ainda que baseada em uma amostra menor, possui estrutura mais robusta e interpretável.

Dessa forma, defende-se que a qualidade e a representatividade da amostra — do ponto de vista estatístico e social — são muito relevantes, até mesmo superando a questão da quantidade bruta de dados.

3.5. Soluções possíveis

Apesar das questões apontadas, pode-se pensar em várias possibilidades de soluções. Uma primeira alternativa consiste na utilização de bases de dados complementares já existentes, como a matriz OD derivada da bilhetagem eletrônica, entre outras, a fim de suprir lacunas da matriz ODT sem necessidade de coletas adicionais. Outra possibilidade seria a aplicação simultânea de uma pesquisa domiciliar simplificada complementar a obtenção da matriz ODT, o que poderia permitir a calibração da expansão amostral e o enriquecimento das análises.

Por fim, uma terceira via seria a construção de uma nova matriz ODT, mas com granularidade espacial e temporal mais refinada do que a utilizada em 2019 e 2021, seguindo padrões já estabelecidos e bem documentados (Elias *et al*., 2016). Contudo, essa opção exige maior debate técnico e jurídico, especialmente em função das restrições impostas pela LGPD.

4. CONCLUSÃO

A representatividade estatística dos dados constitui uma questão central na avaliação da utilidade e confiabilidade das matrizes de deslocamento urbano. Nesse contexto, observa-se a superioridade metodológica da matriz origem-destino (OD) convencional da RMBH de 2012 — construída a partir de pesquisas domiciliares amostrais — em relação à matriz OD elaborada com base em dados de telefonia móvel (ODT) referentes aos anos de 2019 e 2021.

Tal constatação não decorre apenas da tradição associada ao método convencional, mas se fundamenta na robustez estatística proporcionada pela segmentação controlada da amostra, por sua estruturação explícita e pela possibilidade de expansão proporcional dos dados à população total. Em contrapartida, embora a matriz ODT ofereça elevada granularidade espacial e temporal, sua construção a partir de registros passivos e anônimos dificulta a obtenção de uma amostra socialmente representativa, limitando seu uso em análises voltadas à equidade territorial e ao planejamento inclusivo.

Ainda assim, o potencial técnico da matriz ODT não deve ser desconsiderado. Soluções metodológicas — como o uso de bases complementares, a realização de levantamentos amostrais simplificados ou a produção de matrizes com maior resolução espacial e temporal — podem contribuir para mitigar as limitações identificadas. Diante de seu baixo custo, alta frequência de atualização e ampla cobertura, a matriz ODT

justifica esforços contínuos de aperfeiçoamento metodológico, com vistas a torná-la uma ferramenta complementar — e potencialmente integradora — no planejamento da mobilidade urbana.

Apesar das relevantes informações fornecidas pela matriz OD por telefonia da RMBH, pode-se considerar que, por tratar-se de uma experiência inédita e ainda em fase exploratória — com limitações metodológicas reconhecidas — sua aplicação prática ocorreu essencialmente como complemento às bases tradicionais, e não como substituição imediata das pesquisas domiciliares existentes.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo auxílio financeiro prestado no âmbito do Edital Nº006/2024 - Processo APQ-04889-24.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMBH - Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte (2013). Relatório Completo da Pesquisa Origem-Destino 2012. Belo Horizonte: Agência RMBH.

ARMBH - Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte (2022a). Relatório de Gestão 2019-2022. Belo Horizonte: ARMBH. Disponível em https://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2023/05/relatorio_gestao_armbh_2019_2022_compressed-1.pdf. Acesso em: 12/maio/2025.

ARMBH - Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte (2022b). Relatório de Metodologia e Resultados OD RMBH: desenvolvimento de uma matriz origem/destino com dados de telefonia móvel para a Região Metropolitana de Belo Horizonte. Disponível em: https://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/08/Relatorio-Matriz-OD-2019_2021-RMBH-novo.pdf. Acesso em: 12/maio/2025.

BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento (2017). Big data para o desenvolvimento urbano sustentável. Washington, D.C.: BID. Disponível em: https://publications.iadb.org/publications/portuguese/document/Big-Data-para-o-desenvolvimento-urbano-sustentavel.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

Brasil. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais. Dispõe sobre a proteção de dados pessoais e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 15 ago. 2018. Seção 1, p. 1. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-13.709-de-14-de-agosto-de-2018-168157758. Acesso em: 12/maio/2025.

Duduta, N.; Mchugh, T.; Corby, N.; Jacobs, S. R.; Uk, l. (2016). Development of a Trip Information System for Highways England Using Telefonica / O2 Mobile Phone Data. In: European Transport Conference. 2016. Disponível em: https://aetransport.org/public/downloads/qezZI/4881-57cc1994928f0.pdf. Acesso em 13/maio/2025.

Elias, D.; Nadler, F.; Stehno, J.; Krösche, J.; Lindorfer, M. (2016). SOMOBIL – improving public transport planning through mobile phone data analysis. Transportation Reseach Procedia, v. 14, p. 4478-4485. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.370.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). Cidades e Estados: Belo Horizonte. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-horizonte.html. Acesso em: 27 maio 2025.

Tolouei, R.; Alvarez, P.; Duduta, N. (2015). Developing and verifying Origin-Destination matrices using mobile phone data: the LLITM case. In: European Transport Conference, 24 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/293605701_Developing_and_verifying_OriginDestination_matrices_using_mobile_phone_data_the_LLITM_case. Acesso em 13/maio/2025.

Henrique Costa Braga (henriquebraga@cefetmg.br)
Guilherme de Castro Leiva (guilherme.leiva@cefetmg.br)
Thiago Magela Rodrigues Dias (thiagomagela@cefetmg.br)
Gray Farias Moita (gray@cefetmg.br)
Gustavo Pimenta Cordeiro (gustavopimenta90@gmail.com)
Departamento de Engenharia de Transportes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, 30510-000, Brasil.
Narciso Ferreira dos Santos Neto (narciso.ferreira@unimontes.br)
Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, Universidade Estadual de Montes Claros, Campus Universitário Prof. Darcy Ribeiro, Av. Prof. Rui Braga, s/n - Vila Mauricéia, Montes Claros - MG, 39401-089, Brasil.

EXISTE ASSIMETRIA NA PERCEPÇÃO DA CAMINHABILIDADE? UM ESTUDO A PARTIR DE VÍDEOS 2D E REALIDADE VIRTUAL IMERSIVA

Giovana Facchini[1], Ana Margarita Larranaga[1], Mariana Lovato dos Santos[1], Fernanda Abreu[1], Raul Motta[1], Julián Arellana[2], Juan Antonio Carrasco[3], Daniel Oviedo[4]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Universidad del Norte,
[3]Universidad de Concepción, [4]University College London

RESUMO
Este estudo analisa a existência de valoração assimétrica na percepção da caminhabilidade, utilizando vídeos 2D e tecnologias de realidade virtual assim como quantifica o impacto de melhorias e pioras nos atributos urbanos. Para isso, é utilizado um experimento OFAT (*one factor at a time*) no qual apenas um atributo era alterado por vez. Os participantes atribuíram notas a diferentes cenários, e os dados foram analisados por meio de modelos logit ordenados. Os resultados indicaram assimetria na avaliação da caminhabilidade: pioras foram mais penalizadas do que melhorias, em linha com o conceito de aversão à perda da Teoria da Perspectiva. Vídeos e realidade virtual apresentaram padrões semelhantes, destacando condições das calçadas, segurança pública e atratividade como os atributos mais relevantes. A realidade virtual intensificou a percepção das perdas, especialmente em relação à segurança e às calçadas. Evitar deteriorações visíveis pode ter mais impacto do que promover melhorias pontuais, especialmente em contextos urbanos da América Latina.

1. INTRODUÇÃO

A caminhabilidade corresponde à capacidade do ambiente urbano de favorecer o deslocamento a pé, sendo influenciada por atributos físicos do ambiente construído, como conectividade viária, densidade residencial, uso do solo misto e qualidade das calçadas, assim como por aspectos relacionados à segurança pública e viária. A avaliação do efeito desses atributos sobre o comportamento do pedestre - medido como frequência de viagens a pé, escolha de caminhar, indicadores de caminhabilidade objetiva ou percebida - é frequentemente realizada utilizando modelos de regressão, modelos de escolha discreta e outras abordagens quantitativas como análises multivariadas e espaciais (Tiang e Ewing, 2017; Larranaga *et al*., 2018; Wang e Yang, 2019; Arellana *et al*., 2020,). A abordagem tradicional adotada na maioria dos estudos assume efeitos simétricos dos atributos. Isso significa que uma melhoria e uma piora de mesma magnitude são consideradas como tendo impactos equivalentes, mas em direções opostas. Mesmo modelos de escolha com especificações mais avançadas frequentemente mantêm essa premissa. No entanto, uma ampla literatura tem demonstrado evidências de efeitos assimétricos, frequentemente associados à aversão à perda, um conceito central da Teoria da Perspectiva, desenvolvida por Kahneman e Tversky (2013) no campo da economia comportamental.

No contexto da caminhabilidade, embora ainda existam poucos estudos, os que foram realizados têm evidenciado a existência de assimetrias nas percepções e nos impactos dos atributos urbanos. Larranaga *et al.* (2018), por exemplo, aplicaram a técnica de *best–worst scaling* para analisar barreiras e incentivos à caminhabilidade em Porto Alegre (Brasil), identificando diferenças significativas entre a avaliação de melhorias e pioras nos atributos do ambiente construído. Os resultados mostraram que características positivas, como boa conectividade e pavimento adequado, segurança pública e de tráfego exerceram impactos mais intensos do que as características negativas equivalentes. De forma complementar, Ruiz-Padillo *et al.* (2022) aplicaram a mesma técnica em cidade brasileira de menor porte (Cachoeira do Sul, Brasil), revelando que os atributos atuam de modo desigual como incentivos ou barreiras, e que simulações de investimentos públicos geram resultados distintos ao remover impedimentos ou agregar incentivos ao caminhar. O estudo de Dong *et al.* (2019), realizado em Harbin (China), estimou modelos de *machine learning* para avaliar a importância relativa de diversos atributos de caminhabilidade. Os autores também identificaram assimetrias, neste caso relacionadas à satisfação do pedestre: certos atributos, quando ausentes, geram insatisfação, mas, quando presentes, produzem ganhos limitados. Esses resultados sugerem que ganhos e perdas associados aos atributos urbanos podem ser avaliados de forma distinta. O conceito de aversão à perda reforça essa ideia e, mais ainda, indica que as pessoas tendem a penalizar mais intensamente as perdas do que valorizar os ganhos.

Diante disso, é importante aprofundar a compreensão sobre a existência dessa assimetria na avaliação de caminhabilidade, especialmente no que se refere ao impacto diferencial de melhorias e pioras nos atributos urbanos. O objetivo deste estudo é avaliar, por meio de vídeos 2D e realidade virtual, a existência de valoração assimétrica na percepção da caminhabilidade. Ainda, busca-se quantificar o impacto de melhorias e pioras nos atributos urbanos, comparando os resultados obtidos com diferentes métodos de coleta de dados. A partir de um projeto experimental simples e de análises diretas, viáveis em qualquer *software* estatístico, pretende-se oferecer subsídios práticos e acessíveis para apoiar gestores públicos na priorização de melhorias urbanas.

Este estudo contribui para a literatura em três aspectos principais. Primeiro, ao permitir a compreensão e quantificação da assimetria na valoração de elementos urbanos que afetam a caminhabilidade. Trata-se de um tema ainda pouco explorado, mas com implicações diretas para a efetividade das intervenções urbanas. Segundo, ao possibilitar a identificação dos atributos que geram maior impacto positivo ou negativo na percepção dos pedestres. Isso é feito por meio de uma abordagem metodológica mais simples em comparação aos tradicionais experimentos de preferência declarada e modelos de escolha discreta. Embora essa abordagem não permita estimar *trade-offs* nem interações entre atributos, ela se mostra especialmente útil em estudos exploratórios e em contextos com restrições técnicas. Terceiro, destaca-se o uso de vídeos e tecnologia de realidade virtual imersiva, que oferece uma experiência mais realista. Enquanto os modelos tradicionalmente utilizados na literatura são baseados em questionários e dados observacionais em campo, avanços recentes incorporam o uso de cenários simulados e tecnologias imersivas. Exemplo disso são os estudos realizados por Facchini *et al.* (2025), Liao *et al.* (2022) e Kasraian *et al*. (2021) que mostram o poder do uso de vídeos 2D e ambientes de realidade virtual para representar características urbanas, aproximando a percepção dos participantes das condições reais de caminhada.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para avaliar o impacto dos atributos urbanos na percepção de caminhabilidade foi elaborada uma pesquisa experimental utilizando cenários 2D e de realidade virtual imersiva. A pesquisa seguiu um delineamento do tipo *One Factor at a Time* (OFAT), no qual os participantes atribuíram notas a diferentes cenários em que apenas um atributo era alterado por vez, enquanto os demais permaneciam constantes em seu nível base. Essa abordagem simplificada permite estimar de forma objetiva o efeito de cada melhoria, facilitando sua aplicação por gestores públicos na priorização de intervenções.

Os atributos utilizados foram definidos com base em Facchini *et al.* (2025), que modelou cenários fictícios para avaliar o uso de realidade virtual em estudos de caminhabilidade. Foram considerados cinco atributos: condições das calçadas (largura e pavimento), segurança viária, segurança pública, destinos e atratividade. O cenário base foi desenvolvido para representar uma via do Centro de Porto Alegre, permitindo que os voluntários se imaginassem caminhando nesse ambiente. A modelagem visual foi realizada no *software Twinmotion* a partir de imagens do *Google Street View*, incorporando edificações e elementos urbanos típicos da cidade, como um ônibus do município. Os níveis bom e ruim foram definidos melhorando e piorando cada atributo a partir do nível base (regular). Um grupo focal foi realizado com 27 participantes para validar os vídeos e avaliar potenciais melhorias. Os resultados indicaram que, na maioria dos casos, as diferenças entre os cenários foram percebidas, independentemente do dispositivo de exibição (TV, monitor ou smartphone) ou do formato de apresentação (vídeos individuais ou pareados). No entanto, foram sugeridas melhorias relacionadas à representação da segurança pública. Após ajustes, os níveis finais foram definidos conforme exibido na Tabela 1.

Tabela 1: Atributo, fatores e níveis

Atributo	Fatores	RUIM	REGULAR	BOM
Condições das calçadas	Largura da calçada	Estreita (1,5 m)	Regular (3 m)	Larga (5 m)
	Qualidade do pavimento	Pavimento irregular	Pavimento médio	Pavimento bom
Segurança viária	Velocidade dos veículos	60 km/h	50 km/h	25 km/h
	Fluxo de tráfego	70%	25%	5%
	Faixas de pedestres	Não	Sim	Sim (com faixa elevada)
	Semáforos e placas	Não	Sim	Sim
Segurança pública	Fluxo de pedestres	0%	10%	20%
	Presença de guardas/polícia	0	0	2 guardas e 1 viatura policial
	Iluminação pública	Postes no início e fim da quadra	Postes no início, meio e fim da quadra	Postes e iluminação dos prédios
Destinos	Densidade comercial /institucional	Apenas residencial	Duas edificações comerciais	8 a 9 edifícios comerciais e institucionais
	Pontos de transporte público	Não	Sim	Sim
Atratividade	Presença de árvores	Não	Algumas árvores	Muitas árvores
	Estética das construções e rua	Ruim, deteriorada	Regular	Boa
	Limpeza	Muito suja	Um pouco suja	Limpa, com lixeiras

Os cenários foram construídos em dois formatos (i) vídeos 2D, com animações que simulam a caminhada sob a perspectiva do pedestre, destinados à coleta online (exemplo na Figura 1); e (ii) realidade virtual (RV), com

cenários imersivos apresentados por meio de óculos de RV em laboratório, visando proporcionar uma experiência mais realista e envolvente. O questionário foi estruturado para que os participantes avaliassem o cenário base e, em seguida, os cenários melhorados e piorados. Após visualizar cada cenário, os participantes atribuíram uma nota de 1 (muito ruim) a 10 (excelente) a cada cenário, refletindo sua avaliação da experiência de caminhar pela rua exibida. Em ambos os formatos, os participantes não foram informados sobre qual atributo específico havia sido alterado, recebendo apenas a orientação de que os cenários simulavam melhorias ou pioras em alguma característica. No total, foram coletadas 625 respostas na pesquisa online, sendo 40 desses voluntários para a etapa imersiva no laboratório.

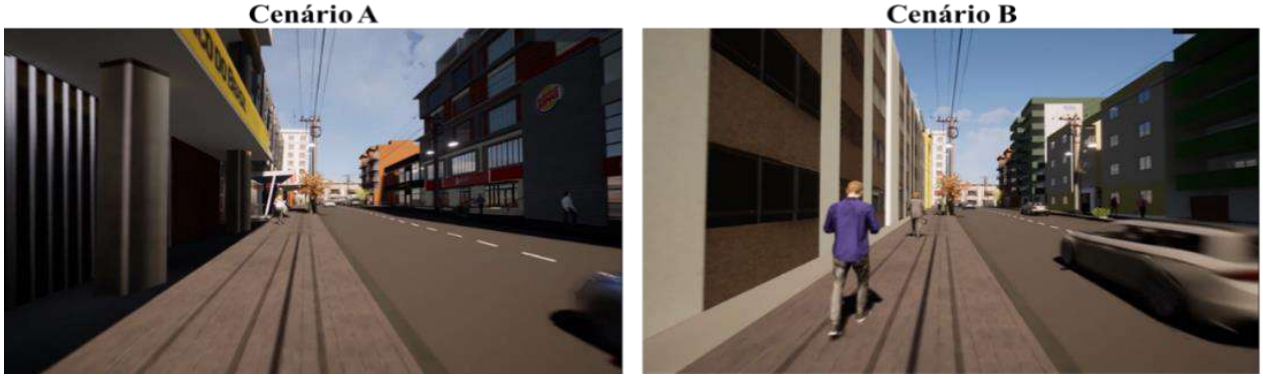


Figura 1: Exemplo dos cenários apresentados (link para acesso aos vídeos)

A análise dos dados coletados foi realizada em duas etapas: (i) análise descritiva com aplicação de testes de hipóteses; e (ii) modelagem estimando modelos logit ordenados. Na primeira etapa, foram comparadas as notas atribuídas aos cenários melhorados e piorados em relação ao cenário base, com o objetivo de identificar possíveis diferenças sistemáticas. A análise foi realizada separadamente para os dados obtidos por vídeo (grupo G1, $n = 625$) e para aqueles coletados de forma imersiva com óculos de realidade virtual (grupo G2, $n = 40$). Para cada participante, foram calculadas as variações percentuais entre os cenários alterados e o base. Em seguida, foi calculada a média dessas variações por atributo e por grupo. Essa etapa permitiu verificar o impacto da experiência imersiva na avaliação dos atributos da caminhabilidade urbana. Foram realizados testes estatísticos pareados para verificar se as diferenças observadas eram estatisticamente significativas. Inicialmente, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade das diferenças. Quando a distribuição foi normal, utilizou-se o teste *t* pareado; nos demais casos, aplicou-se o teste de Wilcoxon. As comparações estatísticas foram realizadas para os pares “Base × Melhorado” e “Base × Piorado”.

Na segunda etapa, foram estimados modelos logit ordenados acumulativos para cada conjunto de dados (vídeo e realidade virtual), com o objetivo de aprofundar a investigação dos efeitos observados. Melhorias e pioras foram consideradas como variáveis explicativas distintas representadas por *effect codes*, permitindo testar a existência de efeitos assimétricos. A estimação foi realizada no ambiente R, utilizando a função polr() do pacote MASS. O modelo assume uma variável latente contínua influenciada pelos atributos do cenário, cuja relação com a nota atribuída (escala de 1 a 10) é definida por limiares ordenados (Hensher e Greene, 2011). A partir das probabilidades previstas, foi calculada a nota esperada para cada cenário. A comparação entre o cenário base e os cenários com alterações isoladas ou combinadas nos atributos permitiu quantificar o impacto percebido de cada mudança na avaliação da caminhabilidade.

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados da análise estatística, mostrando as variações percentuais nos cenários melhorados e piorados por atributo e por grupo pesquisado. O primeiro resultado observado é que as melhorias e pioras representadas nos vídeos (G1) e RV (G2) foram efetivamente percebidas pelos participantes, tendo em vista as variações observadas nas comparações com o cenário base. Foi identificada uma clara assimetria na avaliação de cenários, com maior sensibilidade às perdas do que aos ganhos nas condições urbanas simuladas, com variações nas notas dos cenários piorados entre -6 e -42% e nos cenários melhorados entre 0,45 e 17%. Os testes estatísticos para a comparação entre os cenários piorados e o cenário base mostraram diferenças estatisticamente significativas para todas as características avaliadas em ambos os grupos (p-valor < 0.05). Já na comparação entre os cenários melhorados e o cenário base, não foram estatisticamente significativas as variações em *Segurança viária* no G1 e *Segurança pública* no G2.

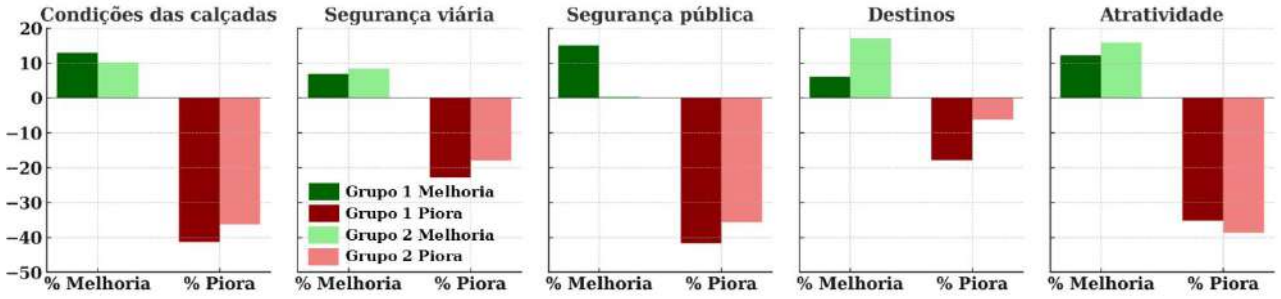


Figura 2: Comparações percentuais Melhorado x Base e Piorado x Base

Segurança pública foi o atributo que apresentou a maior penalização e maior valorização para o G1 (-42% e 15%). No G2, a penalização foi alta (-36%), mas a valorização foi de apenas 0,45%, indicando que as melhorias aplicadas no cenário mais seguro durante a experiência imersiva podem não ter sido facilmente identificadas. Entretanto, os resultados dos cenários piorados apontam para uma elevada sensibilidade em relação à percepção de insegurança durante a caminhada. *Condições das calçadas* e *Atratividade* também apresentaram grandes variações nas notas, tanto na melhoria como na piora.

Destinos apresentou resultados controversos, com maior valorização no G2 e maior penalização no G1, com uma diferença de mais de 11% entre os dois grupos em ambas as comparações. Esse resultado pode estar relacionado à maior sensação imersiva (visualização 360º) que permitiu perceber com mais detalhes a maior densidade de destinos, potencializando a valorização da nota quando há melhoria. Quando há piora, o resultado não é potencializado pois ainda há presença desses elementos que se destacam visualmente. Por outro lado, a ausência da noção de profundidade e percepção espacial nos vídeos 2D causa o efeito contrário, tornando mais saliente a ausência de destinos e resultando em uma penalização mais acentuada.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos modelos logit ordenados para os dois grupos. Com base nesses resultados, a Figura 3 apresenta os ganhos e perdas nas notas esperadas em relação ao cenário base previstos pelos modelos para diferentes cenários de melhoria e piora urbana, a partir das notas atribuídas em ambos os formatos de coleta de dados.

Tabela 2: Resultados dos Modelos Logit Ordenados

Variável	Vídeos 2D (G1)		Realidade Virtual (G2)	
	Coef.	t-valor	Coef.	t-valor
Condições das calçadas - melhora	0,543	5,197	0,870	2,129
Condições das calçadas - piora	-3,321	-30,160	-3,430	-7,894
Segurança viária - melhora	-0,074	-0,719	0,432	1,080
Segurança viária - piora	-2,187	-20,556	-1,815	-4,259
Segurança pública - melhora	0,371	3,595	-0,623	-1,557
Segurança pública - piora	-3,368	-30,683	-3,518	-7,884
Destinos - melhora	-0,322	-3,156	1,237	2,998
Destinos - piora	-1,987	-18,845	-0,792	-1,944
Atratividade - melhora	0,138	1,352	1,085	2,673
Atratividade - piora	-3,082	-28,409	-3,726	-8,484
Log-verossimilhança	-13.281,100		-765,506	
AIC	26.600,110		1569,012	
BIC	26.729,980		1646,661	

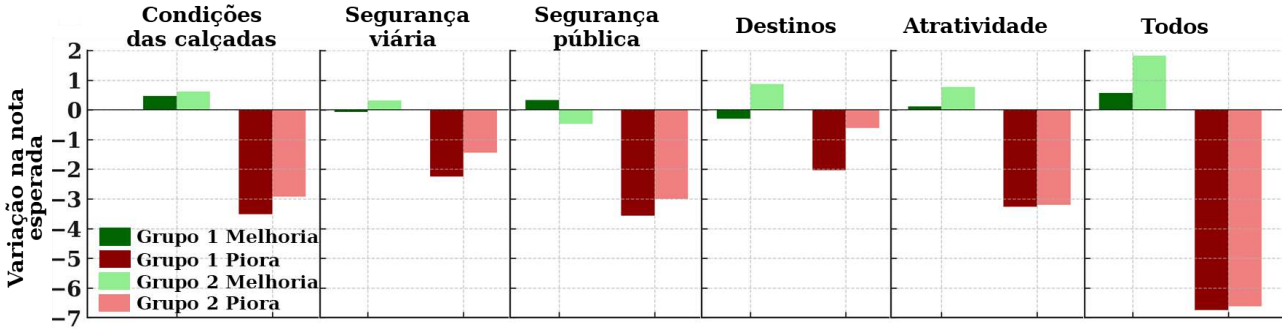


Figura 3: Impacto das melhorias e pioras nos atributos nas notas atribuídas à caminhabilidade do ambiente

Assim como observado na análise estatística, os resultados dos modelos estimados indicam a existência de

uma assimetria na percepção da caminhabilidade. A Figura 3 mostra que as pioras impactam mais do que os ganhos correspondentes a cada atributo, evidenciando um padrão de aversão à perda por parte dos participantes, um fenômeno amplamente discutido na Teoria da Perspectiva, da economia comportamental, e já observado em diversas outras áreas.

Em relação ao método de coleta de dados, observa-se que a realidade virtual tende a intensificar a percepção dos ganhos, indicando que a observação dos atributos melhorados no ambiente imersivo torna os julgamentos mais sensíveis pelo nível de detalhamento. Em atributos como *Segurança viária* e *Destinos* as notas esperadas para o grupo 1 (vídeos) são inclusive piores que a nota do cenário base, enquanto no grupo 2 (VR) houve incremento na nota. Já os cenários negativos apresentaram menor impacto no ambiente imersivo. Entretanto, há maior proximidade das notas entre os cenários piorados dos dois métodos de coleta do que entre os cenários melhorados, como pode ser visto em *Todos piorados* e *Todos melhorados.* Em comparação ao estudo de Facchini *et al.* (2025), que utilizou uma pesquisa PD e estimou modelos de escolha discreta, foram observadas diferenças na importância relativa dos atributos. Enquanto naquele estudo a *Atratividade* se destacou como maior impacto, neste, *Condições das calçadas* e *Segurança pública* também apresentam impactos similares. As diferenças podem estar relacionadas ao tipo de tarefa, ao perfil dos participantes ou ao realismo dos cenários apresentados. Apesar disso, houve consistência nos sinais e na significância dos efeitos em ambos os estudos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta do estudo foi avaliar a assimetria na avaliação da caminhabilidade, usando uma abordagem baseada na alteração isolada de atributos urbanos, constituindo-se em um método útil como ferramenta de apoio à decisão em contextos com limitações técnicas. Os resultados mostraram de fato que há assimetria, com pioras sendo mais penalizadas que melhorias, em linha com o conceito de aversão à perda da Teoria da Perspectiva.

Com relação ao método de coleta, tanto os vídeos quanto a realidade virtual mostraram esse padrão e identificaram *Condições das calçadas*, *Segurança pública* e *Atratividade* como as características mais importantes, sendo que a realidade virtual intensificou a percepção dos ganhos. Os resultados obtidos indicam que evitar deteriorações no ambiente urbano pode ter mais impacto na percepção dos pedestres do que promover melhorias pontuais, reforçando a necessidade de priorizar esses atributos em intervenções urbanas, com destaque a segurança pública, especialmente relevante no contexto latino-americano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS’

Arellana, J., M. Saltarín, A.M. Larranaga, V. Alvarez e C.A. Henao (2020). Urban walkability considering pedestrians’ perceptions of the built environment: a 10-year review and a case study in a medium-sized city in Latin America. *Transport Reviews*, 40(2), 183–203. https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1703842

Dong, W.; X. Cao; X. Wu e Y. Dong (2019) Examining pedestrian satisfaction in gated and open communities: An integration of gradient boosting decision trees and impact-asymmetry analysis. *Landscape and Urban Planning*, v. 185, p. 246–257. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.02.012

Facchini, G.; A. M. Larranaga; F. A. C. dos Santos; M. L. dos Santos; C. T. Nodari e D. S. P. García (2025) Virtual reality in stated preference survey for walkability assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 139, n. 104545. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104545

Hensher, D. A., W.H. Greene (2011). *Modeling Ordered Choices: A Primer.* Cambridge University Press.

Kahneman, D. e A. Tversky (2013) Prospect theory: an analysis of decision under risk. *In Handbook of the Fundamentals of Financial Decision Making: Part I*, World Scientific, p. 99–127.

Kasraian, D.; S. Adhikari; D. Kossowsky; M. Luubert; G. B. Hall; J. Hawkins; K. Nurul Habib e M. J. Roorda (2021) Evaluating pedestrian perceptions of street design with a 3D stated preference survey. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 48, n. 8, p. 1787–1805. DOI: 10.1177/2399808320946050

Larranaga, A. M.; J. Arellana; L. I. Rizzi; O. Strambi e H. B. B. Cybis (2018) Using best–worst scaling to identify barriers to walkability: a study of Porto Alegre, Brazil. *Transportation*, v. 45, n. 2. DOI: 10.1007/s11116-018-9944-x

Liao, B., P.E.W. van den Berg, P.J.V. van Wesemael e T.A. Arentze (2022) Individuals’ perception of walkability: Results of a conjoint experiment using videos of virtual environments. *Cities,* v. 125, Article 103650.

Ruiz-Padillo, A.; L. Oestreich; T. B. Torres; P. S. Rhoden; A. M. Larranaga e H. B. Cybis (2022) Weighted assessment of barriers to walking in small cities: A Brazilian case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 109, 103392. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103392

Tian, G. e R. Ewing (2017) A walk trip generation model for Portland, OR. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 52, p. 340–353. DOI: 10.1016/j.trd.2017.03.017

Wang, H. e Y. Yang (2019) Neighbourhood walkability: A review and bibliometric analysis. *Cities*, v. 93, p. 43–61.

EXPLORANDO A DINÂMICA ESPACIAL DOS ESTABELECIMENTOS COMERCIAIS EM BELO HORIZONTE PRÉ E PÓS-PANDEMIA

Gracielle Gonçalves Ferreira de Araújo[1], **Leise Kelli de Oliveira**[2], **Rui Colaço**[3]
[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [3]Universidade de Lisboa

RESUMO
Este artigo analisa influência da pandemia no padrão espacial dos estabelecimentos comerciais em Belo Horizonte. Aplicando clusterização k-means, foram definidos quatro padrões espaciais distintos: áreas residenciais, de uso misto e duas centralidades comerciais. Regressões Geograficamente Ponderadas (GWR) identificaram a influência de variáveis socioeconômicas e locacionais na densidade comercial. Os coeficientes estimados dos modelos GWR mostraram que as variáveis população, empregos, vias locais e coletoras influenciam positivamente a densidade comercial. A influência da renda per capita e das vias arteriais varia conforme a região, mostrando a importância de considerar características específicas de cada área na análise. Observa-se ainda diferenças no comércio frequente (alimentos e bebidas) e ocasional (roupas, móveis, saúde e higiene, materiais de construção, entre outros). Observou-se que pós-pandemia houve uma redução significativa na densidade comercial, porém sem alterar os padrões espaciais. Os resultados são inputs para análise da acessibilidade por motivo compra.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os estabelecimentos comerciais desempenham um papel vital no desenvolvimento econômico das cidades e regiões, não apenas impulsionando as economias locais, mas também moldando a acessibilidade do consumidor às compras. A localização dos estabelecimentos comerciais exerce influência significativa sobre a escolha por modos de transporte sustentáveis, podendo estimular ou inibir comportamentos de consumo ambientalmente responsáveis. No entanto, a pandemia do COVID-19 contribuiu para o fechamento de muitos estabelecimentos, alterando o padrão espacial desses estabelecimentos (Che *et al.*, 2023). Em contrapartida, o comércio eletrônico expandiu durante o mesmo período, podendo ter contribuído para alterar a configuração espacial do comércio (Nanda *et al.*, 2021). Assim, mesmo nesse contexto de concorrência entre o comércio físico e online, a localização do estabelecimento comercial continua sendo um parâmetro fundamental para a consolidação do negócio (Colaço e De Abreu E Silva, 2023). Enquanto as áreas residenciais tendem a abrigar estabelecimentos comerciais que comercializam produtos essenciais, atendendo às necessidades diárias do consumidor, as lojas especializadas tendem a se estabelecer em centros comerciais. Estes polos comerciais, caracterizados por uma elevada densidade e diversidade de comércio, servem como centralidades comerciais, cujo desenvolvimento é muitas vezes moldado por políticas de planejamento urbano.

A localização dos estabelecimentos comerciais é um processo complexo influenciado por diversos fatores, como a proximidade a infraestrutura de transporte, presença de centros comerciais, densidade populacional, natureza do produto, valor da terra e tamanho de mercado (Colaço e De Abreu E Silva, 2023; Guy, 2007; Kang, 2022; Öner, 2017; Schuetz *et al.*, 2012). Ainda, segundo Schuetz *et al.* (2012), a densidade dos estabelecimentos comerciais é sensível ao emprego e à renda local, bem como a acessibilidade local (configurações das ruas), que influencia as atividades de comércio (Tsou e Cheng, 2013). Alguns estudos analisam como a proximidade de estabelecimentos comerciais influenciam nos preços dos imóveis residenciais (Ghorbani e Meltzer, 2024; Jang e Kang, 2015; Kang, 2018; Shen *et al.*, 2020; Song e Sohn, 2007). Ainda, a localização dos comércio tem papel crucial na acessibilidade por motivo compra, podendo contribuir para a redução da dependência do veículo privado e, consequentemente, reduzir as emissões de poluentes (Verma *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o objetivo desse artigo é explorar como o período pandêmico influenciou na distribuição espacial dos estabelecimentos comerciais em Belo Horizonte. Para isso, foi comparado os padrões espaciais nos períodos pré-pandemia (2019) e pós-pandemia (2024). Os resultados contribuem para a identificação de centralidades comerciais na área de estudo, bem como são um passo necessário para compreender a acessibilidade por motivos compras e os efeitos de complementariedade, substituição modificação e neutralidade entre o comércio físico e on-line.

2. DADOS E MÉTODO

A análise foi composta de duas etapas, usando técnicas de (i) agrupamento geoespacial e (ii) regressão geograficamente ponderada (GWR). Na etapa (i), a análise de cluster espacial foi utilizada para identificar

agrupamento de estabelecimentos comerciais com base na densidade (número de empresas) e diversidade (variedade de setores econômicos dos estabelecimentos). Para tanto, informações dos estabelecimentos comerciais foram obtidas através da base de dados do Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas, sendo selecionadas 73 categorias da Classificação Nacional de Atividades Econômicas. Essas foram então agrupadas em 8 setores comerciais, seguindo critérios análogos aos empregados por Colaço e De Abreu E Silva (2021). Os dados foram agrupados em hexágonos de área de 0.11 km², conforme utilizado por Pereira *et al.* (2022), no intuito de utilizar unidades espaciais padronizadas, conforme mencionado por Anselin (2024).

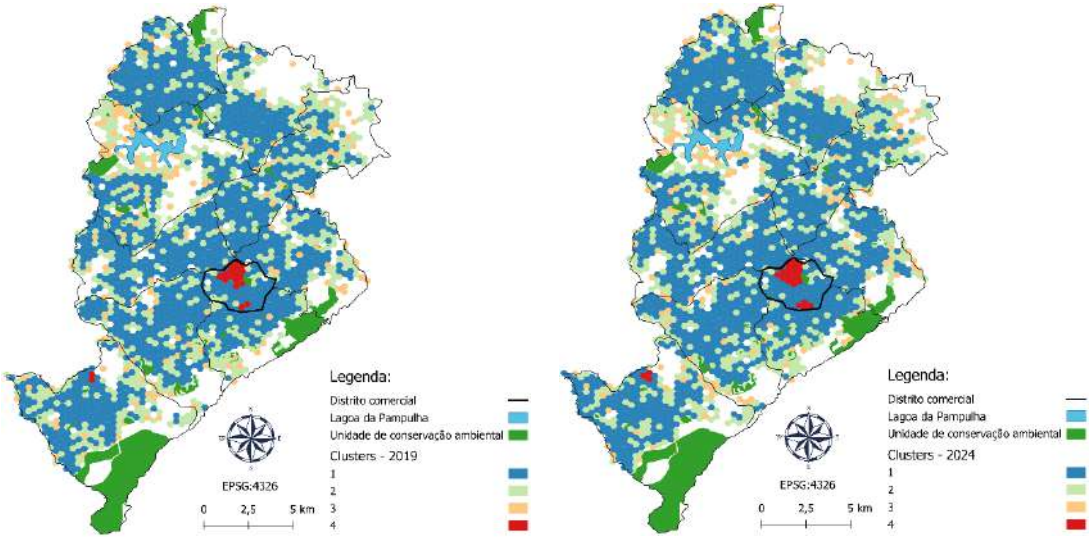
A análise de agrupamento *k-means* foi realizada no software GeoDa, utilizando as variáveis padronizadas: densidade (número de estabelecimentos comerciais por hexágono), diversidade (quantidade de setores comerciais diferentes no hexágono – máximo 8), os *lags* espaciais de 1ª ordem da densidade e da diversidade, e os índice de Shannon e Simpson. Para a determinação do *k* ótimo para a clusterização, utilizou-se a análise do gráfico do cotovelo e do gráfico da silhueta, resultando na escolha de k = 4 para os anos de 2019 e 2024.

Na etapa (ii), foram estimados modelos de regressão geograficamente ponderada (GWR) para explorar como os fatores socioeconômicos e locacionais influenciam a densidade comercial em Belo Horizonte, e como eles podem ter se alterado devido à pandemia de COVID-19. Para tanto, foi considerado a densidade comercial como variável dependente e, como variáveis explicativas, foi considerado o lag da densidade (lag espacial de 1ª ordem), população total, proporção da população por grupo etário, renda, empregos, vias locais, coletoras e arteriais. Estes fatores foram baseados na literatura (Colaço e De Abreu e Silva, 2023; Guy, 2007; Kang, 2022; Öner, 2017; Schuetz *et al.*, 2012; Tsou e Cheng, 2013). A regressão GWR estima coeficientes de regressão mapeáveis localmente (Brunsdon *et al.*, 1998), baseada no peso dos vizinhos mais próximos. Como a variável dependente é dado de contagem, utilizou-se a transformação log. Para a estimação dos modelos GWR, utilizou-se a contiguidade da rainha (8 vizinhos); a largura de banda ótima foi definida de forma adaptativa utilizando a função de kernel exponencial; a regressão linear de referência foi escolhida usando o método stepwise "forward". Para mais informações sobre esse método consulte Kopczewska (2020). Para a estimação dos modelos foi utilizado o pacote "GWModel" no ambiente R. Foram estimados modelos para o (i) Comércio Geral, que considera todos os setores comerciais; (ii) Comércio Frequente, que considera apenas estabelecimentos de comércio alimentar e de bares e restaurantes; e (iii) Comércio Ocasional, que considera estabelecimentos do comércio varejista de uso pessoal, saúde e higiene, comércio varejista de equipamentos do lar, comércio varejista de cultura e lazer, materiais de construção e não especializado. Os modelos foram estimados para os anos de 2019 e de 2024, totalizando seis modelos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 estão apresentados os resultados do agrupamento dos estabelecimentos comerciais para os anos de 2019 e 2024. Os resultados demonstram a presença de quatro perfis distintos de áreas comerciais em Belo Horizonte. O Cluster 1, caracterizado por corredores de transporte e centros comerciais secundários, representa a maioria dos hexágonos (2019 - 59,93% e 2024 - 59,88% dos hexágonos), com alta densidade comercial (média de 2019 - 28,06 e 2024 - 26 estabelecimentos por hexágono) e diversidade comercial (média de 6,75 de setores por hexágono para ambos os anos), e têm uma influência significativa nos arredores, caracterizando áreas de uso misto. O Cluster 2 é caracterizado por áreas de comércio de bairro (2019 - 31,59% e 2024 - 31,11% dos hexágonos), com intermediária densidade comercial (média de 2019 – 7,33 e 2024 – 6,93 estabelecimentos por hexágono) e diversidade comercial (média de 2019 – 3,52 e 2024 – 3,53 de setores por hexágono), dispersa em zonas residenciais (média de 69,69% de vias locais e de 20,03% de vias coletoras) e focado em necessidades cotidianas. O Cluster 3 é caracterizado por áreas predominantemente não comerciais ou residenciais (2019 - 7,63% e 2024 - 7,98% dos hexágonos), apresenta os menores valores de menores densidade comercial (média de 1,63 estabelecimentos por hexágono para ambos os anos) e diversidade comercial (média de 1,09 de setores por hexágono para ambos os anos), com comércio escasso e altamente especializado. Por fim, o Cluster 4 contempla grandes polos comerciais e centros urbanos dinâmicos, concentra-se na região central da cidade, distinguindo-se pelos maiores valores de densidade comercial (média de 2019 – 282,53 e 2024 – 202,43 estabelecimentos por hexágono) e diversidade comercial (média de 2019 – 7,95 e 2024 – 7,91 de setores por hexágono) e forte impacto comercial nas áreas adjacentes. Nesse ponto, é importante ressaltar que esse cluster foi o que sofreu maior alteração entre 2019 e 2024. Houve um redução de 28,35% na média da densidade comercial, em que todos os setores tiveram uma redução em torno de aproximadamente 23%. As exceções ocorreram para o comércio alimentar, que teve a menor redução dentro

os setores (17,17%), e do comércio de uso pessoal teve a maior redução (38,4%).



a b

Figura 1 - Distribuição espacial dos clusters, 2019(a) e 2024 (b)

Na Figura 2 são ilustrados os coeficientes locais estimados para os modelos GWR. Observa-se que para a maioria das variáveis, há uma variação significativa entre os coeficientes locais, tanto em termos de magnitude, quanto em influência (negativo e positivo). De maneira geral, população, empregos, vias locais e coletoras influenciam positivamente a densidade comercial. O modelo "Comércio Frequente 2024" tem a maior variação nos coeficientes, com a maioria das variáveis alternando entre influência positiva e negativa na densidade comercial. Isso não é observado para seu similar em 2019, cuja influência da variáveis é positiva. De fato, o Comércio Frequente teve redução maior que a média do período (- 7,44% no número de estabelecimentos comerciais entre 2019 e 2024), sendo de -7,90% para o comércio alimentar e de -11,72% para bares e restaurantes. A renda foi uma variável significativa apenas para os modelos de Comércio Geral e Ocasional de 2019, em ambos apresenta o mesmo padrão. Para a maioria dos hexágonos o aumento da renda influencia negativamente a presença de estabelecimentos comerciais, isso pode ser um efeito relacionado o preço da terra. Em geral, os bairros com maior renda per capita são os mais valorizados no mercado imobiliário. Logo, é plausível supor que nessas localidades mantem-se o comércio já estabelecido, e que quando há o encerramento de atividades desses, o local possa ser transformado em outro tipo de imóvel. As vias arteriais tendem a ter uma influência positiva na densidade comercial, isso se deve, provavelmente, ao fato de todas as vias no distrito comercial de Belo Horizonte serem classificadas como vias arteriais. Ainda, as demais avenidas de grande porte da cidade também são vias arteriais, porém assumem sua característica clássica, priorizando à mobilidade em detrimento da acessibilidade. Nesse caso, a influência tende a ser negativa.

A clusterização do padrão espacial do comércio em Belo Horizonte revela uma reorganização espacial pós-pandemia. Houve uma consolidação e expansão territorial das centralidades comerciais de 2019 (Cluster 4), no distrito comercial e na área na porção sul do município, mesmo com a redução no número total de estabelecimentos nessa categoria. Em paralelo, o aumento do número de hexágonos no Cluster 3 (áreas residenciais) indica a redução do comércio de proximidade. Essas tendências resultam na necessidade de maior deslocamento dos consumidores para compras ou na utilização do comércio online. Como consequência, o aumento de viagens motorizadas, que poderiam ser realizadas a pé ou de bicicleta, gera emissões poluentes e se contrapõe ao ideal de cidades de 15 minutos. Nesse contexto, o comércio tradicional fornece aspectos positivos para além da acessibilidade às compras: ele é também um importante fator para a qualidade de vida dos consumidores, pois fomenta o emprego local, revitaliza e movimenta as ruas, e ainda proporciona a possibilidade de contato, elementos apreciados por muitos consumidores. Por fim, a análise dos coeficientes locais dos modelos GWR revela que os fatores demográficos e estruturais exercem influência variável conforme a localização, indicando que as estratégias de revitalização comercial devem ser adaptadas à realidade de cada território. Dessa forma, torna-se essencial aprofundar a investigação sobre a relação entre padrões espaciais do comércio, acessibilidade urbana e o papel crescente do comércio eletrônico, visando

cidades mais resilientes e inclusivas.

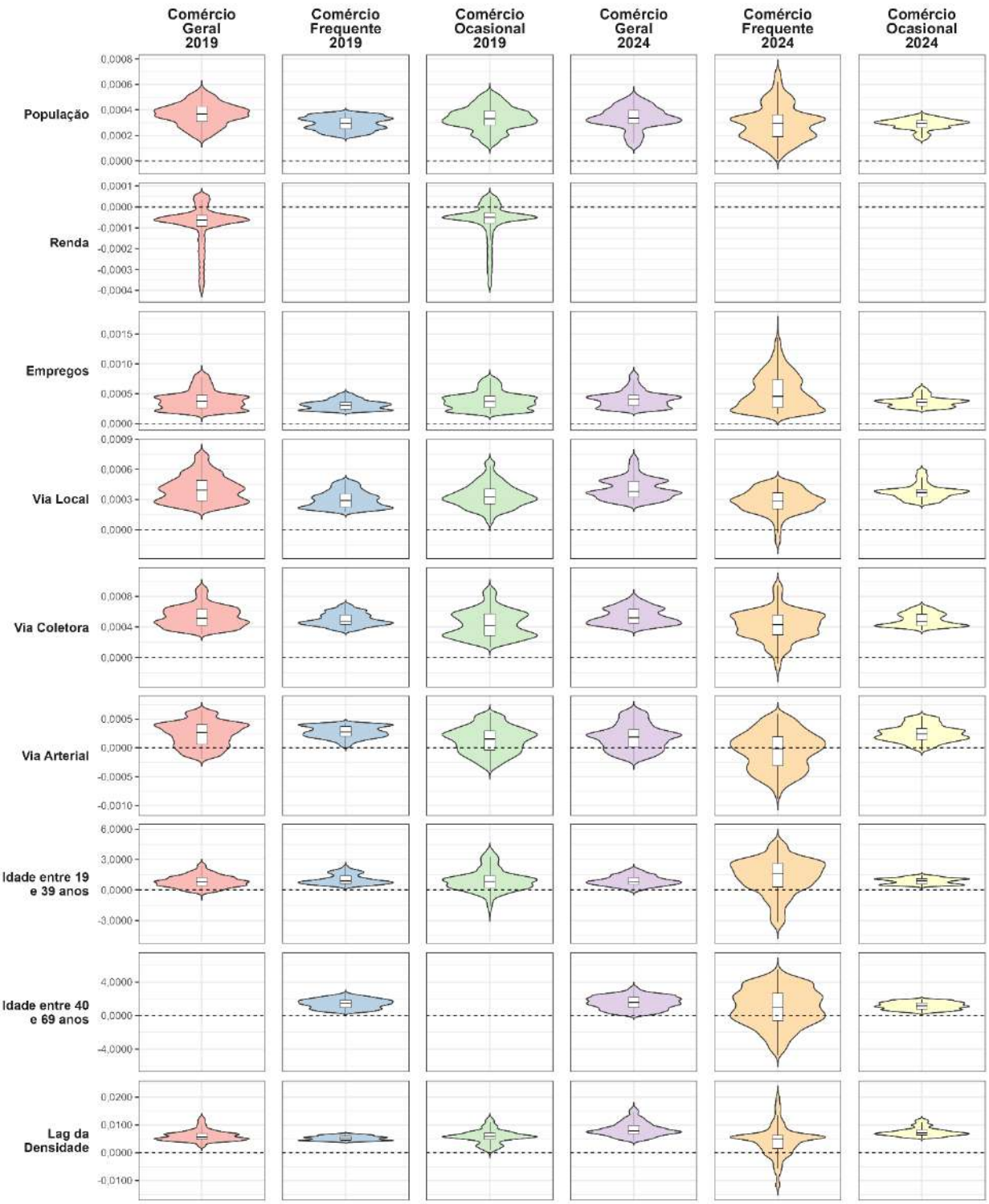


Figura 2 - Coeficientes Locais Estimados

4. CONCLUSÕES

O objetivo desse artigo foi explorar como o período pandêmico afetou a distribuição espacial dos estabelecimentos comerciais em Belo Horizonte. Para isso foi identificado quatros clusters espaciais que dividem o território do município em corredores e centros comerciais (Cluster 1), áreas de comércio de bairro (Cluster 2), áreas predominantemente não comerciais ou residenciais (Cluster 3), e grandes polos comerciais e centros urbanos dinâmicos (Cluster 4). No que tange aos modelos GWR, os resultados indicam que as

variáveis população, empregos, vias locais e coletoras, exercem uma influência positiva sobre a densidade comercial. Por outro lado, a renda per capita e as vias arteriais apresentam impactos diferenciados conforme a localidade, sendo positivos em algumas regiões e negativos em outras.

Quanto aos períodos pré e pós pandemia, observou-se uma redução significativa no número de estabelecimentos comerciais, com maior impacto no comércio frequente (setores de comércio alimentar e no de bares e restaurantes). Em relação aos padrões espaciais, não houve uma mudança expressiva entre os períodos analisados, porém nota-se a expansão de subcentros comerciais no distrito comercial e na região mais ao Sul do município em 2024. Essa tendência demonstra um princípio de reorganização espacial em que há um redução da dependência do distrito comercial para um aumento na proximidade aos consumidores. Na prática, isso pode significar uma alteração no sistema de transportes, onde viagens de longa distância por motivo compra, poderão ser modificadas por viagens de curta distância. Além disso, em alguns casos pode ocorrer a alteração do modo de transporte motorizado para não motorizado. Essa expectativa se alinha aos ideais da cidade de 15 minutos. Nas pesquisas futuras, será explorado a influência do padrão espacial dos estabelecimentos comerciais na acessibilidade por motivo compra. Ainda, sugere-se explorar os resultados para outros centros urbanos.

Agradecimentos
Os autores agradecem à FACEPE (IBPG-0347-3.01/23) e ao CNPq (processo 441615/2023-6) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anselin, L. (2024) *An introduction to spatial data science with GeoDa: Volume 1: Exploring spatial data*. (First edition.). CRC Press, Boca Raton, FL. doi:10.1201/9781003274919

Brunsdon, C., Fotheringham, S., e Charlton, M. (1998) Geographically Weighted Regression-Modelling Spatial Non-Stationarity. *Journal of the Royal Statistical Society*, *47*(3), 431–443.

Che, J., Lee, J. S., e Kim, S. (2023) How has COVID-19 impacted the economic resilience of retail clusters? Examining the difference between neighborhood-level and district-level retail clusters. *Cities*, *140*, 104457. doi:10.1016/j.cities.2023.104457

Colaço, R., e De Abreu E Silva, J. (2021) Commercial Classification and Location Modelling: Integrating Different Perspectives on Commercial Location and Structure. *Land*, *10*(6), 567. doi:10.3390/land10060567

Colaço, R., e De Abreu E Silva, J. (2023) Exploring the role of accessibility in shaping retail location using space syntax measures: A panel-data analysis in Lisbon, 1995–2010. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *50*(5), 1345–1360. doi:10.1177/23998083221138570

Ghorbani, P., e Meltzer, R. (2024) Are local retail services an amenity or a nuisance? *Journal of Economic Geography*, *24*(2), 193–218. doi:10.1093/jeg/lbad034

Guy, C. (2007) *Planning for retail development: a critical view of the British experience*. Routledge, London.

Jang, M., e Kang, C.-D. (2015) Retail accessibility and proximity effects on housing prices in Seoul, Korea: A retail type and housing submarket approach. *Habitat International*, *49*, 516–528. doi:10.1016/j.habitatint.2015.07.004

Kang, C.-D. (2018) Valuing Spatial Access to Types of Retail and Effects on the Housing Price in Seoul, Korea. *Journal of Urban Planning and Development*, *144*(2), 05018007. doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000448

Kang, C.-D. (2022) Effects of Commercial Environments and Agglomeration on Retail Sales in Cluster Hierarchies: Evidence from Seoul, Republic of Korea. *Journal of Urban Planning and Development*, *148*(4), 05022028. doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000866

Kopczewska, K. (2020) *Applied Spatial Statistics and Econometrics: Data Analysis in R*. (1º ed). Routledge. doi:10.4324/9781003033219

Nanda, A., Xu, Y., e Zhang, F. (2021) How would the COVID-19 pandemic reshape retail real estate and high streets through acceleration of E-commerce and digitalization? *Journal of Urban Management*, *10*(2), 110–124. doi:10.1016/j.jum.2021.04.001

Öner, Ö. (2017) Retail city: the relationship between place attractiveness and accessibility to shops. *Spatial Economic Analysis*, *12*(1), 72–91. doi:10.1080/17421772.2017.1265663

Pereira, R. H. M., Herszenhut, D., Braga, C. K. V., Bazzo, J. P., Oliveira, J. L. A., Parga, J. P., Saraiva, M., Silva, L. P., Tomasiello, D. B., e Warwar, L. (2022) TD 2772 - Distribuição espacial de características sociodemográficas e localização de empregos e serviços públicos das vinte maiores cidades do Brasil. *Texto para Discussão*, 1–26. doi:10.38116/td2772

Schuetz, J., Kolko, J., e Meltzer, R. (2012) Are poor neighborhoods “retail deserts”? *Regional Science and Urban Economics*, *42*(1–2), 269–285. doi:10.1016/j.regsciurbeco.2011.09.005

Shen, L., He, Y., Li, L., e Chau, K. (2020) Impacts of online shopping convenience and physical retail proximity on housing prices in Shenzhen, 2016–2018. *Journal of Housing and the Built Environment*, *35*(4), 1157–1176. doi:10.1007/s10901-020-09732-w

Song, Y., e Sohn, J. (2007) Valuing spatial accessibility to retailing: A case study of the single family housing market in Hillsboro, Oregon. *Journal of Retailing and Consumer Services*, *14*(4), 279–288. doi:10.1016/j.jretconser.2006.07.002

Tsou, K.-W., e Cheng, H.-T. (2013) The effect of multiple urban network structures on retail patterns – A case study in Taipei, Taiwan. *Cities*, *32*, 13–23. doi:10.1016/j.cities.2013.02.003

Verma, R., Chiara, G. D., e Goodchild, A. (2025) Does proximity matter in shopping behavior? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *196*, 104471. doi:10.1016/j.tra.2025.104471

INFLUÊNCIA DO PERFIL FAMILIAR E DO AMBIENTE CONSTRUÍDO NA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL: UMA ABORDAGEM MULTINÍVEL

Mariana Ohira Hashimoto, Orlando Strambi
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo examina as relações entre ambiente construído, perfil familiar e mobilidade sustentável no município de São Paulo, utilizando dados das zonas da Pesquisa de Origem e Destino de 2017. A metodologia abrangeu tratamento de dados georreferenciados, classificação de zonas por K-médias, análise de tipologias urbanas e modelagem multinível. A mobilidade sustentável foi avaliada por quatro indicadores distintos: proporção de viagens ativas, de viagens de transporte público, de viagens motorizadas curtas e de viagens discricionárias. Os resultados revelam que as características familiares influenciam mais a mobilidade sustentável que o ambiente urbano. Contudo, a tipologia urbana influencia significativamente o uso de modos ativos, especialmente em zonas centrais com melhor infraestrutura, enquanto em áreas periféricas, o transporte público é predominante. A posse de veículos mostrou-se o principal fator para viagens curtas, enquanto viagens discricionárias foram mais sensíveis a características familiares. Conclui-se com diretrizes para políticas públicas visando promover a mobilidade sustentável, reduzir desigualdades territoriais e ampliar a equidade no acesso.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo aborda a complexa interação entre ambiente construído e perfil familiar no comportamento de mobilidade sustentável no município de São Paulo.

A família é a unidade central no estudo da mobilidade. Fatores como tamanho, composição, poder aquisitivo e ciclo de vida familiar podem impactar significativamente a frequência de viagens e o modo de transporte. O ambiente construído, com a distribuição espacial da infraestrutura urbana, densidade e uso do solo, também tem o potencial de moldar as preferências de deslocamento diário (Ewing e Cervero, 2010). As famílias, unidades de análise deste estudo, estão naturalmente agrupadas em zonas, que podem ser classificadas em tipologias urbanas, exigindo uma abordagem multinível. Essa abordagem considera tanto as características familiares quanto o contexto urbano, permitindo analisar como fatores familiares influenciam as escolhas de deslocamento e como a tipologia urbana, no nível hierárquico superior, modula essas decisões (Schwanen, Dieleman e Dijst, 2004).

Apesar da relevância, a literatura raramente considera simultaneamente a influência do ambiente construído e das interações intrafamiliares na mobilidade. Por sua vez, o modelo de regressão multinível possibilita a distinção entre os efeitos contextuais do ambiente urbano e as características familiares, ao mesmo tempo em que acomoda a estrutura hierárquica dos dados e capta correlações residuais não identificadas por métodos tradicionais de análise (Raudenbush e Bryk, 2001).

Este estudo quantitativo analisa uma amostra de aproximadamente 20 mil famílias no município de São Paulo, buscando ampliar o conhecimento sobre como características familiares e do ambiente construído influenciam a mobilidade sustentável e fornecer subsídios para políticas públicas. A estrutura do artigo compreende a revisão da literatura, a descrição da metodologia, a apresentação do modelo de regressão multinível com seus resultados e, por fim, as conclusões do estudo.

3. METODOLOGIA

A primeira etapa consistiu na organização de um amplo conjunto de dados do município de São Paulo, ajustados para o ano-base 2017, escolhido em função da Pesquisa de Origem e Destino (OD) de 2017 (CMSP, 2019). Com base nesse conjunto de dados, foram selecionados indicadores que capturam as dimensões do ambiente construído, as características das famílias e o comportamento de viagem para mobilidade sustentável.

Na segunda etapa, foram construídos os indicadores utilizados para a caracterização do ambiente construído, seguindo as dimensões propostas originalmente por Cervero e Kockelman (1977) – Densidade, Diversidade de Uso e Distância ao Transporte –, posteriormente expandido para incluir as dimensões Desenho Urbano, Acesso ao Destino e Gestão da Demanda (Ogra e Ndebele, 2014). Na Tabela 1 são sintetizados os indicadores de ambiente construído utilizados na análise, organizados segundo as seis dimensões urbanas. Esses

indicadores foram calculados para cada uma das zonas OD do município de São Paulo.

Tabela 1: Descrição dos indicadores de ambiente construído

Dimensão	Variável	Descrição
Densidade	POP_AU	Densidade urbana de habitantes (habitantes/km²)
	EMP_AU	Densidade urbana de empregos (empregos/km²)
	ENS_AU	Densidade urbana de escolas (escolas/km²)
Diversidade	SHANNON	Índice de Entropia de Shannon (%)
	DESENV	Índice de Desenvolvimento (%)
	PART_EMP	Participação da população empregada (%)
Desenho urbano	MERC_AU	Cobertura de mercados/lojas de conveniência (%)
	AV_AU	Cobertura de áreas verdes (%)
	CC_ADEQ_PERC	Percentual de calçadas adequadas (%)
	CICLO_VIA_PERC	Percentual de ciclovias em relação ao viário (%)
	VIA_4_PERC	Percentual de cruzamentos de 4 ou mais vias (%)
Distância ao transporte	ATAC_AU	Cobertura do transporte de alta capacidade (%)
	ATMC_AU	Cobertura do transporte de média capacidade (%)
	LN_AU	Densidade urbana de linhas de ônibus (linhas/km²)
	HW_MD_MIN	Intervalo médio de linhas de ônibus (minutos)
	VIA_ESTR_PERC	Percentual de vias estruturais em relação ao viário (%)
Acesso ao Destino	CMATP_EMP	Acesso cumulativo a empregos por transporte público em 30 minutos (nº empregos)
	CMATI_EMP	Acesso cumulativo a empregos por transporte individual em 30 minutos (nº empregos)
	VG_MEIOF	Viagens de automóvel, sem motivo residência, com destino a estacionamento na via (nº viagens)
Gestão da Demanda	ZN16_AU	Cobertura das zonas urbanísticas articuladas ao transporte público em relação à área urbana (%)
	VAGA_ZA	Número de vagas de estacionamento rotativo (nº vagas)

Na terceira etapa, o conjunto de indicadores de ambiente construído for utilizado para criar classes de tipologias urbanas. Essa redução da dimensionalidade da descrição do ambiente permitiu maior compreensão da heterogeneidade urbana entre as zonas de estudo e de seus impactos na mobilidade. Excluindo-se 13 zonas sem população, foram agrupadas as demais 329 zonas OD do município em tipologias urbanas através do algoritmo K-médias (Hashimoto e Strambi, 2023). Na Figura 1, observa-se que a classificação gerada irradia a partir das linhas de transporte de alta capacidade (na cor preta), com as classes 1 e 2 no centro expandido, a classe 3 ao redor das linhas ferroviárias e de BRT, e as classes 4 e 5 na área periférica, sendo esta última caracterizada por grandes áreas verdes e represas. À medida que se avança da Tipologia 1 para a Tipologia 5, observa-se uma redução nos valores médios das variáveis utilizadas para a classificação das zonas, com exceção de indicadores como o intervalo entre ônibus, cujo aumento representa piora nas condições observadas.

Assim, pôde-se caracterizar as classes nas seguintes tipologias urbanas: Tipologia 1 (Zonas Núcleo) no quadrilátero formado pelas linhas de metrô, com valores das variáveis superiores aos das demais classes; Tipologia 2 (Zonas Centrais) no entorno do transporte de alta capacidade, no centro expandido; Tipologia 3 (Zonas de Transição) com alta participação de viagens com destino a estacionamento no meio-fio, próximas às linhas de alta capacidade; Tipologia 4 (Zonas Periurbanas) nas zonas densamente povoadas e com pouca diversidade de usos, com características de ambos os ambientes urbano e suburbano; e Tipologia 5 (Zonas Periféricas), com maior presença de áreas verdes e maior intervalo entre ônibus.

Na quarta etapa, foram construídos os indicadores referentes à família e à mobilidade sustentável. Para evitar distorções, foram excluídas da análise 2.292 famílias (10% do total) sem viagens registradas, resultando em 19.702 famílias. Para caracterizar as famílias, unidade de análise deste estudo, selecionaram-se atributos do responsável, composição familiar e condições socioeconômicas, conforme apresentados na Tabela 2.

Para analisar padrões de deslocamento sustentáveis, quatro indicadores foram selecionados, descrevendo distintos aspectos da mobilidade (ver Tabela 3). Em relação ao modo de transporte, foram utilizados os percentuais de viagens ativas (a pé e bicicleta) e de viagens em transporte coletivo (em relação às viagens

motorizadas). Quanto ao motivo, considerou-se o percentual de viagens discricionárias (manutenção, lazer, compras etc.). Para a duração, adotou-se o percentual de viagens motorizadas com até 30 minutos.

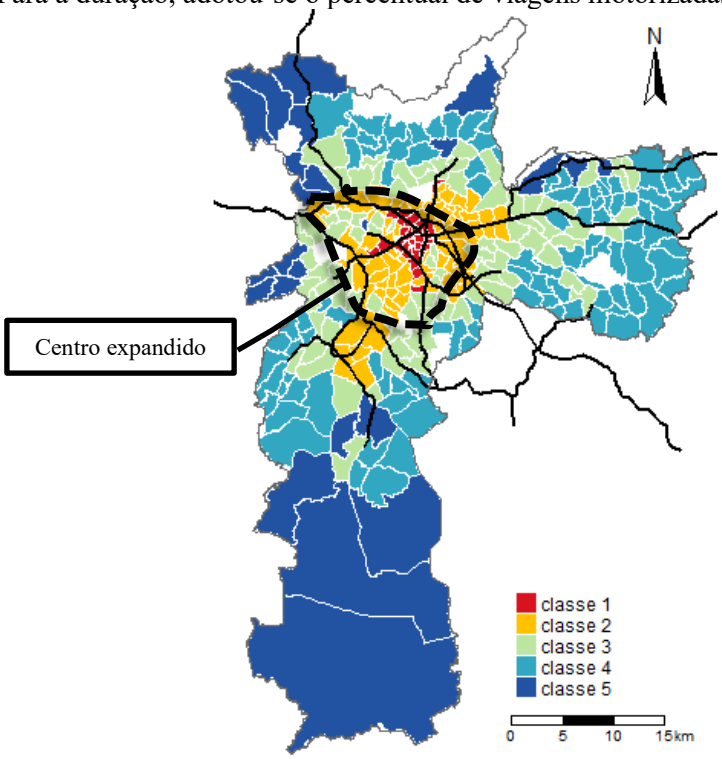


Figura 1: Tipologias urbanas

Tabela 2: Indicadores de famílias

Indicador	Variável	Resposta
Responsável Familiar		
Sexo	RESP_SEXO	masculino: 0 | feminino: 1
Faixa etária	RESP_IDADE	até 39 anos:1 | 40 a 49 anos: 2 | 50 a 59 anos: 3 | 60+ anos: 4
Grau de instrução	RESP_INSTR	básico:0 | superior:1
Tipo de ocupação	RESP_OCUP	inativo:0 | essencial:1 | administrativo:2
Composição Familiar		
Número de moradores	FAM_NUM	1 morador:1 | 2 moradores: 2 | 3 moradores: 3 | 4+ moradores: 4
Número de trabalhadores	FAM_TRABALHA	1 trabalhador:1 | 2 trabalhadores: 2 | 3+ trabalhadores: 3
Presença de cônjuge	FAM_CONJUGE	não:0 | sim:1
Presença de filhos	FAM_FILHOS	não:0 | sim:1
Presença de filhos até 12 anos	FAM_FILHOS_INF	não:0 | sim:1
Presença de idoso	FAM_IDOSO	não:0 | sim:1
Presença de família estendida	FAM_ESTEND	não:0 | sim:1
Indicadores socioeconômicos		
Faixas de renda média familiar	FAM_RENDA	até 2,5 SM : 1 | de 2,5 a 4 SM: 2 | de 5 a 10 SM: 3 | 10+ SM: 4
Presença de veículo motorizado	FAM_AUTO	não:0 | sim:1

Nota: SM = Salário-Mínimo do Brasil de 2017

Tabela 3: Indicadores de mobilidade sustentável

Indicador	Variável	Resposta
Modo de transporte	VG_ATV	% viagens da família por modo ativo (a pé e bicicleta) em relação ao total de viagens
	VGM_TP	% viagens da família por modo coletivo em relação às viagens motorizadas
Motivo de viagem	VG_DIS	% viagens da família com motivo discricionário em relação ao total de viagens
Duração de viagem	VGM_T30	% viagens da família com até 30 minutos em relação às viagens motorizadas

Na quinta etapa, empregaram-se modelos de regressão multinível para analisar a influência das variáveis explicativas de perfil familiar nas escolhas de mobilidade sustentável (efeitos fixos), bem como a modulação dessas decisões pela tipologia urbana no nível hierárquico superior (efeitos aleatórios) (Raudenbush e Bryk, 2001). Ou seja, o modelo pressupõe que famílias inseridas na mesma tipologia urbana tendem a apresentar

comportamentos mais semelhantes entre si do que em relação a famílias pertencentes a outras tipologias.

4. RESULTADOS

A pertinência do uso da modelagem multinível foi verificada por meio do teste de Levene (1961) e da razão de verossimilhança entre modelos com e sem agrupamento, que identificaram diferenças significativas entre as tipologias urbanas. Para a estimação dos modelos, optou-se pela família de distribuição beta com função de ligação logit, ideal para modelar variáveis dependentes expressas como proporções, com valores contínuos em [0,1]. Em seguida, calculou-se a razão mediana de chances (MOR) por meio de modelos nulos, os quais consideram o agrupamento, mas não incluem as variáveis explicativas. Optou-se pela MOR em detrimento do coeficiente de correlação intraclasse, uma vez que modelos logísticos com distribuição beta não possuem parâmetro de variância residual de nível 1, impossibilitando o cálculo da variância total. Embora a MOR tenha sido relativamente baixa, o efeito do agrupamento se mostrou relevante, justificando o uso do modelo de regressão multinível. Previamente à inclusão das variáveis explicativas de perfil familiar, verificou-se sua correlação através do teste de Fator Generalizado de Inflação de Variância (GVIF) ajustado para graus de liberdade e do teste de correlação V de Cramer, resultando na remoção da idade do responsável, presença de filhos e de cônjuge. Na Tabela 4 a seguir, são apresentados os resultados com modelos saturados para cada indicador de mobilidade sustentável. Embora algumas das variáveis explicativas não apresentem significância a 95% de confiança (em cinza na tabela), estas não foram retiradas, visto que sua exclusão não melhora substancialmente o modelo.

Tabela 4: Resultados dos modelos multinível

Modelo	% viags. ativas	% viags. motor. transp. públ.	% viags. motor. ≤ 30 min.	% viags. discrics.
Variância dos efeitos aleatórios	0,0691	0,014	0,00385	0,00000663
Variância dos efeitos fixos	0,904	0,586	0,897	0,791
Dispersão família beta	0,386	0,271	0,342	0,459
% influência da tipologia (MOR)	**28,50%**	**11,95%**	**6,10%**	**0,25%**
Coeficientes				
(Intercepto)	-0,4101	*0,1222*	-0,9608	0,8610
resp_sexo1	*-0,0313*	0,0900	0,0439	-0,0478
resp_instrsuperior	-0,1581	*-0,0116*	0,0537	0,0904
resp_ocupocup1ess	0,0835	*-0,0017*	*-0,0254*	-0,2418
resp_ocupocup2adm	0,1042	*-0,0618*	*-0,0150*	-0,2844
fam_nummora2	*0,0205*	0,1801	*-0,0230*	-0,1282
fam_nummora3	0,1251	0,3415	*-0,0378*	-0,2775
fam_nummora4+	0,2782	0,4514	*0,0166*	-0,3642
fam_trabalhatrabalha1	*-0,0157*	0,1285	-0,2369	-1,6592
fam_trabalhatrabalha2	*-0,0007*	0,2350	-0,2554	-1,7238
fam_trabalhatrabalha3+	*0,0078*	0,3180	-0,2851	-1,6690
fam_filho_infcrianca1	0,1021	-0,1626	0,3410	*-0,0388*
fam_60idoso1	-0,1308	-0,0498	0,0924	0,3510
fam_estendagregado1	0,0691	*-0,0450*	*-0,0172*	*-0,0446*
fam_autoveiculo1	-0,3065	-0,6740	0,4057	*0,0372*
fam_rendarenda2	-0,2199	*0,0142*	0,0986	0,0744
fam_rendarenda3	-0,2923	-0,1889	0,2341	0,1671
fam_rendarenda4	-0,3294	-0,4159	0,3935	0,2861
Efeitos Aleatórios de Tipologia				
Tipo 1 - Zonas Núcleo	0,3582	0,0181	-0,0208	0,0002
Tipo 2 - Zonas Centrais	0,1646	-0,1567	0,0608	-0,0004
Tipo 3 - Zonas de Transição	-0,0493	-0,0748	0,0619	0,0002
Tipo 4 - Zonas Periurbanas	-0,1931	0,1090	-0,0553	-0,0002
Tipo 5 - Zonas Periféricas	-0,2804	0,1043	-0,0467	0,0002

Os resultados indicam que, embora o ambiente urbano influencie a mobilidade sustentável, as características familiares têm maior peso explicativo, conforme evidenciado pelos valores de MOR. Entre as variáveis analisadas, destacam-se os efeitos da estrutura familiar e das condições socioeconômicas: famílias com mais moradores tendem a usar mais o transporte ativo e público, enquanto maior renda e posse de veículo estão associadas à redução desses modos e ao aumento de viagens motorizadas curtas e discricionárias, sendo estas

últimas mais determinadas por fatores sociodemográficos do que pelo contexto urbano. Fatores como a presença de crianças e idosos, ocupação, escolaridade e tipo de arranjo familiar também afetam os padrões de deslocamento, revelando a complexidade das interações entre perfil familiar e comportamento de viagem. Vale destacar, ainda, que a influência das variáveis explicativas relacionadas à família varia conforme o indicador analisado: podem ou não ser estatisticamente significativas, com efeitos positivos ou negativos, dependendo do aspecto da mobilidade sustentável considerado. Esse resultado reforça a importância de se definir claramente qual dimensão se pretende analisar nos estudos da mobilidade sustentável.

5. CONCLUSÕES

A modelagem multinível revelou que características familiares exercem maior influência na mobilidade sustentável do que o ambiente urbano, embora a tipologia urbana afete distintamente os indicadores. Zonas Núcleo e Centrais favorecem deslocamentos ativos, enquanto Periurbanas e Periféricas dependem mais do transporte público, apesar da oferta deficitária. Esses resultados apontam para a necessidade de políticas públicas territorializadas e sensíveis às dinâmicas familiares, com foco na equidade no acesso à mobilidade sustentável. Recomenda-se consolidar a mobilidade ativa nas Zonas Núcleo, implementar medidas restritivas ao uso do automóvel nas Zonas Centrais e de Transição, e promover investimentos estruturantes em transporte público nas Zonas Periurbanas e Periféricas, aliadas à redistribuição de oportunidades e benefícios que ampliem as capacidades reais das famílias (Schwanen, 2021). Em razão de seu alcance, tais políticas demonstram potencial de replicação em outros contextos urbanos que apresentem desigualdades territoriais análogas às observadas em São Paulo.

Entre as limitações do estudo, destacam-se a ausência de correção para autocorrelação espacial, a simplificação dos modelos por meio da exclusão de interações e inclinações aleatórias, e a não consideração das viagens não registradas e da correlação entre os indicadores de mobilidade sustentável. Futuras pesquisas podem empregar modelos de equações estruturais multinível para aprofundar a compreensão dos fatores que influenciam a mobilidade sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo 306962/2022-5) por apoiar a pesquisa, à Secretaria dos Transportes Metropolitanos do Estado de São Paulo pelo suporte institucional, e à FAPESP pelo auxílio financeiro para participação no evento. O trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cervero, R. e Kockelman, K. (1997) Travel demand and the 3Ds. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 2, n. 3, p. 199-219. DOI: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6

CMSP (2019) Pesquisa Origem e Destino 2017. Disponível em: https://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/planejamento-preparacao.aspx (acesso em jul. 2024)

Dieleman, F.M; Dijst, M. e Burghouwt, G. (2002) Urban Form and Travel Behaviour: Micro-level Household Attributes and Residential Context. *Urban Studies*, v. 39, DOI: DOI:10.1080/00420980220112801

Ewing, R. e Cervero, R. (2010) Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association*, v. 76, n. 3, p. 265-294, DOI: 10.1080/01944361003766766

Hashimoto, M. O. e Strambi, O. Classificação de Zonas OD segundo Variáveis de Ambiente Construído. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2023, Santos. Galoá, 2023. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/classificacao-de-zonas-od-segundo-variaveis-de-ambiente-construido?lang=pt-br (acesso em jul. 2024).

Levene, H. (1961) Robust tests for equality of variances. In Contributions to Probability and Statistics, Palo Alto, Stanford University Press, p. 278-292.

Ogra, A. e Ndebele, R. (2014) The Role of 6Ds. In Neo-International Conference on Habitable Environments.

Raudenbush, S. e Bryk, A. (2001) *Hierarchical Linear Models* (2ª ed.). SAGE Publications.

Schwanen, T.; Dieleman, F. M. e Dijst, M. (2004) The Impact of Metropolitan Structure on Commute Behavior in the Netherlands: A Multilevel Approach. *Growth and Change*, v. 35, n. 3, p. 304-333, DOI: 10.1111/j.1468-2257.2004.00251.x

Schwanen, T. (2021) Achieving just transitions to low-carbon urban mobility. *Nature Energy*, v. 6, n. 7, p. 685-687, DOI: 10.1038/s41560-021-00856-z

MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE OBRAS DE INFRAESTRUTURA DE RODOVIAS E VICINAIS PARA O ESTADO DO AMAZONAS COM BASE EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Pedro Henrique Andrade e Paiva Matrícula, Bruna Barbosa Matuti Mafra
Centro Universitário do Norte – UNINORTE

RESUMO
Este trabalho propõe a aplicação do Método de Decisão Multicritério (MCDA), utilizando a técnica Analytic Hierarchy Process (AHP), para priorizar obras de infraestrutura rodoviária no Estado do Amazonas. A metodologia baseia-se em critérios padronizados de levantamento em campo, que avaliam e quantificam as regiões estudadas conforme suas necessidades de intervenção. Os dados coletados foram organizados em uma matriz AHP, conforme o modelo de Thomas Saaty, visando definir prioridades de investimento público. A pesquisa é de natureza aplicada e propõe um ciclo completo de análise, desde a coleta de informações em campo até a definição das prioridades. Os resultados indicam que o modelo se mostrou eficaz tanto na coleta de dados quanto na priorização das obras. Além disso, observou-se a possibilidade de adaptação do modelo para outras análises, reforçando seu potencial como ferramenta estratégica na alocação de recursos públicos em infraestrutura.

Palavras-chaves: *Analytic Hierarchy Process*, Análise Multicritério, Amazonas, Estradas, Rodovias.

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Amazonas possui uma malha viária significativa, com mais de 3.500 km de rodovias cadastradas no Sistema Rodoviário Estadual (SRE) e mais de 11 mil km de estradas rurais (SEINFRA-AM, 2023). Esse modal de transporte tem papel essencial no desenvolvimento regional, promovendo a ocupação de áreas anteriormente inacessíveis. As vias terrestres expandiram-se por meio de ações governamentais e também por implantações informais, muitas vezes ligadas a atividades ilegais como pecuária e garimpo (Maciel, 2007).

Segundo a SEINFRA-AM (2023), as vias não oficiais apresentam padrão construtivo precário e são fundamentais para o acesso de comunidades e o escoamento da produção agrícola, sendo altamente vulneráveis às condições climáticas, o que compromete o acesso a serviços básicos (Maciel, 2007). Ramani (2011) destaca que a formulação de políticas públicas de transporte é dificultada por informações dispersas e incompletas, o que se agrava na região amazônica.

Diante disso, este trabalho propõe o uso de critérios padronizados de levantamento em campo, aplicados por órgãos competentes, e a utilização do método AHP como ferramenta de análise multicritério para subsidiar a priorização de investimentos em infraestrutura rodoviária, promovendo decisões mais eficazes e alinhadas às reais necessidades do Estado. do estado.

2. METODOLOGIA

Este estudo, de natureza aplicada e caráter exploratório, utilizou uma abordagem quali-quantitativa para aplicar o método de priorização de obras de infraestrutura pública no Estado do Amazonas. A coleta de dados ocorreu entre 28/04/2023 e 11/08/2023, com base em levantamentos de campo em quatro locais definidos a partir do Banco de Dados do Departamento Rodoviário 2023 (SEINFRA-AM): os ramais Janauri, Jandira, Manápolis e a Estrada do Novo Remanso, localizados nas rodovias AM-070, AM-452 e AM-010.

As informações obtidas foram avaliadas com base em uma escala de rating elaborada pelo pesquisador, considerando os critérios: Desenvolvimento Local, Vulnerabilidade de Transporte e Dificuldade de Elaboração de Projeto e Execução. Para a análise quantitativa, foi empregada a metodologia de análise multicritério AHP, conforme proposto por Saaty (2008), permitindo calcular a prioridade das intervenções em infraestrutura. Por fim, os resultados foram analisados e a aplicação da metodologia foi validada.

3. ABORDAGEM MULTICRITÉRIO E DISCUSSÃO

No setor público, a tomada de decisão é essencial para uma gestão eficaz, exigindo a consideração de diversos fatores que devem ser avaliados e priorizados. Segundo Venâncio Junior (2019), todos os níveis de governo enfrentam a limitação de recursos diante de múltiplas demandas sociais, especialmente no que se refere a investimentos em infraestrutura, que costumam demandar altos valores em prazos curtos. Assim, é

fundamental a adoção de políticas de planejamento que permitam avaliar previamente a relevância e urgência dos investimentos, garantindo maior eficiência na alocação dos recursos públicos (Venâncio Junior, 2019).

Nesse contexto, destaca-se a importância da aplicação de Métodos de Decisão Multicritério (MCDA) como ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo esclarecer problemas complexos e propor soluções considerando múltiplos critérios muitas vezes conflitantes (Santos e Aguiar, 2019). Dentre os métodos existentes, como ELECTRE, PROMETHEE, Programação Linear e TOPSIS, o presente estudo adota o método AHP.

4. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) é uma técnica de decisão multicritério que permite decompor um problema complexo em uma estrutura hierárquica, facilitando a análise e priorização dos critérios envolvidos (Saaty, 1991). Essa abordagem possibilita organizar os elementos em diferentes níveis, evidenciando a relação de subordinação entre eles com o objetivo de alcançar uma decisão mais precisa (Ribeiro & Alves, 2016). O processo inicia-se com a construção de uma árvore hierárquica que representa o problema, incluindo o objetivo principal e as alternativas que serão avaliadas e priorizadas indicado pela Figura 1.

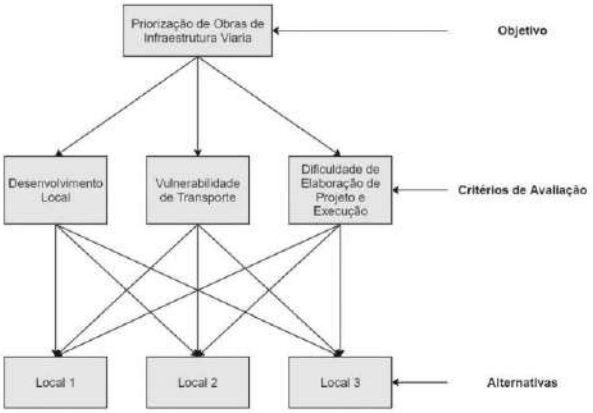


Figura 1: Arvore hierárquica AHP.

5. LEVANTAMENTO EM CAMPO

O levantamento em campo teve como objetivo padronizar e quantificar os dados por meio de três critérios principais: Desenvolvimento Local, Vulnerabilidade de Transporte e Dificuldade na Elaboração de Projeto e Execução. Esses critérios foram organizados em uma escala de rating para subsidiar a análise multicritério, possibilitando a identificação das características e necessidades de cada local estudado.

5.1. Desenvolvimento Local

Este critério visa mensurar a desigualdade de desenvolvimento regional, considerando o uso do solo e o nível de ocupação. Ambos os subparâmetros são avaliados em escala de 0 a 5, totalizando uma pontuação final de 0 a 10.

5.1.1. Uso do Solo

Avalia a forma de ocupação do espaço geográfico segundo as definições da ANA (2016), incluindo atividades como agricultura, extrativismo e empreendimentos imobiliários (Nascimento & Marques, 2019). O pesquisador definiu cinco classes para análise: acesso a comunidades ou distritos, assentamentos oficiais (com base em dados do INCRA e ARCGIS Pro), zonas agrícolas, zonas turísticas e atividades extrativistas ou industriais. Cada classe presente no local recebe 1 ponto, totalizando até 5 pontos. As classes foram conceituadas com base nas características socioeconômicas e produtivas locais, visando captar a diversidade de usos do território.

5.1.2. Nível de Ocupação

O critério de nível de ocupação avalia a dinâmica populacional e espacial da área estudada por meio de duas classes pontuadas de 1 a 5, cuja média define a nota final:

I. População Estimada: cálculo baseado na contagem de habitações registradas em campo, considerando

uma média aproximada de quatro moradores por residência, conforme dados do Censo 2022 (IBGE).

II. Número de Entroncamentos na Via (Sub-ramais): contabilização dos cruzamentos de vias locais (sub-ramais) que conectam a outras regiões, atribuindo maior pontuação às vias com mais entroncamentos, indicativo de maior potencial de interligação territorial.

Esse critério permite mensurar a intensidade e a conectividade da ocupação nas áreas analisadas.

5.2. Vulnerabilidade de Transporte

O critério de vulnerabilidade de transporte avalia a fragilidade de uma região diante de eventos extremos, como mudanças climáticas, por meio de cinco classes, cada uma pontuada de 0 (ausência) ou 1 (presença). Essas classes são:

I. Acesso Intermodal: vias que conectam a outros modais, como portos, terminais flutuantes ou aeroportos.
II. Vias de Acesso Alternativa: rotas terrestres alternativas caso a principal fique intransitável.
III. Boa Trafegabilidade Terrestre: capacidade da via de permitir circulação sem dificuldades, mesmo sem pavimentação.
IV. Infraestrutura de Acesso: presença de obras como pontes, drenagens e acessos que garantem condições adequadas de tráfego, avaliada de 0 a 1.
V. Acesso a Serviços Públicos: existência de edifícios destinados a serviços públicos (escolas, hospitais, órgãos administrativos), também avaliada de 0 a 1 (Horcaio, [s.d.]).

Este critério permite medir o grau de acessibilidade e resiliência das vias em contextos adversos.

5.3. Dificuldade de elaboração de projetos e execução

O critério utilizado tem o propósito de avaliar a complexidade associada à concepção e execução dos projetos nas áreas de estudo, identificando pontos de dificuldade na região e fatores que podem prolongar ou atrasar a execução da obra. As classes são pontuadas numa escala de 0 a 3 e posteriormente somadas para alcançar uma nota no critério que varia de 0 a 10.

I. O levantamento altimétrico no Amazonas foi simplificado pelo pesquisador ao dividir o estado em três regiões conforme Ross (1985): planícies do Rio Amazonas (100–200 m), depressões marginais Norte-amazônicas (200–300 m) e planaltos da Amazônia oriental (400–500 m). Este estudo focou na região metropolitana, com elevações entre 0 e 200 m, utilizando GPS para medir a altitude e classificando-a com notas de 1 a 3.
II. Quanto ao tipo de terreno, adotou-se a classificação de Lima (1958): terra firme (terreno não inundável), várzea (floresta temporariamente inundável) e igapós (áreas permanentemente alagadas). Para facilitar o planejamento e reduzir custos, foi atribuído zero ponto para terra firme, 1 para várzea e 2 para igapós, com confirmação em campo e análise cartográfica via ARCGIS PRO.
III. Áreas protegidas e sítios arqueológicos receberam pontuação binária (0 ou 1) conforme sua presença, baseando-se em dados do Serviço Geológico do Brasil (2010), INPE e IPHAN, que consideram unidades de conservação e locais com vestígios arqueológicos significativos.
IV. Por fim, as Obras de Artes Especiais (OAES) — como pontes, viadutos e túneis — foram classificadas de 0 a 3, indicando desde ausência (0), existência (1), necessidade de intervenção (2) até necessidade de implantação (3) dessas estruturas nas áreas estudadas.

6. PONTUAÇÃO DOS DADOS COLETADOS EM CAMPO

Foram atribuídas pontuações aos locais visitados com base em quatro critérios: Uso do Solo, Nível de Ocupação, Vulnerabilidade de Transporte e Dificuldade de Elaboração. Em Manápolis, destacou-se a Dificuldade de Elaboração com nota 4, enquanto o Uso do Solo obteve a menor pontuação (2,5). Em Novo Remanso, os maiores valores foram observados no Nível de Ocupação e na Vulnerabilidade de Transporte (ambos com nota 5), contrastando com a Dificuldade de Elaboração, que recebeu apenas 1 ponto. Já em Januári, a Dificuldade de Elaboração atingiu a nota máxima (7), seguida pelo Uso do Solo (4,5), sendo o Nível de Ocupação o critério com menor pontuação (3). Em Jandira, os critérios de Nível de Ocupação e Dificuldade de Elaboração também alcançaram a nota máxima (7), enquanto a Vulnerabilidade de Transporte foi a mais baixa (nota 2). Esses resultados evidenciam contrastes significativos entre os locais analisados, permitindo uma avaliação comparativa das condições territoriais e operacionais observadas em campo.

6.1. Inserção dos dados na matriz AHP

6.1.1. Comparação par a par e vetor prioridade

Para avaliar e comparar as preferências relativas entre diferentes critérios ou alternativas, foi utilizada uma escala de comparação que varia de 1 a 9, onde 1 indica que ambos os elementos têm igual importância e os valores intermediários representam níveis variados de preferência.

Nessa etapa, realizou-se uma análise comparativa dos critérios definidos para a coleta de dados em campo, com o objetivo de determinar os vetores de prioridade, que indicam a importância relativa dos critérios na tomada de decisão. O pesquisador ponderou os critérios conforme a etapa inicial do estudo e calculou os valores do vetor de prioridade.

Com base nas ponderações do pesquisador, a ordem de prioridade de influência dos critérios é dada pela "Vulnerabilidade de Transporte" (0,648), seguido por "Dificuldade de Elaboração de Projeto" (0,230) e "Desenvolvimento Local" (0,122).

Tabela 1: Matriz AHP.

	Vulnerabilidade de transporte	Desenvolvimento local	Dificuldade de Projeto	Vetor Prioridade
Vulnerabilidade de transporte	1	3	5	0,648
Desenvolvimento local	0,333333333	1	2	0,230
Dificuldade de Projeto	0,2	0,5	1	0,122

6.1.2. Análise de consistência do julgamento

Para verificar a consistência dos julgamentos expressos no vetor de prioridade, foram calculados o Índice de Consistência (CI) e a Razão de Consistência (CR). Os resultados obtidos foram CI = 0,001848 e CR = 0,003187, valores que indicam alta consistência segundo os parâmetros aceitos para matrizes de ordem 3. Portanto, pode-se afirmar que as avaliações par a par realizadas estão consistentes e adequadas para a análise.

6.1.3. Resultados ranqueados

Para estabelecer a hierarquia entre as alternativas analisadas, os valores do vetor prioridade foram utilizados como pesos para cada critério avaliado, que, multiplicados pelas pontuações obtidas, geraram uma soma total para cada alternativa. Essas notas foram então normalizadas e expressas em porcentagem para facilitar a visualização. Os resultados indicam que o Ramal Manápolis apresenta a maior prioridade (28,14%), seguido pelo Ramal Janauari (27,11%), Ramal Jandira (24,26%) e Estrada do Novo Remanso (20,49%), refletindo a influência dos critérios de vulnerabilidade de transporte, dificuldade de elaboração e desenvolvimento local na priorização das intervenções.

6.1.4. Interpretação dos resultados

Após a ponderação dos critérios e a aplicação dos cálculos, verificou-se que a priorização dos investimentos públicos direciona-se para os locais que apresentam maior necessidade de intervenção do poder público. Essa necessidade é evidenciada principalmente pela elevada Vulnerabilidade de Transporte, em associação ao nível de Desenvolvimento Local, sendo o resultado final balanceado pelo grau de Dificuldade de Elaboração e Execução dos Projetos. A partir dessa configuração, foi possível delinear cenários que refletem, de forma hierarquizada, as áreas mais urgentes para a alocação dos recursos públicos.

Quatro locais foram classificados em ordem de prioridade:

I. O Ramal Manápolis lidera devido à alta vulnerabilidade e baixa dificuldade de projeto;
II. O Ramal Janauari ocupa a segunda posição, por combinar vulnerabilidade significativa e elevado desenvolvimento local;
III. O Ramal Jandira fica em terceiro, apesar do baixo desenvolvimento, devido à alta vulnerabilidade e alta dificuldade de projeto;
IV. A Estrada do Novo Remanso aparece em quarto lugar, com baixa vulnerabilidade, justificando menor necessidade de intervenção.

Três cenários distintos para a alocação dos investimentos foram identificados:

I. Locais com alto desenvolvimento e infraestrutura precária, onde o investimento é prioritário mesmo com projetos difíceis;
II. Áreas com baixa ocupação e alta vulnerabilidade, mas alta dificuldade de projeto, recebendo prioridade secundária por baixo benefício populacional;
III. Regiões com menor vulnerabilidade, que, apesar de desenvolvimento, têm prioridade inferior.

7. CONCLUSÃO

O emprego de métodos multicritério, com destaque para o AHP, possibilitou organizar e priorizar obras de infraestrutura pública de forma transparente e comparável, a partir de critérios padronizados em campo. A aplicação do método e dos critérios definidos permitiu ponderar pesos diferenciados às variáveis analisadas, de modo a não apenas identificar locais com maior vulnerabilidade de transporte, mas também oferecer contrapontos em situações em que as pontuações se mostraram muito próximas. Essa abordagem amplia a utilidade prática para gestores públicos, ao fornecer subsídios objetivos para uma priorização mais equilibrada e contextualizada, evitando que as decisões se restrinjam a um simples ranqueamento. Além disso, a flexibilidade da metodologia possibilita sua adaptação a novos contextos e variáveis, ampliando o potencial de replicação em diferentes cenários de planejamento público.

REFERENCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas (2016) *Uso da Terra: ANA 2016*. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d56de925-d890-4fc9-8ab1-15ecd1b6d8c7 (acesso em 22/11/2023).

Biazon, O. e I. Horcaio (2023) *Significado de EDIFÍCIO PÚBLICO*. Disponível em: https://vademecumbrasil.com.br/palavra/edificio-publico (acesso em 24/11/2023).

INCRA – Instituto Nacional da Colonização e Reforma Agrária (2023) *Exportar Shapefile*. Disponível em: https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py (acesso em 24/11/2023).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) *Censo Brasileiro de 2023. Cidades e Estados: Amazonas*. IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am.html (acesso em 22/11/2023).

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2023) *Amazônia Legal – Áreas Indígenas na Amazônia Legal*. Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/ (acesso em 22/11/2023).

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2023) *Amazônia Legal – Unidades de Conservação na Amazônia Legal*. Disponível em: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/ (acesso em 22/11/2023).

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (2023) *Bancos de Dados – Patrimônio Arqueológico*. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/1701/ (acesso em 22/11/2023).

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (2023) *Fototeca Sítios Arqueológicos*. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/fototeca/detalhes/17/fototeca-sitios-arqueologicos (acesso em 22/11/2023).

Lima, R. R. (1958) *Aspectos fisiográficos da região amazônica*. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1124494/aspectos-fisiograficos-da-regiao-amazonica (acesso em 29/11/2023).

Maciel, J. e M. Santos (2007) *Diagnóstico ambiental de estradas vicinais na Amazônia*. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte.

Maia, M.; et al. (2010) *Geodiversidade do estado do Amazonas*. Disponível em: http://dspace.cprm.gov.br/handle/doc/16624 (acesso em 29/11/2023).

Nascimento, M.; et al. (2019) *Paisagem à vista: desvendando o espaço e aspectos do uso e ocupação do solo*.

Ribeiro, M. e A. da Silva Alves (2016) Aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) com a mensuração absoluta num problema de seleção qualitativa. *Sistemas & Gestão*, v. 11, n. 3, p. 270–281. Disponível em: https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/3255 (acesso em 22/11/2023).

Ross, J. (1985) Relevo Brasileiro: Uma nova proposta de classificação. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 4, p. 25–39. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47094

Santos, D. e E. Aguiar (2019) Priorização das atividades de projeto na construção civil através da abordagem multicritério. *Revista Produção Online*, v. 19, n. 4, p. 1177–1196. Disponível em: https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/3255 (acesso em 22/11/2023).

Amazonas, S. (2023) *Documento da Base de dados do Departamento Rodoviário 2023*. Manaus.

Saaty, T. (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1. Disponível em: https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSSCI.2008.017590?journalCode=ijssci (acesso em 22/11/2023).

Saaty, T. (1991) *Método de Análise Hierárquica: Tradução de Wainer da Silveira e Silva*. McGraw-Hill, Makron, São

Paulo.

Venancio Jr., A. (2019) *Contribuição ao processo de priorização de investimentos em infraestrutura de transportes por modelos de análise multicritério*. Brasília. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/3991 (acesso em 29/11/2023).

Zietsman, J. e T. Ramani (2011) *Sustainability Performance Measure for State DOTs and Other Transportation Agencies*. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System, College Station, Texas.

O TRANSPORTE CICLOVIÁRIO EM FORTALEZA E O CRESCIMENTO DO PROJETO BICICLETAR – UM ESTUDO DE CASO DA ESTAÇÃO 74

Mateus Barboza Tavares, João Vitor Lustosa, Patricia Pessoa Lima, Camila Bandeira Cavalcante
Universidade de Fortaleza - UNIFOR

RESUMO
O estudo analisa o uso da Estação 74 do sistema Bicicletar, em Fortaleza, para compreender a evolução do transporte cicloviário na cidade. Utilizando dados da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) entre 2021 e 2025, foram observados padrões de deslocamento, perfil de usuários e relações territoriais no entorno da estação. Os resultados apontam que 37% das viagens conectam a Estação 74 a estações próximas da comunidade de baixa renda do Dendê, revelando o papel da bicicleta como meio de transporte acessível a camadas sociais em situação de vulnerabilidade socioeconômica. A pesquisa destaca o potencial do sistema para promover integração modal e mobilidade equitativa, evidenciando a importância do planejamento público na expansão cicloviária em áreas menos assistidas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O deslocamento urbano por bicicleta constitui um importante modo de transporte com potencial de reduzir a predominância do carro na cidade e de seus efeitos negativos, sendo os sistemas de bicicletas compartilhadas - SBC, um importante componente no fomento à acessibilidade, sustentabilidade e segurança viária no âmbito urbano (Henriksson, Wallsten e Ihlström, 2022; Callil e Costanzo, 2019).

Fortaleza se destaca ao longo dos últimos 14 anos, nas iniciativas de implementação e expansão de uma malha cicloviária multifocal, apresentando um crescimento relativo de cerca de 730% da sua malha cicloviária, de 2012 à 2025. Em 2012, existiam 68,8 km de infraestruturas dedicadas à circulação de bicicletas que evoluíram para 501,7 km em 2025. Esta iniciativa concedeu à cidade notoriedade na área, tendo sido vencedora de premiações nacionais e internacionais nos últimos anos pelos resultados alcançados no aumento do uso do modo cicloviário (G1, 2023). Neste período, foi implementado o sistema de bicicletas compartilhadas através do Projeto Bicicletar. O sistema é composto por estações, distribuídas em pontos estratégicos da cidade, onde os usuários cadastrados podem retirar uma bicicleta, utilizá-la em seus trajetos e devolvê-la na mesma, ou em outra estação (Bicicletar, 2025). Este projeto foi estruturado em uma fase inicial de implantação e duas fases de expansão. A primeira fase teve início em 2015, por meio de parceria entre o poder público e a iniciativa privada, com a implantação e funcionamento de 15 estações. Entre 2016 e 2019, o sistema passou a contar com 80 estações viabilizadas por meio de patrocínio privado, e a partir de 2020 o sistema foi ampliado adicionando 115 novas estações financiadas com recursos públicos. Por fim, foram acrescentadas mais 58 estações em 2024, atingindo o total de 253 estações (Fortaleza, 2024).

Neste trabalho, foi desenvolvida uma análise do potencial de utilização do Sistema de Bicicletas Compartilhadas (SBC) de Fortaleza - Bicicletar, usando como estudo de caso a Estação número 74, aqui chamada de Estação UNIFOR, no bairro Edson Queiroz. O bairro estudado concentra grande quantidade de geradores de tráfego, como o Shopping Iguatemi, Centro de Feiras e Eventos do Ceará e a Universidade de Fortaleza, Fórum Clóvis Beviláqua, além de várias áreas comerciais. A escolha desta estação está relacionada com a presença da Universidade de Fortaleza, fundada em 1973 e que possui mais de 25 mil alunos, sendo a segunda maior universidade do estado do Ceará. A Figura 1 apresenta algumas localidades relevantes de Fortaleza e os principais campi universitários da cidade.

Dessa forma, o objetivo do artigo é compreender a evolução do transporte cicloviário em Fortaleza, através do estudo de caso da Estação Bicicletar de número 74, denominada Unifor, através da coleta de dados como: número de viagens realizadas nesta estação, perfil dos usuários, origens e destinos das viagens e outras informações que possam caracterizar o padrão das viagens.

.

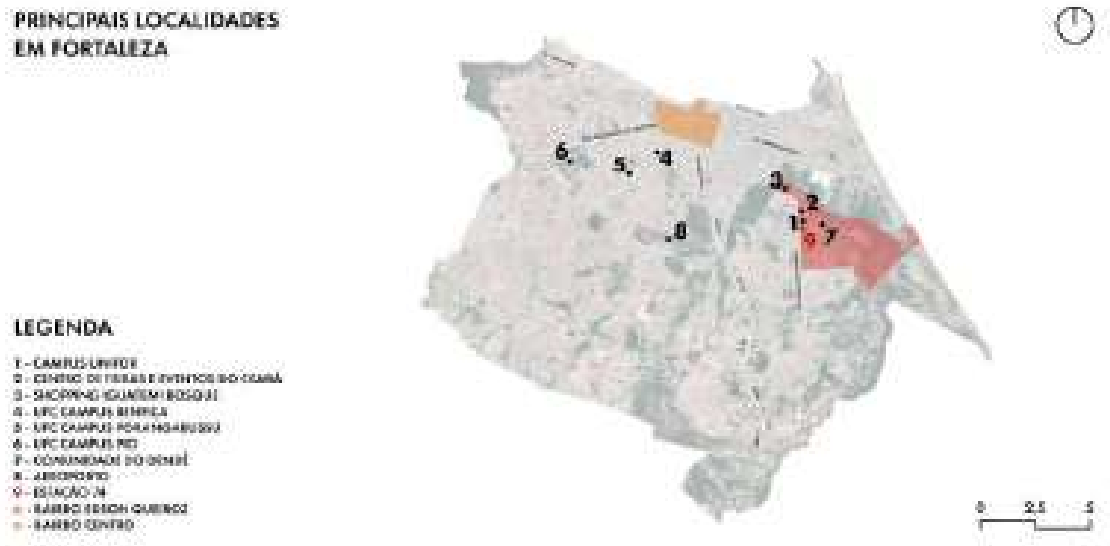


Figura 1: Principais localidades da cidade de Fortaleza. Fonte: Elaborado pelo autor.

2. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como descritiva e exploratória, de natureza qualitativa-quantitativa, tendo como procedimento a análise de estudo de caso da Estação 74 do sistema Bicicletar, em Fortaleza. Para a coleta de dados, foram utilizados dados gerenciados pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) referentes ao período de 2021 a 2025, complementados por observação do contexto territorial e documental sobre a expansão do sistema cicloviário. As informações foram tratadas por meio de estatística descritiva, contemplando séries temporais de viagens e padrões de origem-destino, além de análise de conteúdo e sua relação com a dinâmica de transportes da cidade e do entorno imediato.

3. COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados considerou o período de janeiro a maio, dos anos de 2021 a 2025, delimitando uma série temporal comparativa com os dados coletados do presente ano. Para fins de consistência analítica, foram excluídas as viagens cuja origem e destino correspondiam à mesma estação, uma vez que o foco da investigação concentrou-se na caracterização dos deslocamentos entre estações distintas do sistema. Para a estação 74, denominada Estação Unifor, os dados mostraram que em 2025, foram realizadas 1.592 viagens no período de janeiro a maio, onde 707 delas tiveram origem ou destino as estações 117, 116 e 111, demonstrando a realização de trajetos curtos interligando a Av. Washington Soares e a comunidade do Dendê e suas imediações, no bairro Edson Queiroz, em 44% das viagens.

Observando o histórico de evolução da estação 74 (Figura 2), percebe-se um triênio de incrementos nas viagens, chegando a 2.347 viagens em 2023 levando em consideração os 5 meses de análise, tendo esse número caído abruptamente em 2024, queda que se justifica pela reestruturação que o sistema passou ao longo do ano, buscando recuperação em 2025. Apesar da queda nominal das viagens, a proporção relacionada a origens e destinos à comunidade permanece alta (Figura 3), demonstrando um padrão de deslocamento que têm se consolidado mediante o uso do SBC. A despeito das viagens em 2025 da estação 74 ainda não atingirem níveis pré reestruturação do sistema, vale destacar que o número absoluto de viagens às estações 116, 117 e 111 (Dendê), por sua vez, aproximam-se da média que antecede 2024.

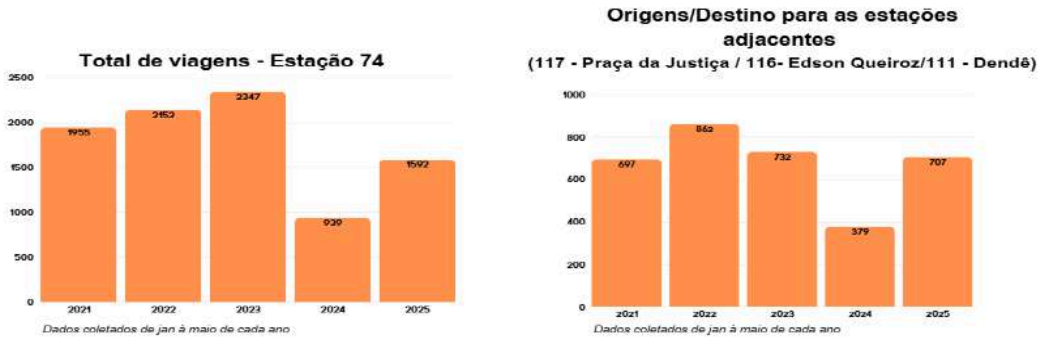
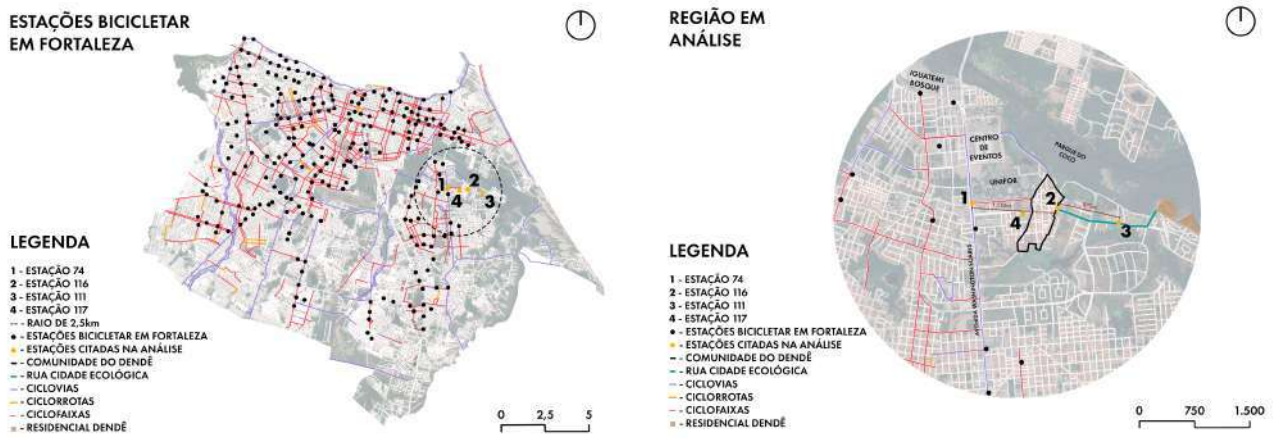


Figura 2 e 3: Total de viagens da Estação 74 e total de viagens com destino ou origem de estações adjacentes (Dendê). Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de AMC, 2025.

As estações Rua dos Coqueiros (116), Capela de São Sebastião (111) e Praça da Justiça (117), que, como mencionado, concentram a maior proporção de conexões com a Estação 74 (UNIFOR), estão localizadas a distâncias aproximadas de 0,8 km, 1,1 km e 0,2 km, respectivamente, da estação Unifor. Uma breve análise do uso do solo na área revela que a Estação 74, localizada na Av. Washington Soares, favorece a conectividade direta a pólos geradores de viagens, como o Shopping Iguatemi, o Centro de Eventos, Fórum Clóvis Beviláqua e dentre outros diversos empreendimentos comerciais distribuídos ao longo da via. Em contrapartida, as estações 116, 111 e 117 situam-se no limite da comunidade do Dendê, classificada como favela ou comunidade urbana, com população estimada em 10.550 habitantes, predominantemente residencial, apresentando pequenos comércios locais. Segundo o Plano Local de Habitação de Interesse Social de Fortaleza (PLHIS-For), a comunidade apresenta Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,181, contrastando com os bairros adjacentes Guararapes (0,767) e Luciano Cavalcante (0,522), de acordo com dados da Secretaria de Desenvolvimento Econômico.



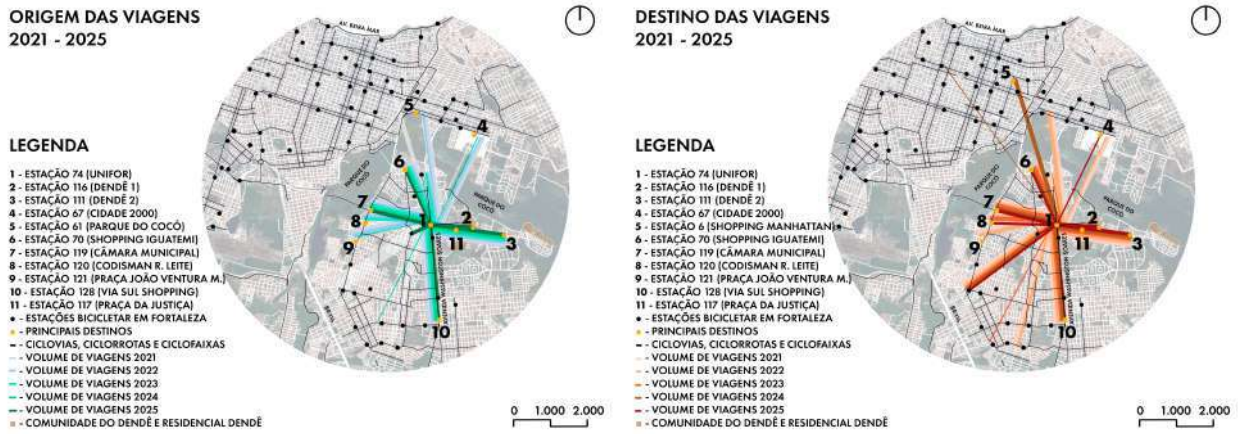
Figuras 4 e 5: Estações do Bicicletar em Fortaleza e a região em análise. Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de AMC, 2025.

Além disso, a análise de dados mostra ainda que a média de idade dos usuários da estação 74 na amostragem temporal analisada é de 30,6 anos, sendo 62% dos usuários homens e 38% mulheres. O horário com maior volume de viagens, considerando saídas e chegadas, é no pico tarde entre 17:00h e 18:00h, tendo viagens com duração média de 22,9 minutos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de viagens da estação 74, referentes ao período de janeiro a maio entre 2021 e 2025 (Figuras 6 e 7), relatam que, embora esteja situada em um importante eixo arterial da cidade com potencial de conexão a diversas regiões e equipamentos urbanos, suas principais origens e destinos concentram-se em eixos

transversais à Av. Washington Soares, sobretudo, conectando-se às estações 119, 116 e 111, com destaque às duas últimas pela proximidade entre si, e por estarem situadas na comunidade do Dendê, no bairro Edson Queiroz. O entorno urbano da estação 74 é marcado pela presença da comunidade do Dendê, uma ocupação de baixa renda que se configura como elemento estruturante na compreensão do perfil de viagens da estação. A literatura tem apontado a forte relação entre a adoção da bicicleta e o contexto socioeconômico das populações (Ávila, Palencia, Sarmiento, Gouveia et al., 2023), reforçando a hipótese de que o Sistema de Bicicletas Compartilhadas (SBC) representa, para esses grupos, uma alternativa de transporte diante da limitação de acesso a outros modos.. A predominância de viagens transversais ao eixo da via arterial, por sua vez, dentre possíveis razões, se dá pela complementaridade e intermodalidade entre transporte coletivo e SBC. A Avenida Washington Soares, no trecho em estudo, conta com uma oferta significativa de transporte coletivo, composta por aproximadamente 22 linhas regulares do sistema urbano, incluindo linhas troncais com menores tempos de espera. Em contraste, o acesso ao bairro Dendê é atendido por apenas duas linhas alimentadoras, caracterizadas por maiores intervalos entre viagens (Fortaleza, 2025). Nesse cenário, o SBC se apresenta como uma solução adaptativa para superar lacunas de conectividade, corroborando análises recentes sobre a integração entre modos em Fortaleza (Silva, Araújo e Oliveira, 2024).



Figuras 6 e 7: Volume de viagens da Estação 74 (UNIFOR) entre 2021 e 2025. Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de AMC, 2025

Vale destacar que, no final de 2024, foi implantada uma ciclofaixa bidirecional no canteiro central da Av. Valmir Pontes, via que conecta a Av. Washington Soares à comunidade do Dendê (Figuras 8 a 12). Apesar de o período analisado após a implantação ainda não demonstrar correlação direta com aumento no fluxo de viagens entre a estação 74 e a comunidade, há expectativa de que, a médio e longo prazo, a infraestrutura incentive novos deslocamentos, como sugerem Calil e Costanzo (2019), fator que pode ser analisado em trabalhos futuros. Ademais, a análise, apesar de não relatar neste trabalho dados quantitativos detalhados anteriores a 2021, identificou que a evolução temporal do uso da estação 74, entre 2016 e 2020, período em que o equipamento operava via patrocínio privado, registrou-se uma média anual de 3.125 viagens. Após a expansão do sistema por meio de investimento público e implantação de novas estações nos bairros Edson Queiroz e Luciano Cavalcante, a média anual de viagens aumentou para 4.140. Esses resultados apontam para a relevância da política pública como fator de sustentação e expansão do SBC, garantindo que o sistema atenda áreas antes desconsideradas.







Figuras 8, 9, 10, 11 e 12: Ciclofaixa da Av. Valmir Pontes / Estações 74, 116 e 111. Fonte: Acervo pessoal do autor (2025)

Este estudo apresenta limitações importantes: restrição da análise histórica mediante ausência de dados anuais completos e falta de informações desagregadas sobre perfil socioeconômico dos usuários, que poderiam enriquecer a compreensão da interação com a comunidade do Dendê. A análise realizada, no entanto, reforça a importância de políticas públicas voltadas para a expansão do SBC em áreas de menor renda, onde o transporte coletivo apresenta deficiências. Além disso, comunica que a simples proximidade de equipamentos geradores de viagens, como universidades, não garante altos índices de uso do SBC, sendo necessário considerar aspectos de acessibilidade, desenho urbano e perfil socioeconômico. Nesse sentido, trabalhos futuros podem incorporar métodos qualitativos para compreender percepções e barreiras no uso do SBC, assim como investigar a hipótese de potencial integração entre transporte coletivo e bicicletas compartilhadas na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVILA, Ione; PALENCIA, Ione; GOUVEIA, Nelson; JÁUREGUI, Alejandra; MASCOLLI, Maria; SLOVIC, Anne; RODRÍGUEZ, Daniel. **Bicycle use in Latin American cities: changes over time by socio-economic position.** Frontiers in Sustainable Cities, 2023. Disponível em: https://lnk.ink/DXvLF .Acesso em: 06 Jul. 2025.

BICICLETAR. 2025. Disponível em: https://www.bicicletar.com.br/sobre.aspx. Acesso em: 28 jun. 2025.

CALLIL, V; COSTANZO, D; Costanzo Assis Pereira (Ed.). **Estudos de mobilidade por bicicleta**. CEBRAP, 2018.

FORTALEZA. Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza - ETUFOR. Especificação Geral de Feed de Trânsito - GTFS. **Dados Fortaleza**, Fortaleza, 2025. Disponível em: https://lnk.ink/0xjNv . Acesso em: 06 Jul. 2025.

FORTALEZA. Fundação de Desenvolvimento Habitacional de Fortaleza - HABITAFOR. Plano Local de Habitação de Interesse Social de Fortaleza – PLHIS-For. Prefeitura de Fortaleza. Fortaleza, 2012.

FORTALEZA. Prefeitura Municipal de Fortaleza. BICICLETAR 3.0: a expansão do sistema de compartilhamento de bicicletas como Política Pública para a promoção de equidade no acesso aos transportes. Prefeitura de Fortaleza. Fortaleza, 2024.

G1. Fortaleza vence programa internacional e receberá 1 milhão de dólares para investir em ciclofaixas. G1, ceará, 02 jun. 2023. Disponível em: https://lnk.ink/VGORl . Acesso em: 30 jun. 2025.

GOUDIS, P; VICTORIANO-HABIT, R; CARVALHO, T; EL-GENEIDY, A. **Barriers, adoption, and use of a bike-sharing system: a market-segment approach to current and potential users in Montréal, Canada.** Transportation Research Record, v. p. 1–14, 2025. DOI: 10.1177/03611981251340377. Disponível em: https://journals.sagepub.com/home/trr . Acesso em: 06 Jul. 2025

HENRIKSSON, Malin; WALLSTEN, Anna; IHLSTRÖM, Jonas. **Can bike-sharing contribute to transport justice? Exploring a municipal bike-sharing system.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 103, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103185. Acesso em: 06 Jul. 2025.

SILVA, Jordan; ARAÚJO, Marco; OLIVEIRA, João. **Impactos da Integração entre Bicicleta Compartilhada e Ônibus na Acessibilidade aos Empregos: o caso de Fortaleza**. 38º Congresso DE Pesquisa E Ensino em Transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos, Galoá 2024. Disponível em: https://lnk.ink/Sy3SS . Acesso em: 06 Jul. 2025.

Mateus Barboza Tavares (mateusbarboza@edu.unifor.br)
UNIFOR - Universidade de Fortaleza, TUPI - Transporte e Uso do Solo no Planejamento Integrado, Avenida Washington Soares, 1321, Edson Queiroz, Fortaleza - CE, CEP 60811-905

Uso do Solo e Transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

JUSTIFICATIVA DA EQUIVALÊNCIA FUNCIONAL ENTRE ZONAS URBANAS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

Luís Eduardo Santos Fortes[1,2], **Rodrigo Rodrigues de Freitas**[1], **Larissa Rodrigues Turini**[2], **Joyce Azevedo Caetano**[2], **Cintia Machado de Oliveira**[1], **Glaydston Mattos Ribeiro**[2]
[1] Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)
[2] Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

RESUMO
Este trabalho propõe uma classificação padrão para as áreas urbanas dos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, que fazem parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Com base na análise comparativados planos diretores e das regras de uso do solo, foram identificadas semelhanças e diferenças entre as classes urbanas locais. A partir disso, elaborou-se um quadro com nove categorias normalizadas (Z01 a Z09), determinadas por critérios como papel urbano principal, forma, permissão de uso e função regional. O objetivo é fornecer uma base comum que permita a integração de dados, a coordenação de regras e o planejamento regional. Essa proposta contribui para a promoção de uma melhor articulação entre os municípios, reduzindo discrepâncias institucionais, fortalecendo a gestão metropolitana e criando políticas públicas mais integradas.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento territorial urbano representa um grande desafio para regiões metropolitanas, marcadas por dinâmicas complexas, múltiplas legislações e contextos locais diversos. Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, especialmente nos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, essa dificuldade se manifesta na falta de critérios unificados para delimitação das zonas urbanas. Cada município utiliza nomenclaturas e parâmetros próprios, o que compromete análises comparativas, integração de informações e formulação de políticas públicas em escala metropolitana.

Diante desse cenário, torna-se necessário desenvolver instrumentos que permitam uma leitura integrada do território, superando barreiras conceituais e legais. Uma estratégia possível é a criação de uma classificação única para as zonas urbanas desses municípios, fundamentada em critérios urbanísticos, legais e morfológicos. Portanto, o objetivo deste estudo é propor essa padronização, de modo a favorecer a compatibilização de dados e normas, além de contribuir para um planejamento regional mais coordenado e eficaz. Esta classificação é realizada a partir de uma análise comparativa dos planos diretores e das regras de uso do solo dos municípios de Rio de Janeiro, Niterói SãoGonçalo e Itaboraí.

2. METODOLOGIA

O zoneamento urbano é um dos principais instrumentos de planejamento e ordenamento territorial adotados pelos entes municipais para regular o uso e a ocupação do solo urbano, buscando compatibilizar os interesses públicos e privados, promover o desenvolvimento urbano sustentável e assegurar a função social da propriedade. Em um contexto metropolitano, como o da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, caracterizada por conurbações e continuidade funcional entre os territórios dos municípios, torna-se estratégico dispor de uma classificação normalizada das zonas urbanas. Tal classificação permite a integração de dados, a análise comparativa, a compatibilização de legislações e a produção de diagnósticos regionais com base em critérios unificados.

Nesse sentido, esta pesquisa propõe uma tabela de equivalência funcional (Tabela 1) entre zonas urbanas identificadas nos planos diretores e nas legislações de uso e ocupação do solo dos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí. Essa classificação foi organizada em nove categorias normalizadas (Z01 a Z09), cada uma delas concebida a partir da função urbana predominante, da morfologia, da permissividade de usos e do papel no sistema urbano regional.

Tabela 1: Classificação normalizada das zonas urbanas.

id_zona	id_normalizado	categoria_normalizada	Rio de Janeiro	Niterói	São Gonçalo	Itaboraí
1	Z01	Zona de Preservação Ambiental	ZCA	ZPA; ZCA; PARQUE	Z1	APP; APAM; AEIA
2	Z02	Zona Agrícola Rural	ZA	ZDS	Z2	ZRPA
3	Z03	Zona de Expansão Urbana	ZEU	ZEU	Z3	ZEU; ZURBE; ZUD

id_zona	id_normalizado	categoria_normalizada	Rio de Janeiro	Niterói	São Gonçalo	Itaboraí
4	Z04	Zona Residencial Unifamiliar/Multifamiliar	ZRU; ZRM	ZRU; ZRM; ZRA	Z5; Z6	ZUC
5	Z05	Zona Urbana de Uso Misto/Comercial/Central	ZUM; ZCC; ZCS	ZUM; ZC; ZCM; ZCL	Z7; Z8; Z9	ZUM; ZUAP
6	Z06	Zona Industrial	ZOE; ZUPI; ZDM	ZDE	Z4	ZUI; ZUPI; ZE
7	Z07	Zona de Interesse Social	ZEIS	ZEIS; ZC-ZEIS		ZEIS 1; ZEIS 2; AEIS
8	Z08	Zona Patrimonial/Cultural	APAC	ZEPAC		APAC
9	Z09	Zona Especial Urbana	ZPP; ZFU; ZEITE; ZEI	AEIT		APM; ZEI

3. RESULTADOS

Como principal resultado deste estudo, apresenta-se uma proposta de categorização funcional das zonas urbanas dos municípios de Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, elaborada a partir de uma análise comparativa de seus planos diretores e legislações de uso e ocupação do solo. A classificação foi estruturada em nove categorias normalizadas, que agrupam zonas com funções urbanas equivalentes, levando em consideração aspectos legais, morfológicos e de permissividade de uso.

Essa sistematização visa facilitar a leitura integrada do território metropolitano, promovendo a interoperabilidade de dados entre diferentes municípios, o aprimoramento da governança urbana e a construção de políticas públicas coordenadas. A seguir, detalha-se cada uma das categorias propostas, identificadas como Z01 a Z09, justificando a equivalência com base em parâmetros urbanísticos e referências legais.

- Z01: Zona de Preservação Ambiental

Esta categoria compreende áreas cuja função primordial é garantir a conservação da biodiversidade, proteger ecossistemas sensíveis e assegurar a estabilidade dos serviços ambientais essenciais à vida urbana e à manutenção climática regional. Ela agrega zonas como ZCA-1 e ZCA-2 no Rio de Janeiro, ZPA e ZCA em Niterói, Z1 em São Gonçalo e APP, APAM, AEIA e APM em Itaboraí. Tais zonas geralmente são sobrepostas a encostas com declividade acentuada, faixas marginais de corpos hídricos, fragmentos florestais remanescentes, manguezais e áreas de proteção integral. Segundo o arcabouço legal estabelecido pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) e pelas diretrizes do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), são zonas onde o uso do solo é restrito ou condicionado a atividades de baixo impacto, não se admitindo urbanização densa. São também fundamentais para a manutenção do ciclo hidrológico, da infiltração de águas pluviais e para a formação de corredores ecológicos. Sua delimitação deve observar legislação federal como o Código Florestal (Lei 12.651/2012), além de normas estaduais e municipais.

- Z02: Zona Agrícola Rural

Esta categoria compreende as zonas cuja vocação está associada ao uso do solo para fins agropecuários, extrativistas, agroflorestais ou de conservação com uso produtivo. Estão incluídas a ZA do Rio de Janeiro, ZDS de Niterói, Z2 de São Gonçalo e ZRPA de Itaboraí. Essas zonas são essenciais à segurança alimentar regional, atuam como barreiras ao espraiamento urbano e exercem papel ambiental relevante. A legislação urbanística frequentemente as define como fora do perímetro urbano, ou dentro dele, mas com uso predominantemente rural. A literatura do planejamento territorial indica que tais zonas devem ter instrumentos de proteção específicos, como limitação ao parcelamento urbano, incentivo a atividades sustentáveis, apoio à agricultura familiar e regulação fundiária.

- Z03: Zona de Expansão Urbana

Trata-se de uma categoria essencial ao planejamento territorial, pois representa a interface entre o urbano consolidado e as áreas de urbanização futura. Engloba zonas como ZEU (presente nos quatro municípios), Z3 (São Gonçalo), ZUD e ZURBE (Itaboraí). Estas zonas funcionam como reserva estratégica de solo urbano, a ser ocupada de forma ordenada mediante diretrizes de infraestrutura, mobilidade, saneamento e acesso a serviços. Elas estão sujeitas à elaboração de planos urbanísticos específicos, projetos de parcelamento e à análise de viabilidade técnica e ambiental para expansão. A literatura urbanística alerta para os riscos da ocupação espontânea nessas áreas, que deve ser evitada por meio de controle de uso do solo, zoneamento progressivo e instrumentos como a outorga onerosa (Villas-Bôas, 2012; Maricato, 2011; Lefebvre, 2001).

- Z04: Zona Residencial Unifamiliar/Multifamiliar

Esta categoria compreende o tecido urbano de uso predominantemente residencial, englobando tanto áreas de casas quanto condomínios e edifícios. Reúne as zonas ZRU e ZRM (Rio de Janeiro), ZRU, ZRM e ZRA (Niterói), Z5 e Z6 (São Gonçalo) e ZUC (Itaboraí). A equivalência não distingue entre baixa, média ou alta densidade, e sim reconhece o uso como majoritariamente habitacional. Tais zonas apresentam regulamentação específica quanto a taxa de ocupação, recuos, altura máxima e coeficiente de aproveitamento. Representam, na maioria dos casos, áreas consolidadas de ocupação formal com infraestrutura implantada e padronização morfológica. A proteção da função residencial dessas zonas é fundamental para evitar a gentrificação e a pressão imobiliária descontrolada.

- Z05: Zona Urbana de Uso Misto/Comercial/Central

Essa categoria contempla as zonas urbanas de maior permissividade funcional, nas quais coexistem usos residenciais, comerciais, institucionais e de serviços. Inclui ZUM, ZCC, ZCS (Rio de Janeiro), ZUM, ZC, ZCM e ZCL (Niterói), Z7, Z8, Z9 (São Gonçalo) e ZUM e ZUAP (Itaboraí). Tais zonas estão localizadas em centralidades urbanas, eixos estruturantes, vias arteriais ou centros históricos. A lógica de uso misto favorece a diversidade funcional, a caminhabilidade, o uso racional da infraestrutura e a vitalidade urbana. Os parâmetros urbanísticos são mais flexíveis, permitindo maior densidade e altura. Segundo Gehl (2013), o desenho urbano que favorece a convivência entre pedestres e atividades comerciais em ambientes públicos contribui diretamente para a qualidade de vida urbana. Jacobs (2011) defende que a mistura de usos é essencial para garantir diversidade, segurança e dinamismo urbano. De acordo com UN-Habitat (2009), cidades sustentáveis devem ser densas, inclusivas e multifuncionais, e as zonas de uso misto são o caminho para alcançar esse modelo. Portanto, a equivalência dessas zonas visa refletir seu papel estratégico na estruturação do território e na promoção de uma urbanidade vibrante e resiliente.

- Z06: Zona Industrial

Inclui zonas de uso predominantemente industrial, logístico ou de serviços pesados, como ZUPI, ZUI, ZOE, ZDE, ZDM e ZE. Essas zonas estão situadas preferencialmente em regiões periféricas, junto a eixos de transporte de carga, anéis rodoviários e plataformas logísticas. Sua principal função é concentrar as atividades de transformação e distribuição, promovendo a especialização funcional do território. Nelas, os usos residenciais são geralmente proibidos ou condicionados. Possuem regulação própria quanto a emissões, ruídos, trafegabilidade e ocupação do solo. A função logística dessas zonas é vital para a economia urbana e regional, especialmente em corredores de exportação e produção.

- Z07: Zona de Interesse Social

Abriga áreas designadas para a urbanização de assentamentos precários, regularização fundiária e provisão de habitação de interesse social. Inclui ZEIS, AEIS, ZC-ZEIS e subdivisões como ZEIS 1 e 2, presentes nos quatro municípios. A delimitação dessas zonas segue as diretrizes do Estatuto da Cidade (Brasil, 2001) e se alinha a políticas de equidade socioespacial. Os parâmetros de uso do solo são diferenciados, visando permitir construções mais acessíveis, maior densidade e flexibilização de exigências urbanísticas. Além disso, estão sujeitas à atuação integrada do poder público, com investimentos em infraestrutura, mobilidade e saneamento. A REURB (Regularização Fundiária Urbana) é o principal instrumento associado a essas zonas.

- Z08: Zona Patrimonial/Cultural

Compreende as áreas protegidas por seu valor histórico, cultural, arquitetônico ou simbólico. Abarca APAC (Rio de Janeiro e Itaboraí), ZEPAC (Niterói) e APAU (São Gonçalo). Nessas zonas, vigora legislação específica de proteção do patrimônio, com regras para intervenção em fachadas, volumetrias, materiais e usos. Tais áreas têm como objetivo conciliar a manutenção da memória urbana com o uso funcional do solo. Elas são geralmente acompanhadas de planos de manejo ou projetos de requalificação urbana e desempenham um papel importante na identidade urbana e no turismo cultural.

- Z09: Zona Especial Urbana

Agrupa zonas voltadas a equipamentos urbanos de grande porte, infraestrutura pública, instituições, centros de logística ou pesquisa. Inclui ZEI, ZFU, ZEITE, ZPP e APM. São áreas cujo uso é estratégico, com função regional e não está vinculado ao mercado imobiliário. A regulação dessas zonas é diferenciada, podendo

permitir usos exclusivos e parcelamento específico. São indispensáveis para o funcionamento da cidade (educação, saúde, segurança, mobilidade, energia, abastecimento), sendo sua localização definida por critérios técnicos e institucionais.

Como síntese, a estruturação da tabela de equivalência de zonas normalizadas revela-se não apenas como um exercício técnico de categorização, mas como um passo importante para o aprimoramento da governança territorial metropolitana. Ao propor uma leitura funcional unificada entre os diferentes marcos urbanísticos dos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, este trabalho possibilita a construção de um vocabulário comum entre gestores, planejadores e técnicos.

Tal uniformização contribui para a análise comparada, o planejamento regional integrado e o enfrentamento de desafios urbanos complexos, como a fragmentação institucional, a expansão urbana desordenada e a desigualdade no acesso à infraestrutura. Espera-se, portanto, que esta proposta de normalização não apenas facilite aplicações práticas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e na gestão urbana, mas que inspire iniciativas similares em outras regiões metropolitanas do país.

4. CONCLUSÃO

A construção de uma classificação padrão entre áreas urbanas dos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Itaboraí representa um passo importante para uma governança metropolitana mais articulada e eficaz. Ao reunir diferentes nomenclaturas e critérios de uso do solo em um novo padrão, o estudo oferece uma ferramenta concreta para superar a fragmentação institucional e apoiar o planejamento urbano em escala regional.

A organização em nove grupos permite análises comparativas, facilita a integração entre bases cartográficas e oferece suporte para a formulação de políticas públicas fundamentadas em critérios técnicos uniformes. Além disso, contribui para ampliar a clareza e a previsibilidade das normas relacionadas ao uso do solo, beneficiando gestores, técnicos, pesquisadores e a sociedade civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil. (2001). *Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade: estabelece diretrizes gerais da política urbana*. Diário Oficial da União: seção 1. Brasília, Distrito Federal.
Gehl, J. (2013). Cidades para pessoas. São Paulo: Perspectiva.
Jacobs, J. (2011). *Morte e vida de grandes cidades*. São Paulo: WMF Martins Fontes.
Lefebvre, H. (2001). *O direito à cidade*. São Paulo: Centauro.
Maricato, E. (2011). *O impasse da política urbana no Brasil*. Petrópolis: Vozes.
UN-Habitat. (2009). *Planning sustainable cities: Global report on human settlements 2009*. London: Earthscan.
Villas-Bôas, G. (2012). *Planejamento urbano e território: práticas, estratégias e escalas*. Rio de Janeiro: Letra Capital.

MAPEAMENTO DAS OCUPAÇÕES NO ENTORNO DAS FERROVIAS: ESTUDO DE CASO NA ÁREA URBANA DE SANTA MARIA - RS

Paula Sandri Rhoden, Julia Bibiana Zschitschick Souza, Louise Ester de Campos, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Este estudo teve como objetivo mapear as ocupações irregulares ao longo da malha ferroviária da cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, Brasil, utilizando georreferenciamento e a técnica de densidade de Kernel. Foram analisados três trechos da ferrovia, onde existe uma concentração variável de ocupações. Assim, foi possível diferenciar a criticidade dos trechos segundo a densidade e localização de ocupações na faixa de domínio e na área não edificável, sobretudo nas regiões mais urbanizadas. No entanto, em áreas menos urbanizadas, as edificações ficam nos arredores da ferrovia, sem invadir as faixas de segurança, embora também possam afetar os usos do solo no entorno. O uso de técnicas de georreferenciamento mostrou-se adequado e útil para caracterizar a identificação de ocupações irregulares e assim facilitar a formulação de políticas públicas que contribuam a regularização fundiária e a segurança dos moradores, além de garantir o funcionamento eficiente do transporte ferroviário.

1. INTRODUÇÃO

O modo ferroviário é uma alternativa interessante para o transporte de matérias-primas e mercadorias devido às suas diversas vantagens e potencialidades. Os trens oferecem alta capacidade de carga, sendo ideais para o transporte de grandes volumes de produtos. Além disso, o transporte ferroviário é considerado mais seguro que o rodoviário, pois é segregado e mais fácil de controlar operacionalmente. Outro ponto positivo é a sustentabilidade do modo ferroviário, que se configura de forma mais eficiente no consumo de combustível por tonelada por quilômetro em comparação ao modo rodoviário. Isso resulta em menores emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a redução da pegada de carbono (Keretch, 2017; Rosa e Ribeiro, 2020).

No entanto, no Brasil, a partir do período do governo de Juscelino Kubitschek, entre os anos 1956 e 1961, o modo ferroviário brasileiro começou a ser abandonado e foi dada prioridade ao desenvolvimento rodoviário. Isso se devia ao menor custo e ao tempo mais curto de construção das rodovias (seis meses para 500 km de estrada, em comparação a três anos para a mesma distância em ferrovias). Além disso, o declínio da economia cafeeira agravou ainda mais a situação (Velasco *et al.*, 1998; Castro e Eposito, 1998). Nesse tempo, enquanto o resto do mundo diversificava seus sistemas de transportes, no Brasil houve um abandono de trechos ferroviários e a deterioração da infraestrutura existente, reduzindo a malha de cerca de 40 mil km, em 1960, para menos de 29 mil km atuais, com apenas um terço em condições adequadas de operação (CNI, 2018).

Por outro lado, as desigualdades econômicas e sociais do país e a falta de oportunidades de moradia acessível para uma boa parcela da população provocou o surgimento de graves carências no acesso à moradia para populações em situação de vulnerabilidade, excluídos também no território. Nesse contexto sociopolítico, unido ao sucateamento e deterioração das ferrovias, surgiram ocupações irregulares ao longo dos trilhos, que atualmente representam um grave problema técnico, social e jurídico para o país (Rhoden *et al.*, 2024).

Na região central do estado do Rio Grande do Sul, a cidade de Santa Maria destacou-se como um importante polo ferroviário. Sua localização estratégica, equidistante dos portos de Rio Grande e Porto Alegre, além das conexões com as ferrovias do Uruguai e da Argentina, fez da cidade um ponto ideal para o transbordo de mercadorias. Essa relevância da ferrovia transformou Santa Maria em uma parada obrigatória, não só permitindo o descanso dos viajantes e a baldeação dos trens, mas também se consolidando como um centro de negócios, investimentos, oportunidades de trabalho, prestação de serviços e formação de capital humano (Flôres, 2007).

Diante da relevância da ferrovia para a cidade de Santa Maria e para o cenário estadual, e considerando o problema das ocupações irregulares no entorno das ferrovias, este trabalho tem como objetivo mapear essas ocupações em três trechos estrategicamente selecionados da malha ferroviária no município. Busca-se identificar as áreas de maior incidência e analisar se as edificações estão localizadas dentro da faixa de domínio ou da faixa não edificável com o intuito de subsidiar possíveis decisões relacionadas à regularização fundiária ou reintegração de posse.

2. METODOLOGIA

A área de estudo dessa pesquisa é a cidade de Santa Maria, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, mais especificamente 3 três trechos da malha ferroviária que corta a área urbana da cidade, como pode ser visualizado na Figura 1. A seleção dos trechos foi realizada pela localização dos mesmos na cidade: o trecho 1, com um comprimento de 724 m, está situado na área oeste; o trecho 2 se localiza na área central, próximo ao pátio de manobras e entre dois ramais ferroviários que confluem na cidade, com um comprimento total de 1082 m; e, finalmente, o trecho 3, com um comprimento de 513 m, se situa no bairro Camobi, o mais populoso do município, na área leste, próximo a uma antiga estação agora desativada.

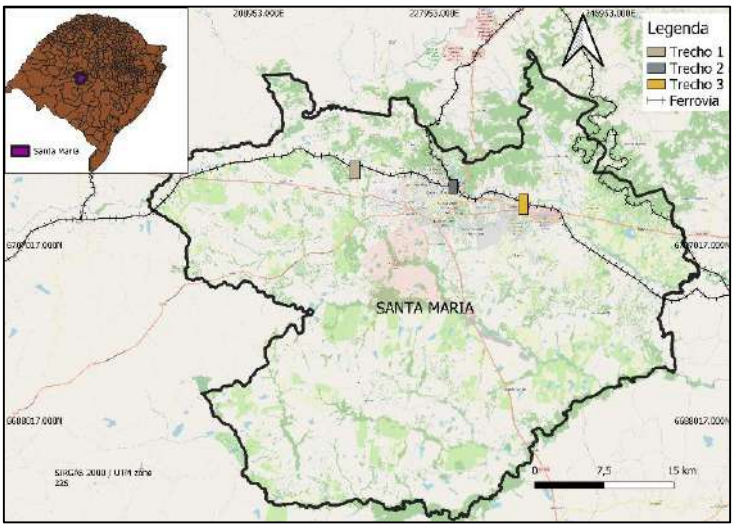


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e trechos analisados. Fonte dos dados: OpenStreetMap.

Inicialmente, os dados de localização das edificações próximas à ferrovia nos trechos selecionados foram georreferenciados e identificados pela sua situação dentro da faixa de domínio, de largura variável, ou dentro da faixa não edificável (estabelecida no 4º, III- A da Lei Federal n. 6.766/79, como 15 m a partir do limite da faixa de domínio) (Brasil, 1979) ou bem fora dessas áreas afetadas pela ferrovia. As faixas a cada lado da ferrovia também foram representadas espacialmente. Para esse processo foi utilizado o software QGIS, versão 3.38.3, a partir das informações fornecidas pela concessionária RUMO e pelo DNIT, como faixas de domínio e não edificáveis e ocupações cadastradas.

A partir desses dados georreferenciados das edificações e os *buffers* criados para as faixas de domínio e não edificáveis a cada lado da ferrovia, foi possível quantificar o número e densidade de ocupações nessas áreas, para cada trecho. Seguidamente, foi utilizada a técnica da densidade de Kernel gaussiana, utilizando um raio de 100 metros para identificar os locais de maior incidência de edificações nas proximidades das ferrovias, bem como se estão situadas nas faixas de domínio ou não edificáveis. A densidade de Kernel quantifica as relações entre pontos dentro de um raio de influência (R), com base em uma função estatística específica, analisando os padrões formados por um conjunto de dados pontuais e estimando sua densidade na área de estudo (Bergmaschi, 2010).

3. RESULTADOS

Em primeiro lugar, após o georreferenciamento dos dados, foi medida a quantidade e densidade de edificações por trecho, bem como sua localização (faixa de domínio, faixa não edificável ou proximidades), apresentadas na Tabela 1. Complementando esses resultados e para facilitar a comparação dos trechos analisados, as Figuras 2, 3 e 4 mostram os mapas de densidade de edificações em cada trecho.

A análise das densidades de ocupações permite verificar diferencias significativas entre os trechos analisados. Assim, o trecho 1 (Figura 2), localizado na região oeste da cidade, tem sua maior concentração de edificações na faixa não edificável, sendo poucas as edificações para além dos limites das faixas de domínio e não edificável. O trecho 2 (Figura 3), que apresenta uma área urbanizada confinada entre dois ramais ferroviários, revelou ter a maior parte das edificações sem invadir diretamente as faixas de segurança ferroviárias, porém possui uma maior densidade na área não edificável quando comparado com os demais trechos e a menor

densidade de edificações na sua faixa de domínio. Isso sugere que esta área, por ficar segregada do centro urbano pela ferrovia, mas relativamente próxima ao centro, é impactada pela urbanização descontrolada de forma distinta, ao contrário dos trechos 1 e 3, que estão mais próximos de áreas densamente povoadas, embora não tão centrais. Finalmente, o trecho 3 (Figura 4), localizado no bairro Camobi, possui o maior número de ocupações na faixa de domínio, como resultado de construção de moradias seguindo a linha ferroviária, mas apenas nela, sem maior expansão a cada lado, nas faixas não edificáveis. Tal resultado, mesmo apresentando uma menor densidade, pode vir a prejudicar a operação ferroviária no trecho, sobretudo devido a que as ocupações implicam situações de risco.

Tabela 1: Métricas de edificações e ocupações por trecho (número e densidade em edificações / km^2).

Edificações	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3
Ocupações na faixa de domínio	11 (1,73 edif./km^2)	8 (1,44 edif./km^2)	15 (0,51 edif./km^2)
Ocupações na faixa não edificável	10 (4,63 edif./km^2)	61 (2,02 edif./km^2)	0 (0,00 edif./km^2)
Fora das faixas anteriores	1	137	0
Total de ocupações	22	203	15

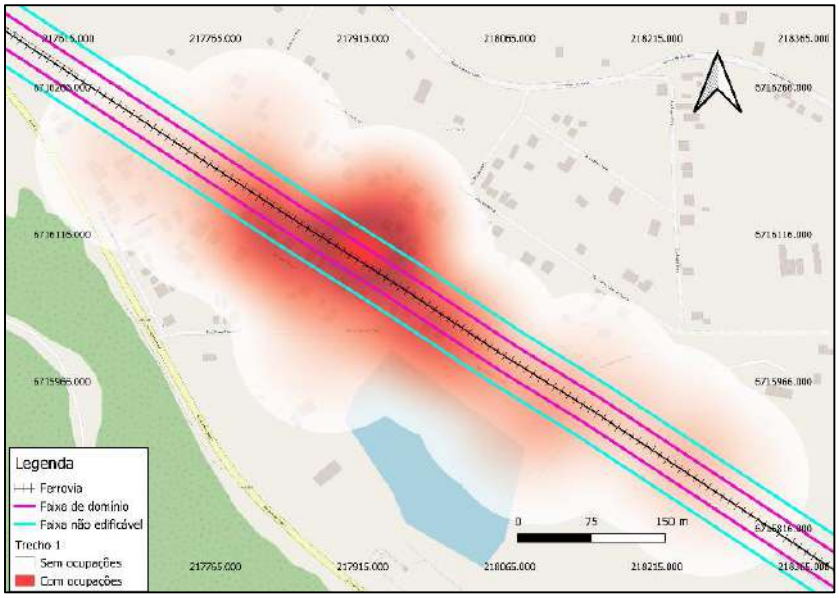


Figura 2: Mapa de densidade de ocupações no trecho 1. Fonte dos dados: RUMO, OpenStreetMap e DNIT.

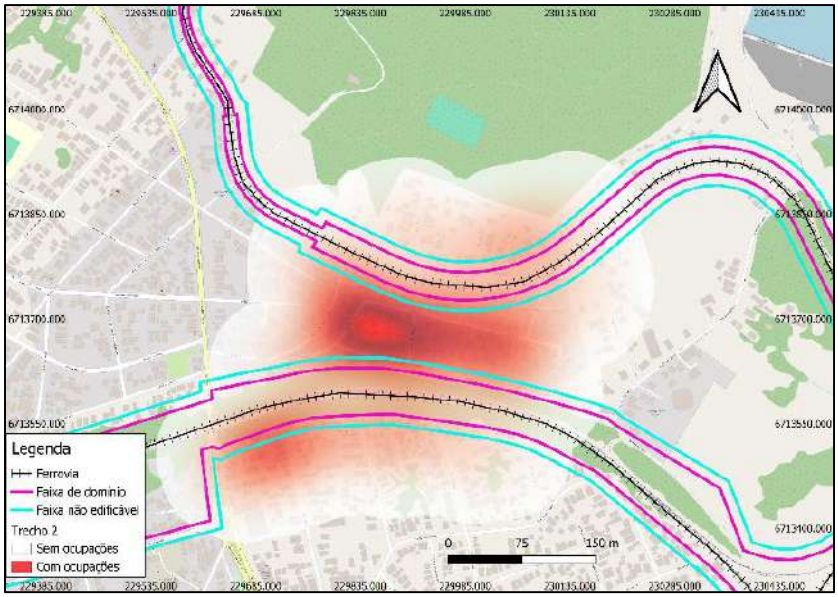


Figura 3: Mapa de densidade de ocupações no trecho 2. Fonte dos dados: RUMO, OpenStreetMap e DNIT.

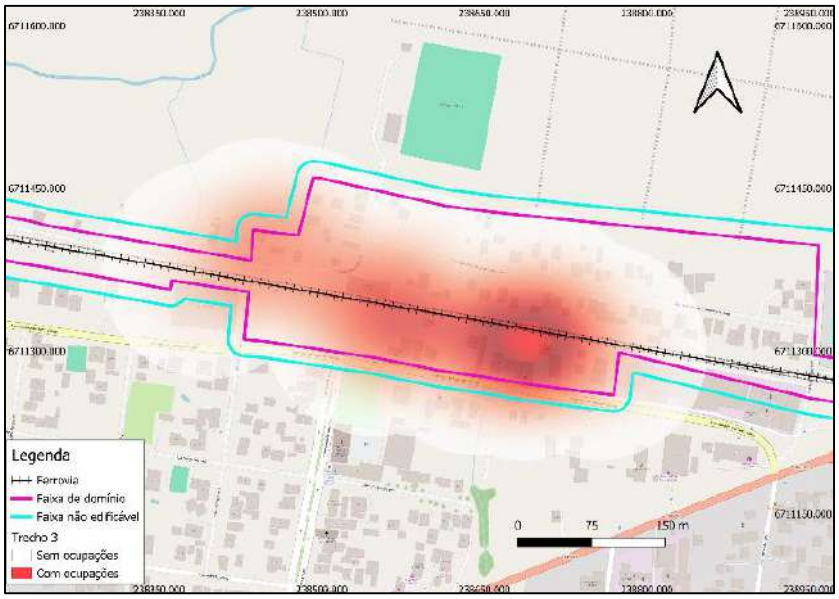


Figura 4: Mapa de densidade de ocupações no trecho 3. Fonte dos dados: RUMO, OpenStreetMap e DNIT.

Dessa forma, os resultados mostram que, nos trechos mais urbanizados, como o trecho 1 e o trecho 3, há uma maior concentração de ocupações, principalmente na faixa de domínio e nas áreas não edificáveis, o que compromete a operação segura da malha ferroviária. A ocupação dessas áreas representa um problema técnico e jurídico, uma vez que afeta diretamente o planejamento ferroviário e as condições de segurança para os moradores. Por outro lado, nesses trechos mais urbanizados, quase não há edificações que estejam para além da faixa não edificável, enquanto no trecho menos urbanizado, há maior densidade de edificações nos arredores das ferrovias, não invadindo as duas faixas anteriormente citadas.

Portanto, o uso de técnicas georreferenciamento, como as utilizadas no presente artigo, permite analisar, além dos números, a situação específica das ocupações e demais edificações próximas à malha ferroviária, de forma a orientar as ações necessárias de forma mais eficiente e direcionada. Tais ações podem focar na análise de situações de risco, assim como em aspectos jurídicos, mas também desde o ponto de vista de atenção social e comunitário, pois normalmente se trata de populações economicamente desfavorecidas, que moram em locais de infraestrutura urbana precária e escassez de serviços públicos, em situação de exclusão social.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como foco o mapeamento das ocupações irregulares na malha ferroviária de Santa Maria, na região central do Rio Grande do Sul, revelando a importância da identificação de tais situações, tanto para o planejamento urbano quanto para a operação eficiente da rede ferroviária e possíveis implicações jurídicas. Através da análise dos dados georreferenciados das edificações próximas a três trechos da malha ferroviária que atravessam a área urbana do município, utilizando a técnica de densidade de Kernel, foi possível identificar a distribuição das ocupações em diferentes graus, diferenciando entre as faixas de domínio e as áreas não edificáveis. Esses resultados se mostraram de suma importância para planejar a operação e expansão da malha ferroviária, além da realocação dos moradores, quando necessário, sobretudo em situações de risco.

Assim, o uso de técnicas de geoprocessamento e análise espacial facilitou tanto a identificação das ocupações irregulares no entorno das ferrovias, como sua caracterização, o que se torna essencial para a formulação de políticas públicas específicas que abordem a regularização fundiária e a segurança dos moradores que ocupam áreas de risco. Além disso, é essencial para garantir a preservação da infraestrutura ferroviária, cuja integridade pode estar comprometida com invasões descontroladas. A regularização ou remoção de ocupações em áreas que violam as normas de segurança e de planejamento ferroviário deve ser uma prioridade para garantir o bom funcionamento das ferrovias, evitando riscos operacionais, de modo a encontrar um equilíbrio sustentável entre o crescimento urbano e a manutenção e expansão da malha ferroviária.

Além disso, destaca-se a necessidade de uma ação integrada entre os órgãos municipais, estaduais e federais,

tanto para a fiscalização quanto para a realocação das populações que vivem em áreas vulneráveis, garantindo o bem-estar social e a integridade do desenvolvimento do transporte ferroviário. No entanto, enquanto tais situações são resolvidas, os serviços sociais e de infraestrutura podem planejar ações específicas para essas áreas desfavorecidas de modo a melhorar as condições de habitação e serviços públicos nessas comunidades.

Portanto, como trabalhos futuros, por um lado, sugere-se a validação com testes estatísticos que quantifiquem a significância das diferenças observadas entre os trechos, a comparação com referências técnicas, diretrizes ferroviárias de outros países além da comparação com casos similares em outras cidades brasileiras. Por outro lado, sugere-se a avaliação da situação de risco das áreas analisadas de forma mais abrangente, com o intuito de subsidiar o planejamento de ações para mitigar os perigos aos quais a população se enfrenta pela localização das suas moradias próximas aos trilhos, assim como para garantir a segurança da operação ferroviária.

Agradecimentos
Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processos 305384/2025-2, 141239/2025-5 e 138253/2025-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bergmaschi, R. B. (2010) *SIG aplicado à segurança no trânsito – estudo de caso no município de Vitória – ES.* Monografia (iniciação científica). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.

Brasil (1979) *Lei no 6.766, de 19 de dezembro de 1979, que dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências*. Brasília. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm

Castro, N. e J. R. Esposito (1998) *Infraestrutura: perspectivas de reorganização – subsetor de infraestrutura ferroviária*. IPEA / BNDES.

Confederação Nacional da Indústria – CNI (2018) *Transporte ferroviário: colocando a competitividade nos trilhos*. Brasília. ISBN 978-85-7957-212-8.

Flôres, J. R. A. (2007) *Fragmentos da história ferroviária brasileira e rio-grandense: fontes documentais, principais ferrovias, Viação Férrea do Rio Grande do Sul (VFRGS)*, Santa Maria, a "Cidade Ferroviária". Santa Maria: Palotti.

Keretch, M. E. (2017) *Acidentes ferroviários motivados por desgaste na ponta de agulha do aparelho de mudança de via*. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervodigital/000978763

Rhoden, P. S.; L. E. Campos; M.; M. Baroni; A. M. Larranaga e A. Ruiz-Padillo (2024) Ponderação dos riscos relacionados às ocupações no entorno das ferrovias no brasil usando a técnica best-worst scaling. In: Anais do 38º congresso de pesquisa e ensino em transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/ponderacao-dos-riscos-relacionados-as-ocupacoes-no-entorno-das-ferrovias-no-bras?lang=pt-br>.

Rosa, R. A. e R. C. H. Ribeiro (2020) *Estradas de ferro: projeto, especificação e construção* (2ª ed.). EDUFES. Disponível em: https://edufes.ufes.br/items/show/562

Velasco, L. O. M.; O. T. Lima e R. M. A. T. Souza (1998) *Ferrovias: privatização e regulação*. Informe infraestrutura BNDES.

Paula Sandri Rhoden (paula.sandri@acad.ufsm.br)
Julia Bibiana Zschitschick Souza (julia.zschitschick@acad.ufsm.br)
Louise Ester de Campos (louise.campos@acad.ufsm.br)
Alejandro Ruiz Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

Uso do Solo e Transportes

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANALISE DE POLUENTES DO TRANSPORTE E ZONEAMENTO URBANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS UTILIZANDO SENSORES DE BAIXO CUSTO

Janini de Oliveira Dias da Silva, Pedro Jose Perez Martinez
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo FECFAU UNICAMP

RESUMO
Este estudo tem como objetivo analisar as concentrações de poluentes atmosféricos provenientes do transporte rodoviário nas principais rodovias da Região Metropolitana de Campinas (RMC), utilizando sensores de baixo custo e integrando-os com dados socioeconômicos e urbanísticos do Censo IBGE e dos Planos de Desenvolvimento Urbano Integrado (PDUI). Os sensores medem concentrações de material particulado (MP_1, $MP_{2.5}$ e MP_{10}), temperatura e umidade que serão incluídas as análises. Para validação metodológica, os dados coletados serão comparados com dados das redes oficiais de monitoramento da CETESB, presentes na RMC. A primeira campanha, foi realizada entre setembro e outubro de 2024 e os resultados indicaram níveis elevados de todos os poluentes nas rotas SP065 e SP101, situadas em áreas com tráfego intenso e maior urbanização. Por outro lado, rotas como a SP330 apresentaram menores concentrações, sugerindo menor fluxo veicular e menor densidade urbana. Os objetivos também incluem análise preditiva das concentrações com base nas políticas de transporte previstas nas diretrizes do PDUI da região. Ao final, espera-se gerar um mapeamento detalhado das concentrações, de modo a subsidiar políticas de mitigação, com foco no transporte sustentável e na da qualidade do ar da RMC.

1. INTRODUÇÃO

Em regiões metropolitanas, o transporte motorizado é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes atmosféricos (PA) (CETESB, 2023), contribuindo significativamente com diversos impactos negativos, tais como aumento da temperatura global, chuva ácida, contaminação do ar, dos solos e das águas, doenças mentais, cardiorrespiratórias e vasculares, mortes prematuras, e outras (EPE, 2023; WHO, 2022). Com o aumento da urbanização nas metrópoles, o uso de automóveis e motocicletas tem se intensificado, ampliando os desafios relacionados à mobilidade urbana sustentável e às mudanças climáticas (Andrade et al., 2012). Nesse contexto, acordos internacionais como a Agenda 2030 têm buscado promover políticas de mitigação e descarbonização essenciais para alcançar objetivos de sustentabilidade e reduzir os impactos da mobilidade na saúde pública (ONU, 2015). No Brasil, a cobertura limitada dos sistemas de monitoramento da qualidade do ar dificulta a implementação de políticas públicas eficazes. No Brasil, o Estado de São Paulo, por meio da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), lidera a implantação de estações de monitoramento de qualidade do ar (QUALAR), no entanto, essas estações estão concentradas predominantemente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), deixando outras áreas com uma defasagem de dados sobre qualidade do ar. Portanto, há uma lacuna significativa no mapeamento das emissões associadas ao tráfego rodoviário na RMC, o que dificulta o delineamento de ações coordenada de mitigação de impactos ambientais e à mobilidade urbana sustentável. Neste sentido, este estudo tem como objetivo principal apresentar uma análise detalhada das concentrações de poluentes atmosféricos provenientes do transporte rodoviário nas principais rodovias da Região Metropolitana de Campinas (RMC), adotando uma abordagem baseada em sensores de baixo custo para a coleta de dados. Além disso, pretende-se integrar os dados coletados com as principais diretrizes regionais do Plano de Desenvolvimento Integrado (PDUI) e fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana sustentável e ao desenvolvimento de estratégias para mitigar os impactos ambientais relacionados ao setor de transporte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A queima de combustíveis do setor de transporte é a maior contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos, visto que 92% da energia do transporte provém de combustíveis à base de petróleo (EPE, 2023; IPCC, 2014; Lamb et al., 2021; “World Energy Outlook 2024 – Analysis”, 2024). O Material Particulado, um dos principais poluentes emitidos por veículos, é capaz de causar doenças cardiovasculares, cerebrovasculares e respiratórias (WHO, 2022). Com o desenvolvimento urbano e econômico do Brasil nas últimas décadas, a frota de veículos e, paralelamente, o consumo de combustíveis fósseis aumentaram significativamente, afetando diretamente os níveis de poluição do ar e na qualidade de vida urbana (CETESB, 2023; SENATRAN, 2025). Além da degradação da qualidade do ar, a expansão das frotas de veículos motorizados introduziu outros efeitos adversos nos padrões de vida urbanos, incluindo acidentes de trânsito, congestionamentos, tempos de deslocamento mais longos, expansão urbana desordenada e preocupações com a desigualdade social (Vasconcellos, 2013). A Região Metropolitana de Campinas é uma

das regiões mais urbanizadas do país e apresenta altas taxas de deslocamentos diários. De acordo com a Pesquisa Origem-Destino (2012), aproximadamente 4,7 milhões de viagens ocorrem diariamente na RMC, sendo 60,2% (2,07 milhões) dessas viagens sendo realizadas por modos individuais, 39,8% (1,3 milhões) por modos coletivos, e 27,6% (1,2 milhões) por modos não motorizados (São Paulo, 2012). Com base nas análises publicadas pelo Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (2018), o consumo de combustíveis fósseis e a quantidade de deslocamentos realizados por modos individuais motorizados na região apresentam tendência de crescimento contínuo, acompanhada do aumento das emissões veiculares (EPE, 2023; São Paulo, 2018). Neste sentido, por conta da relevância da RMC no cenário nacional e do constante desenvolvimento urbano regional é importante que sejam realizados mapeamentos relacionados a mobilidade sustentável de forma a oferecer insumos para o desenvolvimento de medidas de mitigação.

3. MÉTODOS UTILIZADOS

A metodologia deste estudo está organizada em quatro etapas principais. A coleta de dados foi realizada com sensores de baixo custo instalados em um automóvel que percorreu sete rotas pelas principais rodovias da RMC. Para o monitoramento de material particulado (MP1, MP2,5 e MP10), utilizou-se o sensor portátil AirBeam (HabitatMap), reconhecido por sua precisão e confiabilidade em diferentes condições ambientais, também capaz de registrar temperatura e umidade relativa. Os demais poluentes (CO_2, CO, NO_2, NO e O_3) foram monitorados pelo sensor NOTS, desenvolvido em parceria entre UNICAMP, USP e University of Surrey, que também mede MP, temperatura e umidade. Para a validação metodológica, os resultados serão confrontados com os dados das estações oficiais de monitoramento QUALAR/CETESB na RMC. Na etapa de análise espacial e urbana, serão integrados dados socioeconômicos do Censo IBGE, mapas de zoneamento e uso do solo, além das diretrizes do PDUI, de modo a fundamentar cenários e avaliar impactos potenciais de políticas de mitigação. Por fim, serão aplicadas técnicas de geoprocessamento e modelagem espacial para identificar padrões de emissão e urbanísticos. Até o presente momento, foram processados os dados coletados pelo sensor AirBeam, referentes a MP, temperatura e umidade relativa.

4. RESULTADOS PARCIAIS

Até o presente momento, foi realizada a primeira campanha com as sete primeiras coletas de campo, entre setembro e outubro de 2024. Todas as coletas foram iniciadas no período da manhã às 7h. Os valores dos principais poluentes estão descritos na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1: Valores mínimos e máximos dos dados coletados

Rota	Código	TempºF		MP1 (µg/m3)		MP2.5 (µg/m3³)		MP10 (µg/m3)		Umidade (RH)	
		Mín	Max	Mín	Max	Mín	Max	Min	Max	Min	Max
1	SP332	80	97	8,3	20,0	29,7	12,9	16,3	64,5	54,1	72,8
2	SP340	75,2	100,0	7,4	22,0	10,7	28,8	13,2	46,9	50	74
3	SP065	70	96	15,3	33,3	21,9	39,2	31,1	69,7	51,6	83,4
4	SP330	72,4	95,6	8,3	31,2	14,1	37,9	19,1	63,8	53,8	84,7
5	SP330	63,6	88,3	3	25,6	6,3	29,2	7,5	48	55,8	85
6	SP101	71	99,1	17	55	22,6	52,1	32,5	85,8	52	85
7	SP075	69,8	99,4	3	18,7	6,4	24,7	8,1	39,6	52,6	86,1

Fonte: Desenvolvido pelos autores, 2025.

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das concentrações de material particulado (MP1, MP2.5 e MP10) ao longo das principais rodovias da RMC, a partir de dados coletados pelo sensor AirBeam. Observa-se maior incidência de poluentes nos trechos próximos a Campinas, Valinhos, Itatiba e Sumaré, com destaque para concentrações de MP2.5 entre 26 e 28 µg/m³, além de valores elevados de MP1 (20–22 µg/m³) e MP10 (42–48 µg/m³), indicados pelos pontos em vermelho. Essas áreas coincidem com zonas de maior densidade urbana e intenso fluxo de veículos, incluindo pesados, favorecendo o acúmulo de poluentes. Em contraste, regiões ao norte e sudoeste, como Cosmópolis, Monte Mor e Elias Fausto, apresentaram níveis mais baixos (representados em azul), associados a menor tráfego rodoviário. De acordo com os padrões do CONAMA (CONAMA, 2024), concentrações superiores a 25–50 µg/m³ de MP2.5 e 50–100 µg/m³ de MP10 em 24h configuram Índice de Qualidade do Ar moderado, com risco de sintomas em grupos sensíveis. Esses resultados preliminares evidenciam áreas críticas que demandam políticas de mitigação dos impactos do transporte e promoção da mobilidade sustentável. As próximas etapas incluem novas coletas, a incorporação de dados de gases (CO_2, CO, NO_2, NO e O_3) via sensor NOTS e a validação com informações oficiais da CETESB, visando análise

integrada com variáveis socioeconômicas e de zoneamento.

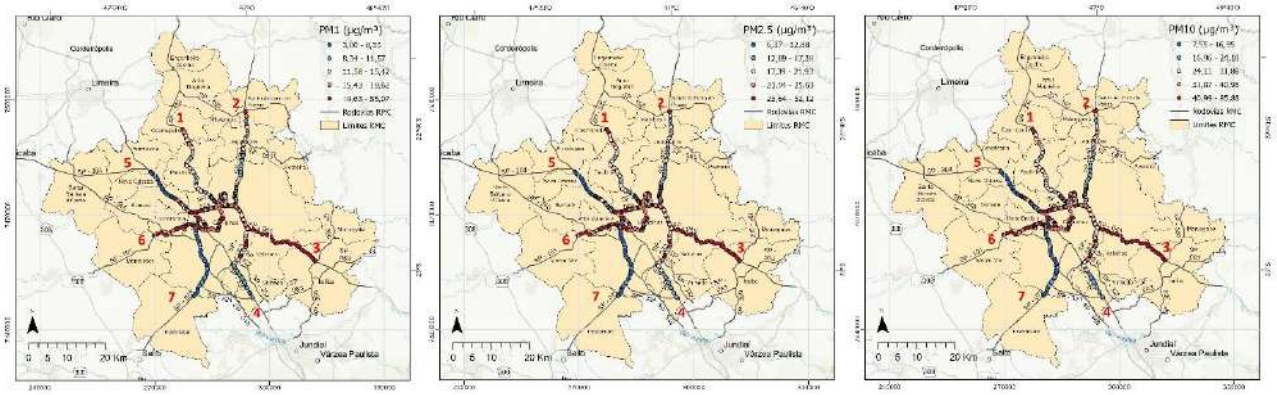


Figura 1: Um exemplo de como formatar as figuras

Ao final da pesquisa, espera-se alcançar um mapeamento detalhado das emissões atmosféricas, identificando os principais pontos críticos de emissão ao longo das rodovias e destacando as áreas mais afetadas pela poluição proveniente do transporte rodoviário. Esse mapeamento permitirá visualizar com precisão as zonas prioritárias para a implementação de medidas de mitigação, facilitando o planejamento territorial e a tomada de decisões.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/13656-6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, Maria de Fatima *et al.* Vehicle emissions and PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. Air Quality, Atmosphere & Health, v. 5, n. 1, p. 79–88, 1 mar. 2012.

CETESB. Emissões veiculares no estado de São Paulo 2022. São Paulo, SP: Cetesb, 2023.

CONAMA. RESOLUÇÃO Nº 506/2024. 2024.

EPE. BEN - Balanço Energético Nacional 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 6 abr. 2024.

IPCC (ORG.). Climate change 2014: mitigation of climate change Working Group III contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge university press, 2014.

Lamb, William F. *et al.* A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. Environmental Research Letters, v. 16, n. 7, p. 073005, 1 jul. 2021.

ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SÃO PAULO. Pesquisa de Origem e Destino da Região Metropolitana de Campinas. , 2012. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/pesquisa-origem-e-destino-2011---regiao-metropolit.pdf>

SÃO PAULO. PDUI-RMC (Região Metropolitana de Campinas) – Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado. Disponível em: <https://rmc.pdui.sp.gov.br/wp-content/uploads/RELATORIO-3-%E2%80%93-Diagnostico-Final-dos-Problemas-Metropolitanos.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023.

SENATRAN. Frota de Veículos - 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024>. Acesso em: 5 jul. 2025.

Vasconcellos, Eduardo Alcântara de. Mobilidade urbana: O que você precisa saber. 1ª edição ed. *[S.l.]*: Companhia das Letras, 2013.

WHO. Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre - OPAS/OMS | Organização Pan-Americana da Saúde. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>. Acesso em: 1 maio. 2024.

World Energy Outlook 2024 – Analysis. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 3 set. 2025.

Janini de Oliveira Dias da Silva (j263548@dac.unicamp.br)
Prof. Dr. Pedro Jose Perez Martinez (pjeperez@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo FECFAU, Laboratório Trama, R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP

ANÁLISE MULTICRITÉRIO DOS IMPACTOS DO TRÁFEGO DE CARGAS EM VIAS URBANAS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-101 NO CONTORNO DO RECIFE

Laura Esmeraldo Arraes de Lavor[1], **Maurício Oliveira de Andrade**[1], **Joaquim José Guilherme de Aragão**[2]
[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Universidade de Brasília

RESUMO
A dissertação trata da temática de travessias rodoviárias urbanas, com o objetivo de identificar as características e padrões operacionais e funcionais limites que indiquem a necessidade de intervenções nessas estruturas, devido ao impacto do tráfego — principalmente de carga — sobre o uso do solo nos centros urbanos. Para viabilizar essa avaliação, serão identificados na literatura os principais elementos característicos das travessias urbanas por rodovias arteriais, os impactos potenciais dessas travessias, suas variáveis e padrões ideais ou aceitáveis. Na sequência, estabelece-se um sistema de pesos entre os diferentes critérios encontrados, com o intuito de gerar um índice replicável a cenários semelhantes, por meio de análise multicritério. A partir desse índice, busca-se demonstrar a inviabilidade de uma travessia urbana em atender adequadamente às demandas às quais está submetida. No estudo de caso, pretende-se sustentar, com base em critérios técnicos, a noção de esgotamento da travessia urbana da BR-101, no contorno do Recife.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

O excesso do tráfego de cargas no ambiente urbano gera dificuldades logísticas perceptíveis pela sociedade, como o aumento do número de acidentes, a emissão de poluentes, o congestionamento das vias e a deterioração da infraestrutura viária, entre outros impactos (Silva e Bracarense, 2015). Essa sobreposição do fluxo de passagem nos centros urbanos, além de inviabilizar o uso da via como corredor logístico, provoca efeitos significativos ao cotidiano das grandes cidades (Guerino Filho *et al.*, 2014). A coexistência entre o tráfego de passagem e tráfego urbano é definida como "travessia urbana" (DNIT, 2010).

Diante da problemática apresentada, torna-se evidente a necessidade de estabelecer meios que orientem decisões relacionadas a essas vias com base em critérios técnicos, incentivem a busca por soluções adequadas e promovam o uso eficiente e efetivo dos recursos públicos para resolução dos conflitos. Nesse contexto, a pesquisa surge a partir do questionamento acerca da possibilidade de se identificar o momento em que uma travessia urbana atinge o seu limite funcional. Assim, a hipótese proposta é que o modelo a ser desenvolvido, além de respaldar tecnicamente os critérios de escolha de intervenções adotadas pelos entes públicos em programas e projetos vinculados às políticas de transporte, permitirá concluir pelo esgotamento das condições de suporte do tráfego na travessia urbana da BR-101, situada na Região Metropolitana do Recife (RMR).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

Bilbao-Ubilos (2008) relacionou custos e perdas de bem-estar decorrentes do conflito entre o tráfego de passagem e o tráfego urbano, os quais comprometem a qualidade de vida da parcela da sociedade que convive com esse entrave. O autor conclui que se destacam os seguintes custos:

- De oportunidade, referentes ao tempo perdido no congestionamento;
- Decorrentes do consumo adicional de combustível e demais insumos de manutenção e devido à depreciação dos veículos;
- De poluição sonora do congestionamento;
- Monetário e danos ambientais decorrentes da emissão de poluentes;
- Relacionados à acidentes viários;
- Perdas de bem-estar relacionadas à exposição da população urbana ao transporte de mercadorias perigosas;
- Perdas de bem-estar relacionadas ao efeito de barreira, que o congestionamento causa ao fluxo para a realização de atividades cotidianas da cidade.

Além disso, o congestionamento das áreas urbanas tende a desencorajar a atração de novos moradores, bem como a reduzir a atratividade de empresas e indústrias interessadas em se estabelecer na região. Isso se deve, não apenas a redução da mobilidade, mas também à percepção de que o congestionamento compromete a produtividade daqueles que enfrentam o trânsito diariamente (Marshall e Dumbaugh, 2018). Esse processo de

degradação da funcionalidade rodoviária pode, inclusive, fortalecer regiões vizinhas que apresentem dinâmicas urbanas diferenciadas.

Em várias cidades ao redor do mundo, a solução para o problema das travessias urbanas envolve desde megaprojetos rodoviários — como a construção de contornos rodoviários — até a implementação de políticas públicas voltadas ao transporte sustentável. Os megaprojetos representam soluções complexas para necessidades crônicas, e, em geral, estão associados a riscos altos, como o de ultrapassagem dos prazos e dos orçamentos previamente estabelecidos (Flyvbjerg, 2003). Esses projetos são frequentemente justificados motivações econômicas, uma vez que o investimento em infraestrutura produtiva pode impulsionar o desenvolvimento econômico, promover a integração de mercados, favorecer o comércio e gerar empregos (Zhan, 2020). Além disso, grandes investimentos costumam estar respaldados por argumentos políticos e institucionais, dado que os megaprojetos podem atender a demandas eleitorais e funcionar como instrumentos de políticas públicas voltadas à modernização nacional (Flyvbjerg, 2017).

Dessa forma, torna-se essencial identificar e fomentar alternativas que respondam ao crescimento e à diversificação de demandas atuais. Os projetos devem, portanto, ser desenvolvidos com base na compreensão das necessidades presentes e emergentes da região em questão (Aragão e Yamashita, 2010). Nesse sentido, em situações em que uma rodovia atravessa o meio urbano, ou em situações de ocupação não anteriormente planejada ao longo dos segmentos rodoviários, os usuários em trânsito buscam concluir seus trajetos com fluidez e velocidade adequadas, enquanto a população local almeja acessar suas atividades cotidianas sem interferências significativas nesse processo (Freire, 2003).

Conforme Silva e Zorzo (2021), o modo rodoviário tem sofrido com desvantagens consideráveis, como a falta de conservação das vias, congestionamentos, roubos e acidentes. Os autores destacam que, historicamente, cerca de 30% do orçamento destinado pelo governo federal à infraestrutura rodoviária no Brasil não é efetivamente aplicado: entre 2004 e 2016, dos R$ 127,07 bilhões autorizados para esse fim, foram despendidos apenas R$ 80,4 bilhões (CNT, 2017). No que tange ao congestionamento causado pelo contexto das travessias urbanas, observa-se uma tendência de se acarretar o entrave logístico das atividades, como acréscimos nos valores dos fretes e atrasos nas entregas dos produtos. Esse cenário pode indicar o potencial da destinação de recursos para a resolução de problemáticas como as supracitadas.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada fundamenta-se na aplicação de técnica multicritério para avaliar as condições-limite aceitáveis em travessias urbanas com elevado volume de tráfego, sobretudo de carga. Diversos efeitos são provocados por esse tipo de tráfego nessas situações e a análise considera uma série de fatores, tais como: nível de serviço (medido em 5 níveis), velocidade operacional (em km/h), acidentes por km, número de acessos laterais por km, distância mínima de obstáculos laterais, existência de redutores de velocidade e semáforos (velocidade regulamentada e tempo de ciclo do semáforo), densidade de ocupação marginal, emissões de gases e particulados (em unidades de emissões), etc.

Após a revisão bibliográfica voltada à identificação, na literatura, dos principais critérios que indicam o esgotamento de uma via, busca-se construir um índice com base nesses parâmetros, ponderando sua relevância individual para a definição dos limites mínimos, máximos e aceitáveis. Esse índice deve ser aplicado a segmentos homogêneos da rodovia, com o objetivo de classificar sua situação como boa, aceitável, regular ou limite. Para essa etapa, está prevista a consulta a um painel de especialistas, a fim de definir a importância relativa de cada critério analisado.

Para determinar os pesos entre parâmetros distintos, propõe-se a utilização do *software* MACBETH, uma ferramenta de análise multicritério. Assim, a ferramenta utiliza os valores neutros e superiores definidos pelos especialistas, bem como a atratividade par a par entre os critérios para estabelecer a ordem de prioridade entre eles e um valor para as demais alternativas dentro de um mesmo critério, gerados pelo software. A partir dessa informação, é possível gerar as pontuações referentes a cada critério e, somando as pontuações, da travessia urbana de interesse. Por fim, entende-se se a travessia em questão está suportando de maneira adequada as

demandas as quais está submetida.

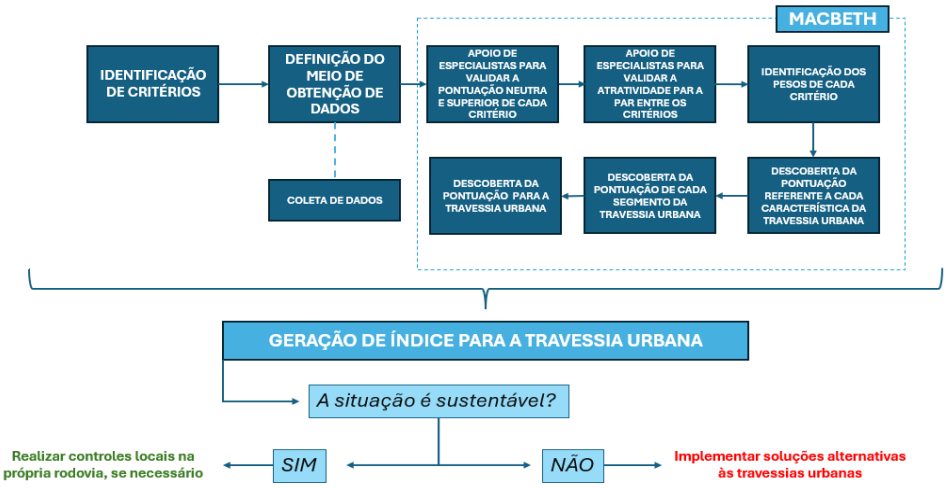


Figura 1: Fluxograma da metodologia proposta

4. RESULTADOS ESPERADOS

Por meio do estudo de caso da BR-101, pretende-se desenvolver um índice que demonstra a necessidade de intervenção na travessia urbana, isto é, permitindo avaliar a viabilidade da manutenção da situação atual. Com isso, busca-se embasar decisões de entes públicos em critérios técnicos, promovendo maior racionalidade e eficiência na formulação de políticas e ações voltadas à infraestrutura rodoviária.

Agradecimentos

O presente relatório de dissertação contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aragão, J. J. G. e Y. Yamashita (2010) *Engenharia territorial: problemas e territórios programáticos*. Texto de Discussão. Brasília: CEFTRU/UnB.

Bilbao-Ubillos, J. (2008) The costs of urban congestion: Estimation of welfare losses arising from congestion on cross-town link roads. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, n. 42, p. 1098–1108. DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.015.

CNT (2017) *Falta investir mais em rodovias e melhorar sistemas de gestão.* Disponível em: https://cnt.org.br/agencia-cnt/falta-investir-mais-rodovias-melhorar-sistema-gestao (acesso em 27/06/2025).

DNIT (2010) *Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas*. Rio de Janeiro: Diretoria Executiva, Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

Freire, L. H. (2003) *Análise de tratamentos adotados em travessias urbanas – Rodovias arteriais que atravessam pequenas e médias cidades no RS*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Flyvbjerg, B. (2017) *The Oxford Handbook of Megaproject Management.* Oxford University Press.

Flyvbjerg, B. (2003) *Megaprojects and risk: an anatomy of ambition*. Cambridge: Cambridge University Press.

Guerino Filho, E.; F. A. Simões e S. L. Nascimento Jr. (2014) Diagnóstico das travessias urbanas de rodovias federais nas cidades de Maringá, Darandi e Mandaguari. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, n. 2, p. 70.

Marshall, W. e E. Dumbaugh (2020) Revisiting the relationship between traffic congestion and the economy: a longitudinal examination of U.S. metropolitan areas. *Transportation*, p. 275–314. DOI: https://doi.org/10.1007/s11116-018-9884-5.

Silva, R. e L. Bracarense (2015) Impacto do tráfego de caminhões em meio urbano: o caso de Palmas. *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*. Ouro Preto, 2015.

Silva, R. e A. Zorzo (2021) Logística, transporte e desenvolvimento econômico no Brasil. *European Academic Research*, v. IX, n. 2, p. 1403–1420.

Zhan, J. (2020) *Infrastructure and development*. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD).

Laura Esmeraldo Arraes de Lavor (laura.lavor@ufpe.br)
Maurício Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Joaquim José Guilherme de Aragão (aragao@unb.br)
Universidade de Brasília (UnB)

Modelagem do tráfego

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DA PERCEPÇÃO DE CONDUTORES EM UM SIMULADOR DE DIREÇÃO VEICULAR EM CENÁRIOS COM DIFERENTES CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Ângelo Cunha Turelly da Silva[1], **Helena Beatriz Bettella Cybis**[1],
Daniel Sergio Presta García[1], **Gustavo Rubén Di Rado**[2]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Universidad Nacional del Nordeste

RESUMO
O estudo investiga a percepção subjetiva de presença em um simulador de direção sob diferentes condições ambientais (dia, noite e neblina). Utilizando um trecho virtual da rodovia RS-122 e um simulador calibrado, 34 motoristas participaram de seis rodadas de simulação. Após cada rodada, responderam a um questionário adaptado de Witmer e Singer (1998) para avaliar a imersão. As questões foram organizadas em quatro dimensões: Envolvimento, Adaptação/Imersão, Fidelidade Sensorial e Qualidade da Interface. Os resultados apontam que o cenário diurno foi mais bem avaliado, seguido pelo noturno, enquanto a neblina gerou maior desconforto e dispersão nas respostas, especialmente em itens visuais e de controle. Jovens e motoristas com menos tempo de habilitação avaliaram os cenários mais positivamente. Participantes com histórico de acidentes mostraram maior sensibilidade à segurança. O estudo reforça a utilidade dos simuladores como ferramenta de pesquisa em comportamento viário sob diferentes condições ambientais.

1. INTRODUÇÃO

As condições climáticas desfavoráveis representam fatores externos que influenciam significativamente o comportamento dos motoristas. Estudos indicam que situações como a presença de neblina e a redução da luminosidade impõem obstáculos tanto à percepção quanto ao processamento cognitivo, interferindo na tomada de decisão e no controle eficaz do veículo. O clima adverso pode levar a uma mudança no desempenho e no comportamento do motorista, devido à redução da visibilidade, a danos à infraestrutura e a obstruções à visibilidade (Ali, Ahmed, Yang, 2020). A redução da visibilidade e as alterações nas condições da via demandam que os motoristas ajustem suas estratégias de condução, como diminuir a velocidade e aumentar a distância entre os veículos, embora esses ajustes nem sempre sejam proporcionais à gravidade das condições enfrentadas (Theofilatos, Yannis, 2014). Nesse sentido, compreender como os condutores modificam seu comportamento diante das condicionantes climáticas adversas torna-se crucial para a formulação de estratégias voltadas à segurança e eficiência no trânsito.

Para captar com maior fidelidade essas respostas comportamentais, é necessário realizar investigações que simulem, de forma realista, o contexto da direção veicular. Uma abordagem promissora e crescentemente utilizada são os simuladores de direção veicular, projetados para replicar de maneira controlada e realista a experiência de condução de um veículo (Colmenares *et al.*, 2024)

O uso de simuladores tem se mostrado especialmente vantajoso em estudos que investigam aspectos comportamentais relacionados à segurança no trânsito, pois oferecem um meio prático e seguro de observar reações em diferentes cenários de direção. Com esse recurso, é possível recriar, de forma controlada, as experiências típicas de condução em vias reais (Burdzik *et al.,* 2024). No entanto, apesar dos inúmeros benefícios, persiste uma preocupação quanto à validade e confiabilidade dessa tecnologia como instrumento de pesquisa. Com o avanço dos estudos em realidade virtual, surgiu um conceito importante relacionado à validade dos comportamentos observados nesses ambientes: a chamada “sensação de presença”. Este conceito passou a atrair atenção de diversas áreas do conhecimento, levando à formulação de múltiplas definições (Deniaud *et al.,* 2015; Figueira, Larocca, 2018). A sensação de presença pode ser descrita como a percepção do usuário de estar fisicamente inserido no ambiente virtual, experimentando uma sensação de imersão espacial no cenário simulado (Malone, Brünken, 2021).

Com base nas definições apresentadas, o presente trabalho realiza uma avaliação subjetiva de simulador de direção a partir do conceito de presença por meio de questionário adaptado aplicado a condutores voluntários após participação em um experimento relacionado ao processo de *car-following*. O trabalho toma como base o questionário proposto nos trabalhos de Witmer e Singer (1998) e Witmer *et al.* (2005). O simulador utilizado é o Simulador de Direção Veicular do Laboratório de Sistemas de Transportes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LASTRAN), validado por Andriola (2021) a partir de dados de campo captados por veículo instrumentado. Os voluntários foram orientados a dirigir normalmente, tendo a possibilidade de seguir ou ultrapassar os veículos líderes da simulação. O experimento foi constituído de três cenários distintos

relacionados às condicionantes climáticas. São eles: “dia”, “noite e “neblina”. A pesquisa ocorreu em seis rodadas para cada voluntário. Para cada condição meteorológica, os voluntários percorriam o mesmo trecho da ERS-122 com dois veículos diferentes como líderes: o primeiro, um veículo de passeio; o segundo: um veículo de carga. Foram realizadas análises de estatísticas descritivas, como média e desvio padrão, para avaliar como a percepção dos participantes se altera de acordo com cada cenário, de acordo com as respostas fornecidas no questionário adaptado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão teórica deste artigo foi dividida em 3 subseções fundamentadas em pesquisas nacionais e internacionais. A primeira explicita detalhes conceito de presença. A segunda refere-se ao questionário de presença utilizado. A terceira trata da influência das condições climáticas a serem avaliadas neste trabalho no comportamento dos condutores a sua aplicabilidade em simuladores de direção.

2.1. Sensação de presença em simuladores

A eficácia dos simuladores de direção está ligada à sua capacidade de gerar uma sensação realista de presença, ou seja, a impressão de estar realmente dirigindo em um ambiente virtual (Scheuchenpfluga *et al*., 2003). Essa presença é definida como uma condição psicológica em que os estímulos virtuais são percebidos como reais, fazendo o usuário esquecer que está interagindo por meio de tecnologia (Lombard, Ditton, 1997).

O conceito de presença também inclui a noção de presença espacial, que diz respeito à sensação de estar fisicamente inserido em um ambiente composto por elementos digitais. Essa vivência é frequentemente descrita na literatura como a impressão de "estar presente" no local virtual (Slater *et al.,* 2009). A presença espacial é marcada, principalmente, pela percepção de que o indivíduo está no ambiente simulado, e não no espaço físico real em que se encontra. Para que essa sensação seja possível, é fundamental que o usuário esteja completamente envolvido tanto no ambiente virtual quanto nas atividades que realiza dentro dele.

De acordo com Witmer e Singer (1998), essa sensação de presença depende, essencialmente, de dois fatores: envolvimento e imersão. O envolvimento diz respeito ao quanto o usuário dedica atenção e energia às ações realizadas no ambiente virtual, sendo influenciado pela importância da tarefa e pela consistência dos estímulos apresentados. Ambientes que exigem decisões complexas, como situações de ultrapassagem, tendem a aumentar esse envolvimento, especialmente quando apresentam sons e imagens realistas. Já a imersão está relacionada à percepção de estar completamente cercado pelo ambiente digital, com a impressão de que suas ações têm impacto direto sobre aquele mundo simulado. Aspectos como o uso de dispositivos que isolam estímulos externos (como óculos de realidade virtual ou telas amplas), a sensação tátil ao manusear o volante e a resposta imediata do sistema aos comandos do usuário são fundamentais para fortalecer a imersão.

2.2. Questionário de presença (QP)

O Questionário de Presença (QP), desenvolvido por Witmer e Singer (1998), é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar o grau de imersão e realismo percebido por usuários em ambientes virtuais, como simuladores de direção. Esse instrumento mensura a sensação subjetiva de “estar presente” no ambiente simulado, considerando fatores como envolvimento, imersão e realismo. Composto por 32 itens divididos em quatro categorias: fatores de controle, que avaliam a interação do usuário com o ambiente; fatores sensoriais, que analisam a qualidade dos estímulos visuais e auditivos; fatores de distração, que identificam elementos que possam quebrar a imersão; e fatores de realismo, que verificam a adequação do cenário às expectativas do mundo real. Em contextos específicos, como a simulação veicular, o QP costuma ser adaptado para avaliar detalhes como a resposta do volante, a fidelidade visual dos cenários e a reação do sistema em situações críticas. Apesar de sua utilidade, o questionário apresenta limitações, especialmente devido à subjetividade das respostas e à necessidade de ajustes conforme o tipo de simulador, o que recomenda seu uso combinado com medidas objetivas, como reações fisiológicas ou tempos de resposta. Posteriormente, Witmer *et al*. (2005) propuseram um modelo aprimorado com quatro dimensões: Envolvimento, Adaptação/Imersão, Fidelidade Sensorial e Qualidade da Interface, destacando a complexidade do conceito de “presença”. Os autores reforçam a necessidade de medidas multifacetadas para avaliar a “presença”, propondo a inclusão de novos itens para melhorar a validação do questionário original. Dessa forma, o QP se mostra uma ferramenta robusta para avaliar experiências imersivas em simuladores, com grande aplicação em pesquisas científicas, treinamentos e desenvolvimento tecnológico, especialmente quando complementado por outras formas de avaliação.

2.3. A influência das condicionantes climáticas adversas sob condutores

As condições climáticas adversas influenciam diversos aspectos da condução, afetando a visibilidade, o comportamento dos motoristas, o desempenho dos veículos e a segurança viária (Yan *et al.,* 2013). Este estudo analisa separadamente as situações de dia, noite e neblina. Durante o dia, apesar da melhor visibilidade, o brilho intenso pode levar os motoristas a reduzirem sua margem de segurança ou a acelerarem para compensar a percepção incorreta da velocidade (Ma *et al*., 2019). Já à noite, a ausência de luz natural limita a visão, prejudicando a detecção de obstáculos e a avaliação de distâncias (Wood, 2019). A neblina é apontada como uma das condições mais perigosas, pois reduz significativamente a visibilidade e o campo de visão, afetando a percepção de profundidade e aumentando a chance de colisões traseiras. Sob neblina, os motoristas tendem a reduzir a velocidade e aumentar a distância de seguimento para compensar essas limitações visuais (Cavallo, Colomb, Doré, 2001). Estudos com simuladores demonstram que condições climáticas extremas elevam a percepção de risco dos motoristas, reforçando a importância de estratégias específicas para melhorar a segurança nessas condições e destacando a utilidade dos simuladores para analisar o comportamento sob diferentes cenários ambientais (Chen *et al*., 2019).

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Este estudo foi conduzido por meio de um experimento com simulador de direção, utilizando um trecho de 14,3 km da rodovia RS-122 modelado virtualmente. O simulador do LASTRAN/UFRGS foi equipado com volante, pedais e banco automotivo realistas, representando um Fiat Uno Way 1.0 com calibração fiel às características do veículo real. A simulação considerou três condições climáticas: dia, noite e neblina, e dois tipos de veículos líderes (de passeio e de carga), totalizando seis cenários experimentais por participante. Antes de iniciar o experimento, os voluntários passaram por um período de familiarização com o equipamento. O link a seguir ilustra o funcionamento do equipamento e o andamento do experimento, com destaque para os diferentes cenários avaliados: https://www.youtube.com/watch?v=Zdtz9HTtHu8.

Participaram do estudo 34 motoristas habilitados. A amostra, embora adequada para análises iniciais, limita a generalização dos resultados para a população total de condutores. A média de idade foi de 39,2 e desvio padrão de 14,4 anos, o que evidencia uma variabilidade considerável na faixa etária da amostra. A idade variou entre 20 e 67 anos. O tempo médio de CNH de 17,4 anos. A amostra foi relativamente equilibrada entre os gêneros, com leve predominância do sexo masculino, representando 55,9% da amostra, enquanto as mulheres compõem 44,1% dos voluntários. Foi aplicado um questionário demográfico abordando questões como idade, gênero, tempo de CNH, experiência em rodovias de pista simples e histórico de acidentes. Após cada simulação, os voluntários responderam a uma versão adaptada do Questionário de Presença (QP).

Foram selecionadas 10 questões do QP original desenvolvido por Witmer e Singer (1998), as quais passaram por adaptações para se adequarem ao idioma, ao contexto do simulador de direção e ao cenário virtual de rodovia representado (Figueira, Larocca, 2018). Além da adaptação do conteúdo das perguntas, o layout do questionário foi reformulado, e optou-se pela utilização de uma escala Likert de 6 pontos, variando de 0 a 5, para mensurar as percepções dos participantes. As perguntas selecionadas do questionário tiveram suas respostas segmentadas em dia, noite e neblina, já que as respostas sofreriam influência do ambiente simulado.

Os dados coletados foram analisados com ferramentas estatísticas da linguagem Python, com foco em análises descritivas. O objetivo foi avaliar as diferenças na percepção dos voluntários nos diferentes cenários propostos e para tal, este artigo apresenta a média e o desvio-padrão das respostas para cada pergunta.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As perguntas analisadas abrangeram aspectos como realismo visual, sensação de controle, imersão, conforto e satisfação geral com o simulador. A análise incluiu avaliação de estatísticas descritivas e cruzamentos com dados demográficos dos participantes (gênero, idade, tempo de CNH e histórico de acidentes). As questões foram organizadas em quatro categorias: Envolvimento (EV), englobando itens que avaliam o nível de concentração, atenção e a carga associada a estímulos ou atividades coerentes com o ambiente; Adaptação/Imersão (AI), relacionada à sensação de estar completamente envolvido, imerso e em interação contínua com os estímulos e experiências do cenário; Fidelidade Sensorial (FS), voltada para a avaliação das percepções visuais e auditivas do ambiente e dos equipamentos virtuais; e Qualidade da Interface (QI), que considera o impacto das interfaces visuais e dos controles sobre a experiência de simulação (Witmer *et al.*, 2005). A tabela a seguir fornece as estatísticas descritivas de cada pergunta para cada cenário avaliado

Tabela 1: Estatísticas descritivas para cada cenário

QP	QP ADAPTADO	MÉDIA			DESVIO PADRÃO		
		Dia	Noite	Neblina	Dia	Noite	Neblina
Q4 (EV)	Em que nível o aspecto visual do simulador conseguiu te envolver no ambiente?	4,44	4,47	4,47	0,61	0,66	0,79
Q7 (EV)	Qual o nível de convicção que você daria para os objetos presentes na simulação?	4,41	4,29	4,09	0,50	0,52	0,79
Q8 (EV)	Quão idêntico é o ambiente simulado comparado com uma experiência de direção real?	3,94	3,85	3,68	0,69	0,78	1,01
Q10 (EV)	Quanto você conseguiu explorar visualmente o ambiente para tomar decisões baseadas no entorno?	4,50	4,50	3,91	0,90	0,71	1,31
Q14 (EV)	Quão envolvido com o ambiente virtual você esteve?	4,35	4,41	4,53	0,60	0,66	0,79
Q15 (FS)	Quantos detalhes você foi capaz de identificar nos objetos ao observá-los?	4,29	4,09	3,00	1,22	1,22	1,48
Q16 (FS)	Considerando um mesmo objeto a diferentes distâncias, você percebeu diferença no nível de detalhamento?	2,59	2,65	2,35	2,03	1,91	1,77
Q20 (AI)	O quão rápido você se adaptou à experiência do ambiente virtual?	4,44	4,47	3,91	0,75	0,71	1,22
Q22 (QI)	Quanto a qualidade da exibição visual interferiu ou distraiu você na execução da condução?	0,76	0,65	0,76	1,16	1,04	1,21
Q32 (AI)	As informações fornecidas por meio dos diferentes sentidos no ambiente virtual (por exemplo, visão, audição) foram consistentes?	4,50	3,50	4,65	0,56	0,66	0,54

De maneira geral, os resultados indicaram que o cenário diurno foi avaliado de forma mais positiva pelos participantes. As respostas nesse cenário apresentaram maiores médias e menores desvios-padrões. A maior concentração de respostas nas categorias mais altas da escala sugere que a experiência no cenário de dia proporcionou uma percepção de maior realismo, conforto e controle. O cenário noturno, embora tenha apresentado desempenho satisfatório, mostrou uma leve redução nas médias e um aumento na variabilidade das respostas. Isso pode ser associado às limitações naturais da visibilidade durante a noite, que impactam alguns aspectos sensoriais, embora não tenham comprometido significativamente a experiência como um todo. Por fim, o cenário com neblina foi o que apresentou os resultados mais críticos. As médias foram sensivelmente mais baixas em várias perguntas, e a dispersão das respostas aumentou consideravelmente. Esse cenário trouxe maiores desafios aos participantes, impactando diretamente sua percepção de conforto, controle e segurança.

Ao observar as respostas de forma mais detalhada fica evidente que nem todos os itens foram igualmente sensíveis às variações climáticas. As maiores diferenças apareceram nas questões relacionadas à clareza visual, percepção de profundidade, nitidez dos objetos e sensação de segurança. No cenário com neblina, esses itens apresentaram quedas expressivas nas médias e aumento nos desvios padrão, indicando que muitos participantes tiveram dificuldade com a percepção do ambiente. Da mesma forma, perguntas associadas à facilidade de controle do veículo e à resposta dos comandos também foram impactadas, embora de forma um pouco mais moderada. Por outro lado, itens relacionados à ergonomia, à disposição dos elementos do simulador e à compreensão dos comandos se mantiveram mais estáveis nos três cenários. Esses resultados indicam que os impactos da condição climática recaem principalmente sobre os elementos de percepção e visão.

Quando se observa o perfil dos participantes, percebe-se que algumas variáveis demográficas tiveram influência relevante nas avaliações. O gênero dos voluntários não apresentou diferenças estatisticamente significativas, o que indica que homens e mulheres perceberam a experiência de maneira bastante semelhante. A faixa etária, entretanto, demonstrou impacto: participantes mais jovens, especialmente aqueles com até 24 anos, avaliaram os três cenários de maneira mais positiva, o que pode estar relacionado à maior familiaridade com ambientes virtuais. Por outro lado, os voluntários de faixas etárias mais elevadas tenderam a avaliações ligeiramente mais críticas, sobretudo no cenário de neblina, onde as limitações perceptivas parecem ter se tornado mais salientes. Uma tendência semelhante foi observada em relação ao tempo de habilitação. Motoristas com até cinco anos de CNH deram notas mais altas em praticamente todos os cenários, sugerindo maior aceitação das condições apresentadas. Já motoristas mais experientes foram mais exigentes, especialmente quando a simulação exigiu maior capacidade perceptiva, como foi o caso na neblina. Outro dado relevante é o impacto do histórico de acidentes: participantes que já estiveram envolvidos em acidentes de trânsito mostraram-se mais sensíveis aos aspectos relacionados à sensação de segurança, percepção de risco e controle, oferecendo avaliações mais baixas, especialmente quando submetidos ao cenário com neblina.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou a importância do uso de simuladores de direção como ferramenta eficaz para investigar a percepção subjetiva de condutores frente a diferentes condições climáticas. Os resultados mostraram que o cenário diurno proporcionou maior sensação de presença, conforto e controle, enquanto a condição com neblina foi percebida como mais desafiadora, afetando negativamente a experiência em termos de visibilidade e segurança. Este achado reforça a validação do simulador, visto que em um cenário real os motoristas de fato encontram maiores dificuldades sob condições adversas. Fatores demográficos, como idade, tempo de habilitação e histórico de acidentes, influenciaram as avaliações, sugerindo que a familiaridade com ambientes virtuais e a experiência prévia na condução impactam na percepção da simulação.

As evidências reforçam que a sensação de presença em ambientes virtuais depende não apenas da qualidade técnica do simulador, mas também da adaptação do usuário ao cenário apresentado. Assim, o uso de simuladores permite avaliar, de forma segura e controlada, o comportamento em cenários variados contribuindo para o desenvolvimento diversas aplicações, como modelagem e projetos de engenharia de tráfego e segurança viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, E. M., Ahmed, M. M., e Yang, G. (2021) Normal and risky driving patterns identification in clear and rainy weather on freeway segments using vehicle kinematics trajectories and time series cluster analysis. *IATSS Research*, 45(1), 137–152. DOI:10.1016/j.iatssr.2020.07.002

Aurenice da Cruz Figueira e Ana Paula Camargo Larocca (2018) Avaliação de simulador de direção a partir de questionário de presença. ISBN: 978 85-87893-21-5. Disponível em: Anais (acesso em 10/9/2025).

Burdzik, R., Simiński, D., Kruszewski, M., Niedzicka, A., Gąsiorek, K., Zabieva, A. B., Mamala, J., e Dębicka, E. (2024) Designing and Planning of Studies of Driver Behavior at Pedestrian Crossings Using Whole-Vehicle Simulators. *Applied Sciences* (Switzerland), 14(10). DOI:10.3390/app14104217

César Luís Andriola. (2021) *Análise da validade comportamental de um simulador de direção imersivo.* Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em http://hdl.handle.net/10183/221718 (acesso em 02/06/2025).

Chen, C., Zhao, X., Liu, H., Ren, G., e Liu, X. (2019) Influence of adverse weather on drivers' perceived risk during car following based on driving simulations. *Journal of Modern Transportation*, 27(4), 282–292. DOI:10.1007/s40534-019-00197-4

Colmenares, J. A. R., Asua, E., Fuente, V. de la, e Rojo, A. (2024*)* Development and Validation of a Driving Simulator for Comfort Assessment. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 22(3), 804–819. DOI:10.1007/s13177-024-00427-y

Cavallo, V., Colomb, M., & Doré, J. (2001). Distance Perception of Vehicle Rear Lights in Fog. Human Factors*: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *43*(3), 442–451. https://doi.org/10.1518/001872001775898197

Deniaud, C., Honnet, V., Jeanne, B., e Mestre, D. (2015) The concept of "presence" as a measure of ecological validity in driving simulators. *Journal of Interaction Science*, 3(1). DOI:10.1186/s40166-015-0005-z

Ma, H. P., Chen, P. L., Chen, S. K., Chen, L. H., Linkov, V.,e Pai, C. W. (2019) Population-based case-control study of the effect of sun glare on pedestrian fatalities in Taiwan. *BMJ Open*, 9(8). doi:10.1136/bmjopen-2018-028350

Malone, S., e Brünken, R. (2021) Hazard Perception, Presence, and Simulation Sickness—A Comparison of Desktop and Head-Mounted Display for Driving Simulation. *Frontiers in Psychology,* 12. DOI:10.3389/fpsyg.2021.647723

Scheuchenpflug, R., De Waard, I. D., Brookhuis, K. A., Breker, S. M., Verwey, W. B., Ruspa, C., e Quattrocolo, S. (2003) Human Factors in the Age of Virtual Reality. *Shaker Publishing.* Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281574906 (acesso em 05/06/2025).

Slater, M., e Sanchez-Vives, M. V. (2009) How we experience immersive virtual environments: The concept of presence and its measurement.Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228751198(acesso em 01/06/2025)

Theofilatos, A., e Yannis, G. (2014) A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accident Analysis and Prevention*, 72, 244–256. doi:10.1016/j.aap.2014.06.017

Witmer, B. G., Jerome, C. J., Singer, M. J., Witmer, B. G. ;, e Jerome, C. J. ; (2005) The factor structure of the presence questionnaire. Disponível em http://library.ucf.edu (acesso em 02/06/2025).

Witmer, B. G., e Singer, M. J. (1998) Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence*, v. 7, 2.20

Wood, J. M. (2020) Nighttime driving: visual, lighting and visibility challenges. *Ophthalmic and Physiological Optics. Blackwell Publishing Ltd*. DOI:10.1111/OPO.12659

Yan, X., Li, X., Liu, Y., e Zhao, J. (2014) Effects of foggy conditions on drivers' speed control behaviors at different risk levels. *Safety Science*, 68, 275–287. DOI:10.1016/j.ssci.2014.04.013

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO E OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA EM ROTATÓRIAS URBANAS: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE UNIVERSITÁRIA

Ulisses Ghidoni, Carolina Mendes Esposito, Rodrigo Zemaitis Fakiani, Cláudio Luiz Marte
Universidade de São Paulo

RESUMO
Este estudo avalia cenários alternativos para a infraestrutura viária na rotatória da Praça Professor Reynaldo Porchat, localizada no Portão 1 da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO), em São Paulo, um ponto crítico de congestionamento que afeta as linhas de ônibus circulares. Utilizando microssimulação de tráfego no software VISSIM, a pesquisa comparou propostas de intervenção, desde a adição de faixas exclusivas e sistemas de priorização semafórica para ônibus, até a substituição completa da rotatória por configurações semaforizadas. O objetivo principal foi reduzir os tempos de viagem dos ônibus e otimizar o fluxo de tráfego geral, utilizando indicadores de desempenho como tempo de viagem e comprimento de fila. Os resultados demonstram que as modificações estruturais combinadas com semáforos são as mais eficazes para a melhoria do transporte público e a redução de congestionamentos.

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente por mobilidade em grandes centros urbanos, como São Paulo, tem levado ao aumento dos congestionamentos, com impactos negativos no meio ambiente, na economia e na qualidade de vida. Neste contexto, a rotatória da Praça Professor Reynaldo Porchat, no Portão 1 da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO), exemplifica um ponto de estrangulamento na rede viária, caracterizado por frequentes congestionamentos, especialmente em horários de pico. Tal cenário afeta diretamente a eficiência operacional das linhas de ônibus circulares 8082, 8083 e 8084 que servem a comunidade universitária, elevando os tempos de deslocamento. Atualmente, a Guarda Universitária implementa um bloqueio parcial na rotatória em períodos de alta demanda, permitindo apenas a passagem de ônibus pela faixa bloqueada, o que já proporciona uma melhora real nos tempos de viagem do transporte público.

Este estudo tem como objetivo principal avaliar, por meio de ferramentas de microssimulação de tráfego, diferentes propostas de intervenção na infraestrutura e no controle de tráfego local. Busca-se determinar as estratégias mais eficientes para reduzir os tempos de viagem dos ônibus circulares e, consequentemente, melhorar a qualidade do serviço de transporte público, além de analisar os impactos no tráfego geral. Os cenários propostos abrangem desde alterações geométricas simples, como a adição de faixas exclusivas para ônibus, até modificações mais complexas na infraestrutura, incluindo a substituição da rotatória por diferentes configurações de interseções semaforizadas. A análise comparativa é fundamentada em indicadores de desempenho predefinidos, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão em futuras intervenções de mobilidade.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A complexidade dos sistemas de tráfego urbanos e a necessidade de gerenciar os congestionamentos têm impulsionado o desenvolvimento de Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS) e tecnologias de otimização semafórica em tempo real. Esses sistemas visam melhorar a eficiência da infraestrutura existente e a qualidade de vida nas cidades. A microssimulação de tráfego, utilizando softwares como o VISSIM, é uma ferramenta importante para avaliar o impacto de tais intervenções antes de sua implementação prática.

No campo das rotatórias e do controle semafórico, Al-Mudhaffar e Berg (2011) investigaram diferentes configurações de controle por sinais, concluindo que semáforos posicionados muito próximos à rotatória podem prejudicar a capacidade e a segurança, enquanto a coordenação completa se mostra eficaz em situações de alto fluxo de pedestres. Aakre (2017) propôs a "Rotatória com Faixa Mediana Contínua (CMLR)" para sistemas de Bus Rapid Transit (BRT), que utiliza sinais de "dê a preferência" dentro da rotatória para gerenciar conflitos entre ônibus e outros veículos, demonstrando potencial significativo para redução de atrasos e emissões. O guia do ITDP (Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento) complementa essas abordagens com soluções para BRT em rotatórias, como a dedicação de faixas internas ou a construção de uma faixa central que permite o tráfego de transporte público através da rotatória, como o conceito de "Hamburger Roundabout". Essas soluções convergem na necessidade de equilibrar a priorização do transporte público com o impacto no tráfego geral, adaptando-se às características específicas de cada

local.

Ainda sobre sistemas de otimização semafórica em tempo real, Di Biase (2019) analisou a aplicação de tecnologias como BALANCE e EPICS na cidade de São Paulo para mitigar congestionamentos. Sua pesquisa evidenciou que os sistemas adaptativos de controle de tráfego (ATCS) são eficazes para gerenciar as rápidas flutuações da demanda, minimizando impactos negativos e melhorando o aproveitamento da rede viária, em contraste com os planos semafóricos fixos. Di Biase (2019) também aborda as possíveis evoluções desses sistemas, destacando a superação das limitações dos sensores fixos (câmeras e laços indutivos) e o aproveitamento das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) como Big Data, Internet das Coisas (IoT), e comunicações Veículo-a-Veículo (V2V) e Veículo-a-Infraestrutura (V2I). Essas novas arquiteturas prometem sistemas de custo mais baixo e mais resistentes a problemas de manutenção, viabilizando a implementação onde antes não seria possível.

3. ÁREA DE ESTUDOS E DADOS UTILIZADOS

O presente estudo utilizou um micromodelo de tráfego desenvolvido no software VISSIM para simular e avaliar diferentes cenários de intervenção na rotatória da Praça Professor Reynaldo Porchat.

Para a comparação dos cenários, foram definidos dois principais indicadores de desempenho:

- Tempo de viagem dos ônibus circulares: Prioritário, medido da entrada da rotatória até a saída pelo Portão 1.
- Tamanho da fila total máxima e tempo de viagem dos veículos particulares: Secundário, monitorado na Avenida da Universidade, visando garantir que as melhorias para o transporte público não resultem em prejuízos significativos para os demais usuários.

A construção do modelo baseou-se em dados coletados em 2023 e incluíram: contagens volumétricas de veículos (veículos de passeio – VP, ônibus comuns – CO, e veículos comerciais articulados – SR/RE) em pontos estratégicos das rotatórias da Praça Professor Reynaldo Porchat e da Praça Professor Rubião Meira (CEPEUSP). Além disso, foram coletados dados sobre os tempos semafóricos da interseção entre a Avenida Afrânio Peixoto e a Rua Alvarenga, comprimentos de fila em pontos críticos, e características geométricas das vias. Os tempos de viagem dos ônibus circulares foram reavaliados e atualizados em setembro de 2023, com base em informações da SPTrans, para calcular os headways médios das linhas 8082, 8083 e 8084.

Imagens de satélite, fotografias e gravações de câmeras de segurança da Guarda Universitária da USP foram utilizados como dados secundários para analisar a geometria viária e compreender as operações de bloqueio parcial da rotatória. A coleta de dados abrangeu períodos de pico (manhã e noite). Os dados de contagens volumétricas foram usados para definir os fluxos de entrada e a composição veicular, enquanto a geometria das vias foi modelada no VISSIM com base no número e largura das faixas, faixas exclusivas, faixas de ônibus e ciclovias.

Uma limitação do modelo reside na adoção dos parâmetros padrão do modelo de Wiedemann para o comportamento do motorista, originalmente calibrados para a realidade alemã, o que pode não refletir integralmente o comportamento dos motoristas brasileiros. Embora a calibração baseada em filas e tempos de viagem tenha mitigado essa limitação, uma calibração mais aprofundada dos parâmetros comportamentais (como distância mínima entre veículos, aceitação de brechas e mudança de faixa) resultaria em um modelo mais representativo. A simplificação na combinação de veículos articulados (SR) com ônibus comuns (CO) nas contagens, embora justificada pelo baixo volume de SR, pode ter subestimado o impacto desses veículos maiores, especialmente em situações de congestionamento, sugerindo a necessidade de atribuição de *passenger car equivalents* (PCEs) específicos em abordagens futuras. A metodologia de coleta de dados em dias distintos para diferentes fluxos introduziu incertezas, que foram tratadas por compatibilização; contagens simultâneas seriam mais robustas.

Foram propostos e simulados seis cenários de intervenção, além de um Cenário Base e um Cenário 0 representados na Figura 1.

.



Figura 1: Cenários

A Figura 1 representa as diversas propostas de cenários para a rotatória da Praça Professor Reynaldo Porchat, na Cidade Universitária.
O Cenário Base ilustra a proposta inicial de funcionamento da rotatória sem o bloqueio de pico e serviu como referência. Em contraste, o Cenário 0 descreve a configuração operacional atual, com o bloqueio parcial da rotatória implementado pela Guarda Universitária nos horários de pico, o que já resulta em melhora no tempo de deslocamento dos ônibus.

Dentre as propostas que mantêm a estrutura da rotatória, o Cenário 1a introduz uma faixa exclusiva para ônibus sem modificar o sistema semafórico existente. Os Cenários 1b e 1c incluem um sistema de priorização semafórica na entrada e saída da rotatória. Para esses cenários, a priorização semafórica é incondicional para os ônibus e se manifesta de duas formas: no semáforo de saída da rotatória, o tempo de semáforo aberto para os ônibus é ajustado para 5 segundos no Cenário 1b e para 15 segundos no Cenário 1c. Por sua vez, na entrada da rotatória, um mecanismo de prioridade de passagem imediata é empregado, onde o semáforo permanece normalmente aberto para o fluxo de ônibus e fecha para outros veículos apenas no momento em que a detecção de um ônibus ocorre.

Cenários com modificações estruturais incluem o Cenário 2a, que substitui a rotatória por uma faixa dupla no sentido USP-Butantã e uma interseção em T no sentido Butantã-USP, com semáforos de 3 tempos. O Cenário 2b, similar ao 2a mas com semáforos de 2 tempos. Finalmente, o Cenário 2c mantem as alterações geométricas do 2a, adicionando um sistema de priorização semafórica incondicional no semáforo de saída para a Rua Alvarenga.

4. RESULTADOS

Após a calibração do micromodelo, foram realizadas 10 simulações para cada cenário, com os resultados apresentados em médias e desvios padrão. Os indicadores de desempenho prioritário (tempo de viagem dos ônibus) e secundário (tamanho da fila máxima e tempo de viagem de veículos particulares) foram utilizados para avaliação e são apresentados na Figura 2.

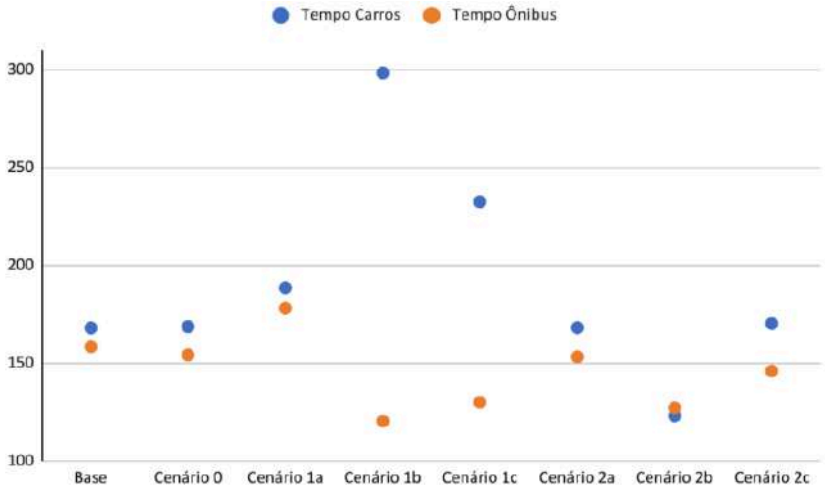


Figura 2: Resultados

O Cenário Base (sem bloqueio) apresentou um tempo médio de viagem para ônibus de 158,4 segundos (±15,1 segundos) e uma fila máxima de 361,6 metros (±52,9 metros), evidenciando as limitações operacionais da configuração atual.

O Cenário 0 (operação atual com bloqueio da Guarda Universitária) mostrou uma ligeira melhoria para ônibus (-2,7%), mas aumentou a fila máxima (+6,71%) e o tempo dos carros (+0,37%), indicando uma transferência do congestionamento.

Os cenários que mantiveram a estrutura da rotatória com faixas exclusivas apresentaram resultados variados:

- O Cenário 1a resultou em piora, com aumento de 12,5% no tempo de viagem dos ônibus, sugerindo que a simples adição de faixa exclusiva sem outras modificações pode intensificar conflitos.
- O Cenário 1b (com priorização semafórica) trouxe uma melhora substancial para ônibus (-24,0%), atingindo 120,4 segundos. Contudo, causou aumento significativo no tempo dos veículos particulares (+77,7%) e na fila máxima (+21,9%), revelando que a priorização pode gerar severos impactos no tráfego geral.
- O Cenário 1c (15 segundos de verde na priorização) alcançou um equilíbrio mais adequado, com redução de 18,0% no tempo dos ônibus (129,9 segundos), aumento de 38,4% no tempo dos veículos particulares e redução de 5,3% na fila máxima.

Em contraste, os cenários que propuseram a substituição completa da rotatória por configurações semaforizadas (2a, 2b e 2c) demonstraram superioridade consistente:

- O Cenário 2a (semáforos de 3 tempos) reduziu o tempo de viagem dos ônibus em 3,2% e a fila máxima em 45%.
- O Cenário 2b (semáforos de 2 tempos) emergiu como a alternativa mais eficaz, proporcionando redução expressiva de 19,7% no tempo de viagem dos ônibus e de 63,3% na fila máxima, além de maior estabilidade operacional.
- O Cenário 2c (semelhante ao 2a com priorização para ônibus) reduziu o tempo dos ônibus em 7,85% e a fila máxima em 25,21%, mantendo o tempo de viagem dos veículos particulares estável (+1,30%), o que indica que essa proposta pode ser implementada sem grandes prejuízos ao tráfego geral quando combinada com modificações estruturais.

5. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que, embora a intervenção atual da Guarda Universitária na Cidade Universitária da USP traga melhorias moderadas, soluções estruturais podem gerar benefícios significativamente maiores para o transporte público.

A pesquisa evidenciou a viabilidade de duas abordagens principais: a reconfiguração completa da rotatória para uma interseção semaforizada e a manutenção da rotatória com a adição de faixas exclusivas e

priorização semafórica. O cenário (2b) que propõe a substituição da rotatória por uma interseção semaforizada de dois tempos, destacou-se como a solução de melhor desempenho geral, com a vantagem adicional de não exigir sistemas complexos de priorização semafórica, o que se traduz em menor custo de manutenção e monitoramento. No entanto, sua implementação requer um estudo de viabilidade e, também, uma análise dos impactos no deslocamento de pedestres.

No entanto, sua implementação requer um estudo de viabilidade. A substituição da rotatória por configurações semaforizadas, particularmente o Cenário 2b, requer análise detalhada da viabilidade construtiva, incluindo aspectos geotécnicos, drenagem e interferências com infra estruturas existentes. A reconfiguração geométrica proposta também demanda estudo específico sobre o impacto na circulação de pedestres, especialmente considerando que o ponto de ônibus seria realocado, afetando potencialmente a acessibilidade dos usuários.

Por outro lado, os cenários 1b e 1c provaram que é possível alcançar melhorias para o transporte público sem a necessidade de uma reconstrução completa da interseção. O cenário 1b oferece a maior redução no tempo de viagem dos ônibus (24,0%), mas acarreta impactos significativos no tráfego de veículos particulares. Já o Cenário 1c apresenta um compromisso mais equilibrado, reduzindo o tempo de viagem dos ônibus em 18,0% com impactos moderados no tráfego geral, tornando-o uma opção aceitável.

Além disso, é importante compreender as limitações do estudo, especialmente a utilização de parâmetros do modelo de Wiedemann baseados na realidade alemã. Embora a calibração por filas e tempos de viagem tenha mitigado parte dessa limitação, uma calibração mais precisa dos parâmetros comportamentais dos motoristas brasileiros melhoraria a representatividade do modelo.. Outra limitação importante consiste em a simulação ter sido feita com dados de dois dias isolados de um mesmo mês, não englobando outros tipos de variações que podem existir, nem mesmo um comportamento médio do trecho ao longo de determinado período

Por fim, a escolha da estratégia mais adequada dependerá da disponibilidade de recursos, da urgência da implementação e da aceitabilidade política dos impactos no tráfego geral. A análise comparativa dos cenários aqui apresentada serve como um valioso subsídio para tomadores de decisão na busca por soluções eficazes para a melhoria da fluidez e eficiência do transporte público.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aakre, E. (2017) Simulating transit priority: Continuous median lane roundabouts. Transportation Research Procedia, v. 27, p. 1176–1183.

Al-Mudhaffar, A. e S. Berg (2011) Signal Control of Roundabouts. Procedia Social and Behavioral Sciences, v. 16, p. 729–738.

Di Biase, L. (2019) Análise de sistemas de otimização semafórica em tempo real para a melhoria do desempenho da rede viária: um estudo de caso na Cidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, 149 f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ITDP. BRT Planning Guide. Disponível em: https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/intersections-and-signal-control/brt-lanes-at-roundabouts. Acesso em: 26 abr. 2025.

Ulisses Ghidoni (ulisses.guidone@gmail.com)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, São Paulo, SP, Brasil
Carolina Mendes Esposito (carolinaesposito@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de de Engenharia de Transportes, Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, São Paulo, SP, Brasil
Rodrigo Zemaitis Fakiani (fakiani@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de de Engenharia de Transportes, Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, São Paulo, SP, Brasil
Cláudio Luiz Marte (claudio.marte@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de de Engenharia de Transportes, Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, São Paulo, SP, Brasil

CAPACITY DROP EXTENSION FOR THE CELL TRANSMISSION MODEL DEPENDENT ON UPSTREAM CONGESTION AND ON-RAMP FLOW

Felipe de Souza[1], **Rodrigo Castelan Carlson**[2]
[1]Argonne National Laboratory, [2]Federal University of Santa Catarina

ABSTRACT
The capacity drop (CD) phenomenon worsens freeway congestion, yet its contributing factors remain debated. We investigate the causes of CD at on-ramp merge bottlenecks using the Cell Transmission Model (CTM). We compare a CD extension to the CTM based on upstream congestion with new extensions based on on-ramp flow and on the combination of both factors. All formulations were calibrated and validated using field data from a freeway bottleneck that experiences recurrent congestion. The results show that models incorporating the on-ramp flow effect outperform the model based on upstream congestion. Furthermore, the similar performance of the model combining both factors with the the on-ramp flow model alone suggests that the on-ramp flow is the dominant factor contributing to the CD at on-ramp merge bottlenecks.

1. INTRODUCTION

Congestion on freeways is a common condition in peak-hours because of demand exceeding capacity at bottlenecks. The extent of congestion may be worsened due to the capacity drop (CD) phenomenon that corresponds to a sustained drop in the bottleneck outflow after the congestion onset compared to the outflow observed before the congestion onset (Cassidy and Bertini, 1999). Understanding this phenomenon and how to mitigate its effects is critical, since delays on freeways are dependent on the capacities of their bottlenecks. Therefore, it is important to understand the causes and simulate the CD phenomenon, validating it against field data (Papageorgiou, 1998) because accurate models are key for the development and analysis of interventions.

Multiple factors have been identified as contributors to the CD, e.g., bounded acceleration (Gazis and Foote, 1969), lane changing (Laval and Daganzo, 2006), and their combination (Leclercq *et al.*, 2011), among others. The lack of an established explanation for the CD led to the proposal of different models with different mechanisms targeting the reproduction of this phenomenon in macroscopic traffic models. In first order models, such as the Cell Transmission Model (CTM) (Daganzo, 1994) the CD is not an inherent feature. Therefore, several CD extensions were proposed for the CTM (Kontorinaki *et al.*, 2017).

We test three capacity drop CTM extensions. One is based on upstream congestion, the most common approach in the literature. Then we propose an extension based on on-ramp flow and one combining both factors. These formulations are calibrated with field data of a freeway on-ramp merge. The objective is to find out which factor dominates the contribution to the CD and which of the three formulations leads to the best simulation results. The choice of a macroscopic over microscopic models stems from its direct correspondence to loop detector data and its structure that allows the interpretation of the results based on the magnitude of the calibrated parameters.

Section 2 presents the CTM and the baseline capacity drop extension based on upstream congestion. In Section 3, the proposed extension of capacity drop due to on-ramp flow and its combination with the upstream congestion CD extension are presented. Finally, Sections 4 and 5 present the results and the conclusions, respectively.

2. THE CELL TRANSMISSION MODEL AND A CAPACITY DROP EXTENSION

The basics of the CTM and a description of how the capacity drop phenomenon based on upstream congestion is incorporated in this model are presented.

2.1. The base cell transmission model

A link of length L is divided into $N = \lfloor \frac{L}{\Delta x} \rfloor$ cells of length Δx, indexed as $j = 1, \ldots, N$. Time is discretized into M steps of duration Δt, indexed as $i = 1, \ldots, M$. The state of cell j at time step i is its density $k_j(i)$. The other traffic flow variables at cell j can be determined from its flow-density relationship (fundamental diagram) $Q_j(k)$. The critical density at cell j is denoted as $k_{c,j}$ and $Q_j(k_{c,j}) = C$ is the capacity flow at cell j.

At every time step the demand and the supply are computed for every cell. Demand is the maximum flow that the upstream cell can send to the downstream cell, regardless of the state of the downstream cell, provided that

the number of leaving vehicles does not exceeds the number of vehicles in it and that the flow does not exceeds the cell's capacity flow. Supply is the maximum flow that the downstream cell can receive from the upstream cell, regardless of the state of the upstream cell, provided that the addition of the received vehicles does not exceeds the cell's jam density and that the flow does not exceeds the capacity flow of the downstream cell.

The demand, $D_j(i)$, and supply, $S_j(i)$, at cell j at time step i are computed as:

$$D_j(i) = Q_j(\min\{k_j(i), k_{c,j}\}), \quad S_j(i) = Q_j(\max\{k_j(i), k_{c,j}\}). \tag{1}$$

The flow from cell j to cell $j+1$ is computed based on the demand of cell j, on the supply of cell $j+1$, and on the on-ramp flow into cell $j+1$, if one on-ramp is present. Off-ramps are not considered in this work.

For the on-ramps we make two assumptions. First, the supply of the cell just downstream of the on-ramp is larger than the on-ramp demand. This generally holds around active bottlenecks. Second, we implement absolute priority to the on-ramp to determine the flow distribution when the total flow is constrained by the downstream supply. This is a common assumption in calibration studies (Kontorinaki *et al.*, 2017). Therefore:

$$q_j(i) = \min\{D_j(i), S_{j+1}(i) - r_j(i)\}, \tag{2}$$

with $r_j(i)$ the on-ramp flow merging at cell j. If there is no on-ramp merging at cell j, $r_j(i) = 0$. Once flows have been computed, the density is updated as follows:

$$k_j(i+1) = k_j(i) + \frac{\Delta t}{\Delta x}(q_{j-1}(i) + r_j(i) - q_j(i)) \tag{3}$$

with Δx and Δt set such that no flow can move more than Δx in one-time step.

2.2. The capacity drop in the cell transmission model

We use the CD extension by Han *et al.* (2016), as it follows the most common approach for the CD modeling in the CTM, which is a drop in the maximum flow rate as consequence of upstream congestion. This extension is suitable because it can reproduce other models in the literature by an appropriate choice of parameters (Kontorinaki *et al.*, 2017). Henceforth, we assume that there is a latent bottleneck between cells b and $b+1$ with capacity C_b. In this model, the supply function in absence of on-ramp flow is determined as:

$$S_{b+1} = \begin{cases} \omega(k_b - k_{b+1}), & k_b \leq k_{b+1} \\ a + b(k_b - k_{b+1}), & k_b > k_{b+1} \end{cases} \tag{4}$$

with a and b parameters to be determined. Based on assumptions of continuity in Equation (4), one could set $a = C$ and then b such that $S_{b+1}(k = k_{\text{jam}}) = 0$. Other choices are possible.

3. CAPACITY DROP EXTENSION DUE TO UPSTREAM CONGESTION AND ON-RAMP FLOW

In this section, we present a capacity drop extension based on on-ramp flow and its combination with the extension based on upstream congestion, preceded by background material necessary for its derivation.

3.1. Capacity drop triggered by upstream congestion in relative capacity formulation

To keep consistency with the extension presented in the next subsection, we change the variables in the modeling by Han *et al.* (2016) presented in Section 2.2 to derive an equivalent extension based on relative capacity:

$$\gamma_c(k_b(i)) = 1 - \min\{\alpha(k_b(i) - k_{c,b}), \alpha^{\max}\}, \; k_b \geq k_{c,b}, \tag{5}$$

$$\tilde{q}_b(i) = \min\{D_b, S_{b+1}, C_b\gamma_c(k_b(i))\} \tag{6}$$

with $\alpha > 0$ having the same role as b, and $\alpha^{\max}$ having the same role as a, with $\alpha^{\max} = 0$ being equivalent to $a = C_b$. This formulation leads to an easier combination with the extension based on on-ramp flow and renders the magnitude of the parameters comparable whenever comparing each model individually.

3.2. Capacity drop triggered by on-ramp merging flow

We propose a CTM capacity drop extension based on the hybrid model proposed by Leclercq *et al.* (2011) that models the influence of the on-ramp flow in the bottleneck dynamics. Their modelcombines macro and microscopic features rendering the capacity as an outcome of bounded acceleration and lane-changing dynamics.

We propose a simplification of the model by Leclercq *et al.* (2011). First, we rely on less parameters, consistent with a macroscopic model. Second, they effectively model only the on-ramp lane and the rightmost lane of the freeway mainline, while we consider all lanes. The net effect of their model is an increasing drop in the bottleneck flow as the on-ramp flow increases until a saturation flow rate. We approximate this effect with:

$$\gamma_{\mathrm{r}}(r_b(i)) = 1 - \min\left\{\beta\frac{r_b(i)}{C_b}, \beta^{\max}\right\}, \tag{7}$$

with the parameters β and $\beta^{\max}$ obtained from calibration.

3.3. Capacity drop triggered by upstream congestion and on-ramp flow

Since there are no common variables between the capacity drop models, the capacity drop due to congestion and on-ramp flows (Equations 5, 6, and 7) can be combined as the product of both effects:

$$\gamma = \gamma_{\mathrm{c}}(k_b(i))\gamma_{\mathrm{r}}(r_b(i)), \tag{8}$$

$$q_b(i) = \min\{D_b(i), S_b(i), C_b\gamma\}. \tag{9}$$

Although independent, the capacity drop due to on-ramp flow may influence indirectly the capacity drop due to upstream congestion. The higher drop due to on-ramp flow decreases the flow through the bottleneck which leads to higher upstream density. This can lead to higher capacity drop due to upstream congestion. In Equation 8 both effects are disabled when $\gamma_{\mathrm{c}} = \gamma_{\mathrm{r}} = 1$, one of the effects is enabled when $\gamma_{\mathrm{c}} = 1$ and $\gamma_{\mathrm{r}} < 1$ or when $\gamma_{\mathrm{c}} < 1$ and $\gamma_{\mathrm{r}} = 1$, and both effects are enabled when $\gamma_{\mathrm{c}} < 1$ and $\gamma_{\mathrm{r}} < 1$. Figure 1 depicts the three cases showing the relationship with respect to density and on-ramp flow in the left and right graphs, respectively. The green line represents the CD triggered by upstream congestion with a linear decay after exceeding the critical density and then plateauing and no impact from on-ramp flow. Conversely, the orange graph shows the CD triggered by the on-ramp flow with analogous characteristics. The purple line shows the combined effect.

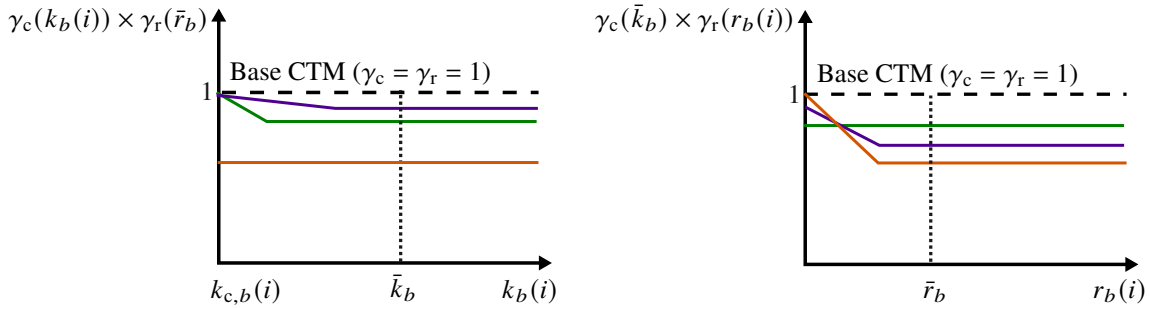


Figure 1: The relative capacity drop as function of density (left) and on-ramp flow (right) with green, orange and purple representing the CD by upstream congestion, on-ramp flow and combined, respectively

4. RESULTS

Figure 2 depicts the schematic of a three-lane stretch of freeway US101-N in the Santa Clara County, California, USA, and the PeMS detection station identifiers. It experiences recurrent congestion during the morning peak. The active bottleneck is in the area between stations 401578 and 401586, which are used, respectively, for comparing the density, computed from the occupancies, and for comparing the outflows. The mainline detectors provide per lane counts and occupancies in periods of 30 seconds that we aggregated in intervals of 3 minutes to avoid high frequency noise. The on-/off-ramp detectors provide only counts. Data from 5AM until 11AM for six days were selected after a curation process. All comprise an uncongested period from 6AM, a congestion period starting around 7AM and lasting over two hours, and an uncongested period thereafter.

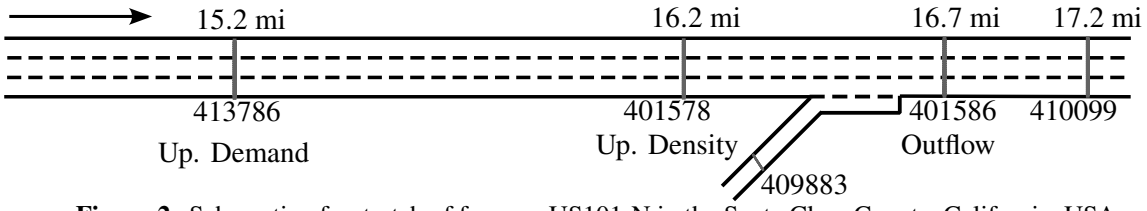


Figure 2: Schematic of a stretch of freeway US101-N in the Santa Clara County, California, USA

Table 1: Calibrated parameters for each case

Model	k_c (veh/km)	k_{jam} (veh/km)	$Q_{\frac{1}{2}}$ (veh/h)	Q_1 (veh/h)	Q_2 (veh/h)	α (km/veh)	α_c (km/veh)	β (-)	β^{max} (-)	n_l (-)
CTM-BL	18.0	94.8	1122	1827	1446	-	-	-	-	3.01
CTM-QU	18.1	76.7	1053	1992	1386	0.05	0.12	0	-	3.63
CTM-RA	18.0	75.8	1064	1981	1386	-	-	0.15	0.2	3.75
CTM-QR	18.2	72.1	1215	1969	1310	3×10^{-4}	0.11	0.13	0.2	3.53

We consider four variations of the CTM: CTM-BL for the baseline CTM without capacity drop extension; CTM-QU for the CTM with the extension of capacity drop triggered by upstream congestion; CTM-RA for the CTM with the extension of capacity drop due to on-ramp flow; and CTM-QR for the CTM with the extension combining both capacity drop effects. For all cases, the time step is $\Delta t = 5$ s and cell size $\Delta x = 300$ m. The upstream detector is located at an area just upstream of the on-ramp.

We assume a piece-wise linear fundamental diagram with five parameters. Two parameters are related to density: the critical density k_c and the jam density k_{jam}. The other three parameters are the flows at $k = \frac{1}{2}k_c$, $k = k_c$, and $k = 2k_c$, which we denote as $Q_{\frac{1}{2}} = Q(\frac{1}{2}k_c)$, $Q_1 = Q(k_c) = C$, i.e., the capacity flow, and $Q_2 = Q(2k_c)$, with $Q_{\frac{1}{2}} \leq Q_1$ and $Q_2 \leq Q_1$.

We apply a multi-objective extension of the Differential Evolution algorithm in order to consider multiple calibration objectives concomitantly (Robič and Filipič, 2005). The considered objectives are the density root-mean-square error and the cumulative flow root-mean-square error in oblique coordinates (Cassidy and Bertini, 1999). Three days were used for calibration and three days were used for validation.

Based on the Pareto set of the two objectives for all different cases (not shown) and a qualitative assessment of the time-series of each combination (see Figure 3 for one sample), we selected the better result for each case across the samples that yield a fair compromise between density and cumulative flow errors. The CTM-BL had the worst performance among all the CTM cases evaluated. This result was expected, as the CTM-BL lacks any underlying mechanism to reproduce the CD. It is followed by the model CTM-QU which leads to a moderate performance increase, but is still worse than the other models. The proposed CTMs that account for on-ramp flows (CTM-QR and CTM-RA) outperform all the CTM cases by a considerable margin. Moreover, the performance of CTM-QR and CTM-RA are almost overlapping. This suggests that the capacity drop because of the ramp effect is driving the results of the CTM-QR. Table 1 presents the resulting parameters for each case.

Figure 3 depicts the density (left), outflow/demands (center), and the cumulative outflow in oblique coordinates (right). Concerning densities, all the models present a density increase earlier than those observed in the field data and, during the congestion release, the decrease in congestion occurs at similar times compared to the field data. Regarding outflows, the CTM-BL yields a constant flow throughout, not being able to reach the observed flow peak between 6AM and 7AM, and not reproducing the CD; the CTM-QU model reaches a peak flow that is similar to the observed data, but it is short-lived and yields a constant flow thereafter; both CTMs with on-ramp effects (CTM-RA and CTM-QR) reach the peak flow observed and present a slowly decreasing flow similar to the field data.

The flow in the field data reached the maximum around 5630 veh/h and then reduced to a minimum of 5220 veh/h, i.e., a 7% capacity drop. This can be observed in the the cumulative outflow curves in oblique coordinates in Figure 3(c), in which straight lines correspond to constant outflows. However, the flow later increases again, after the ramp demand decreases while the bottleneck was still congested, reason why the CTM-RA and CTM-QR models follow better the field data. The CTM-BL and CTM-QU yield a constant outflow that undershoots the outflow in the congestion onset and compensates it during the last hour of congestion. These flow shifts are clearer in the cumulative outflow curves.

5. CONCLUSIONS

A comparison between different approaches of modeling the capacity drop on the first order Cell Transmission Model (CTM) was presented. The models were calibrated and validated against field observed data from a

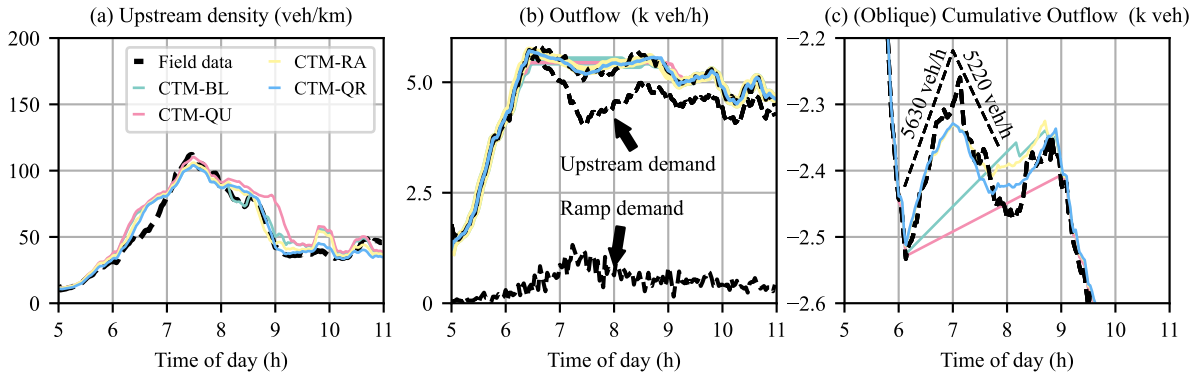


Figure 3: (a) Upstream density; (b) outflow; and (c) cumulative flows for the four different scenarios

freeway merge bottleneck in which the capacity drop phenomenon is consistently observed. The proposed model that incorporates the capacity drop based on on-ramp flows reached the best performance either solo or combined with CD triggered by upstream congestion.

In all, the results suggest that the role of the on-ramp flow in the capacity drop phenomenon at merge bottlenecks is the most important element on the traffic dynamics at merge bottleneck which seems inline with the model by Leclercq *et al.* (2011). These results regarding the effect of on-ramp flows in the throughput are also in line with a study using microscopic models (Souza and Mosslemi, 2022). For future work we are interested in investigating the implications of these findings for freeway traffic flow control, such as ramp metering.

Acknowledgements
This work was supported by the National Council for Scientific & Technol. Devel. (CNPq) under grant 314561/2023-4.

REFERENCES

Cassidy, M. J. and R. L. Bertini (1999) Some traffic features at freeway bottlenecks. *Transp. Res. Part B: Methodological*, v. 33, n. 1, p. 25–42.

Daganzo, C. F. (1994) The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transp. Res. Part B: methodological*, v. 28, n. 4, p. 269–287.

Gazis, D. C. and R. S. Foote (1969) Surveillance and control of tunnel traffic by an on-line digital computer. *Transportation Science*, v. 3, n. 3, p. 255–275.

Han, Y.; Y. Yuan; A. Hegyi and S. P. Hoogendoorn (2016) New extended discrete first-order model to reproduce propagation of jam waves. *Transportation Research Record*, v. 2560, n. 1, p. 108–118.

Kontorinaki, M.; A. Spiliopoulou; C. Roncoli and M. Papageorgiou (2017) First-order traffic flow models incorporating capacity drop: Overview and real-data validation. *Transp. Res. Part B: Methodological*, v. 106, p. 52–75.

Laval, J. A. and C. F. Daganzo (2006) Lane-changing in traffic streams. *Transp. Res. Part B: Methodological*, v. 40, n. 3, p. 251–264.

Leclercq, L.; J. A. Laval and N. Chiabaut (2011) Capacity drops at merges: An endogenous model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 17, p. 12–26.

Papageorgiou, M. (1998) Some remarks on macroscopic traffic flow modelling. *Transp. Res. Part A: Policy and Practice*, v. 32, n. 5, p. 323–329.

Robič, T. and B. Filipič (2005) Differential evolution for multiobjective optimization. *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Springer, p. 520–533.

Souza, F. D. and M. Mosslemi (2022) Unveiling the capacity drop phenomenon through traffic microsimulation: Modeling, calibration, and sensitivity analysis. *IEEE Access*, v. 10, p. 117611–117625.

Felipe Augusto de Souza (fel.asouza@gmail.com)
Energy Systems, Argonne National Laboratory, Lemont, IL 60439 USA
Rodrigo Castelan Carlson (rodrigo.carlson@ufsc.br)
Dept. of Automation and Systems Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, 88040-900, Brazil

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE *CAR-FOLLOWING* DO VISSIM APLICADOS À SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS EM REDES URBANAS

José Elievam Bessa Júnior[1], **Achille Fonzone**[2]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Edinburgh Napier University

RESUMO
O objetivo deste trabalho foi estimar parâmetros de *car-following* do Vissim (Wiedemann 74 e 99, ou W74 e W99) aplicados à simulação de veículos autônomos (AVs) em redes urbanas. Para isso, foram utilizados dados de 42 trajetórias de AVs, denominados *Oxford RobotCar Dataset*, mantidos pela Universidade de Oxford. O método proposto consistiu nas seguintes etapas: tratamento dos dados; estimativas das distâncias e das diferenças de velocidades entre o AV e o veículo líder; estimativa dos parâmetros por trajetória e globais; e comparação com parâmetros *default* do Vissim. Os resultados mostraram que os parâmetros estimados para o modelo W99 são mais adequados do que os parâmetros *default*, pois produziram erros menores em relação ao observado em campo, o que não ocorreu com o caso do modelo W74.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas viários urbanos, cada vez mais, têm necessitado de soluções para problemas que surgem a partir da crescente demanda por transportes, do aumento das emissões veiculares e da piora na segurança viária. Devido a funcionalidades que permitem tomadas de decisão rápidas e controle dos sistemas envolvidos, o surgimento dos veículos autônomos (AVs) promete melhorar o desempenho operacional das vias, embora seja fundamental compreender como esses veículos irão interagir, gradualmente, com veículos e usuários convencionais (Lu *et al*., 2020; Mehrabani *et al*., 2024).

Uma forma de se investigar o impacto da inserção gradual dos AVs em redes viárias é por meio de microssimulação de tráfego (Beza *et al*., 2022). Alguns trabalhos avaliaram essas implicações, principalmente do ponto de vista da segurança viária (Morando *et al*., 2018; Hammami e Borsos, 2024; Oliveira *et al*., 2024). Há trabalhos de revisão da literatura que avaliaram como AVs podem contribuir para a melhoria da operação dos sistemas viários. Tafidis e Pirdavani (2023), por exemplo, focaram em pesquisas que, por meio de simulação de tráfego, analisaram medidas *proxy* de segurança viária considerando a presença de AVs. Para além das questões de segurança viária, os autores identificaram que o processo de calibração e validação dos simuladores de tráfego precisa melhorar, uma vez que há poucas bases de dados disponíveis para modelar os AVs de forma eficiente, o que também foi apontado no trabalho de revisão da literatura de Tadifis *et al*. (2021). Dessa forma, a calibração e a validação dos submodelos comportamentais para modelagem de AVs surgem como um desafio (Beza *et al*., 2022), principalmente pela falta de acesso a uma extensa base de dados. O uso de trajetórias veiculares (Chaudhari *et al*., 2022) pode ser um caminho para estimar parâmetros de *car-following* aplicados a simulações de tráfego, principalmente se forem do tipo aberto, o que ajuda a fomentar a discussão.

O Vissim (PTV, 2025) é capaz de reproduzir AVs, ou por meio de modelos comportamentais tradicionais calibrados e validados para esse tipo de veículo, ou através de submodelos específicos para reproduzir AVs, como o *Adaptive Cruise Control* (ACC), também voltado para o comportamento de *car-following*. Beza *et al*. (2022) traz uma ampla revisão da literatura sobre a estimativa desses parâmetros do Vissim (modelo Wiedemann 99, principalmente) para simulação de AVs. As principais conclusões dos autores foram: i) os tipos de rodovias afetam a estimativa dos parâmetros; ii) a maior parte dos estudos envolve rodovias e interseções (1/5 dos trabalhos são aplicados em segmentos ou redes urbanas); e iii) a grande parte dos parâmetros calibrados é muito próxima dos valores *default* do Vissim, o que indica que podem ser distintos em alguns outros contextos.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi propor um método para, a partir de dados abertos de trajetórias veiculares, estimar parâmetros comportamentais de *car-following* do Vissim (Wiedemann 74 e 99) voltados para a simulação de AVs em redes urbanas. Mas detalhes desse método podem ser vistos na próxima seção.

2. MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para atingir o objetivo geral desta pesquisa é composto pelas etapas de: i) tratamento de dados de trajetórias veiculares; ii) estimativa das distâncias e das diferenças de velocidades entre o veículo seguidor (AV) e um veículo líder; iii) estimativa dos parâmetros de *car-following* por trajetória veicular; i) estimativa dos parâmetros globais (voltados para o conjunto de trajetórias analisadas); e v) comparação dos parâmetros estimados em relação aos parâmetros *default* do Vissim. Durante a aplicação do método proposto,

é indicado realizar uma análise intermediária (filtragem) em busca de comportamentos veiculares não esperados (que podem ter sido provocados, por exemplo, pela presença de pedestres).



Figura 1: Método proposto

Os dados de tráfego de trajetórias de AVs utilizados nesta pesquisa são oriundos da iniciativa *Oxford RobotCar Dataset*, da Universidade de Oxford (Maddern *et al*., 2016; Maddern *et al*., 2020). Os dados foram coletados entre maio de 2014 e dezembro de 2015 e correspondem a mais de 1000 km de trajetórias veiculares registradas por um Nissan LEAF equipado com sensores *Lidar* e com GPS, além de seis câmeras. Esses equipamentos, como o Lidar, são ideais para avaliar o que ocorre em trajetórias veiculares, como a obtenção da distância (d) e da diferença de velocidade (Δv) entre os veículos seguidor e líder, conforme visto em outros trabalhos (Sun *et al*., 2018; Zhang e Jan, 2022). Das 72 trajetórias com dados disponibilizados para download, 42 foram selecionadas por terem percorrido a rede viária completa e sem comportamentos inesperados aparentes.

A primeira etapa do método proposto, portanto, consiste no tratamento dos dados oriundos do Lidar (localizado no para-choque dianteiro do AV) e do GPS. Os veículos líderes foram detectados através dos pontos gerados pelo Lidar no AV (que registra dados em 360º) agrupados em torno de um ângulo frontal de 10º. Como a frequência das informações é alta (~10 Hz), foi necessário aplicar um método de suavização dos dados de d e Δv obtidos, o de Savitzky–Golay (Wang *et al*., 2025), com janela de suavização igual a 15. Foram desconsiderados dados com $d > 50$ m, velocidades do AV > 30 km/h (limite legal na região), além dos dados no entorno de interseções (± 25 metros), o que gerou subtrajetórias (acima de 100 m) dentro das trajetórias.

A etapa seguinte do método, após obter o conjunto de dados consolidados de d e Δv para cada uma das 42 trajetórias, é a estimativa dos parâmetros de *car-following* de Wiedemann do Vissim, de 74 e de 99 (ou W74 e W99). Na Tabela 1, é possível observar os valores *default* dos parâmetros, assim como suas definições e técnicas de predição utilizadas em cada trajetória veicular; para o W99, foram testados os três conjuntos de parâmetros padrão do Vissim – cauteloso, normal e agressivo – por não se saber quais são mais adequados no contexto dos dados abertos analisados. O parâmetro CC9 não foi calibrado, uma vez que é voltado para velocidades acima de 80 km/h (que não foram observadas em campo). Os modelos de Wiedemann do Vissim dependem da relação entre d e Δv entre os veículos seguidor e líder. A combinação entre d e Δv define os estados em que se encontra o veículo seguidor: livre, *following*, aproximação e frenagem. Os parâmetros foram obtidos em regimes específicos: ax e CC0: frenagem; CC3: aproximação; CC1-CC2, CC4-CC7 e bx_{add} e bx_{mult}: *following*; CC8: início do movimento. Mais detalhes podem ser vistos em PTV (2025).

Obtidos os parâmetros de *car-following* para cada trajetória, deve-se encontrar um conjunto de parâmetros que seja representativo das 42 trajetórias. Como o número de trajetórias é baixo, optou-se por uma abordagem com validação cruzada dividindo o conjunto de dados em 3 partes (3-*fold validation*): i) treino: conjunto A; calibração: conjunto B; validação: conjunto C; ii) treino: B; calibração: C; validação: A; iii) treino: C; calibração: A; validação: B. Para estimativa dos parâmetros, foi usada uma otimização Bayesiana com treino (*prior*) empírico. A proposta é que $P(\Theta/D)$ – a distribuição *a posteriori* dos parâmetros Θ dados os dados observados D – é estimada a partir de $P(D/\Theta)$ – a verossimilhança dos dados observados D dado um conjunto específico de parâmetros Θ – e $P(\Theta)$ – que é a distribuição *a priori* dos parâmetros Θ. Nesta pesquisa, foi utilizado um Algoritmo Genético (AG) para minimizar a Equação 1 de *Total Cost* (correspondente a maximizar $P(\Theta/D)$):

$$Total\ Cost = RMSE_d + Penalidade, \quad (1)$$

$$Penalidade = -\sum_{k=1}^{K} log\left(KDE(\theta_k)\right), \quad (2)$$

em que: *Penalidade* ~ $P(\Theta)$; *KDE* = *Kernel Density Estimation*; k = parâmetro; *RMSE* ~ $P(D/\Theta)$, sendo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(d_{sim} - d_{obs})^2}, \quad (3)$$

em que: *RMSE* = raiz do erro quadrático médio das distâncias entre os veículos; n = número de registros na subtrajetória i; N = total de subtrajetórias em cada trajetória j; *sim* = simulado; *obs* = observado. Na aplicação do AG, foi utilizado um método de seleção por elitismo, com taxa de *crossover* de 80% e taxa de mutação de 30%, com 40% de parâmetros mutados em cada indivíduo (solução). A população foi de 20 indivíduos e o critério de parada é igual ao número máximo de 100 gerações. O AG desconsiderou pontos de regime *livre*, uma vez que os veículos tendem a não ajustar as distâncias e o comportamento, portanto, é difícil de prever.

Tabela 1: Parâmetros de calibração

Parâmetro	Valor *default*	Definição	Técnica de predição
ax (m)*	2,0	Distância média entre dois veículos parados	Mediana de *d* quando a velocidade do veículo mais lento entre seguidor e líder (v_{slower}) < 1,5 m/s e *d* < 15º percentil de *d*
bx_{add} (m)*	2,0	Parte adicional usada no cálculo da distância de segurança desejada	Intercepto da regressão *d* – ax *vs*. raiz(v_{slower}) no regime *following* com v_{slower} > 1,5 m/s
bx_{mult}*	3,0	Parte multiplicativa usada no cálculo da distância de segurança desejada	Coeficiente angular da regressão do parâmetro ax (anterior) dividido por 0,5
CC0 (m)**	1,5^c; 1,5^n; 1,0^a	Distância média entre dois veículos parados	Mediana de *d* quando a velocidade do veículo mais lento entre seguidor e líder (v_{slower}) < 1,5 m/s e *d* < 15º percentil de *d*
CC1 (s)**	1,5^c; 0,9^n; 0,6^a	Parte multiplicativa da distância de segurança desejada	Coeficiente angular da regressão *d* – CC0 *vs*. v_{slower} no regime *following* com v_{slower} > 1,5 m/s
CC2 (m)**	0,0^c; 0,0^n; 0,0^a	Distância adicional máxima, além da distância de segurança desejada, aceita por um motorista ao seguir outro veículo antes de se aproximar	85º percentil de *d* – (CC0 + CC1 * v_{slower}), em módulo
CC3 (s)**	-10,0^c; -8,0^n; -6,0^a	Tempo antes de atingir a distância máxima de segurança em relação a um veículo mais lento à frente, no início do processo de desaceleração (usa negativo no Vissim)	Mediana de (SDX_v – SDX_0) / (Δv – CC4), sendo SDX_v = SDX_0 – CC3*(Δv – CC4); SDX_0 = SDX_c + CC2; SDX_c = CC0 + CC1*v_{slower}
CC4 (m/s)**	-0,10^c; -0,1^n; -0,1^a	Limite inferior para a velocidade relativa em relação a um veículo mais lento à frente durante o processo de *following*	15º percentil de Δv em regime de *following*
CC5 (m/s)**	0,10^c; 0,1^n; 0,1^a	Limite superior para a velocidade relativa em relação a um veículo mais lento à frente durante o processo de *following*	85º percentil de Δv em regime de *following*
CC6**	0,0^c; 0,0^n; 0,0^a	Impacto da distância nos limites da velocidade relativa durante o processo de *following*	85º percentil de $\Delta v/d^2$
CC7 (m/s^2)**	0,1^c; 0,1^n; 0,1^a	Oscilação da aceleração no regime *following*	Desvio padrão da aceleração em regime de *following*
CC8 (m/s^2)**	3,0^c; 3,5^n; 4,0^a	Aceleração quando saindo da parada	Mediana da aceleração quando $v_{seguidor}$ > 1,5 m/s no instante atual e $v_{seguidor}$ < 1,5 m/s no instante anterior

Níveis de agressividade: *c* (cauteloso); *n* (normal); *a* (agressivo); Modelos de *car-following*: *W74; **W99

Na aplicação do AG, as trajetórias são reconstruídas gerando, assim, *d* e Δv simulados. Em ambos os modelos, as trajetórias preditas iniciam com *d* e Δv iguais aos do campo. No caso do W74, a cada intervalo de tempo *t*: a) calcula-se o intervalo Δt (atual menos o anterior); b) estima-se a velocidade (campo): $v_{slower} = v_{líder}$ *if* ($\Delta v > 0$ *and* aceleração do líder ≥ -1,0 m/s^2) *else* $v_{líder}$; c) calcula-se *d* = ax + (bx_{add} + bx_{mult} * z) * raiz(v_{slower}), com z = 0,5. O modelo W99, por outro lado, é dinâmico, sendo necessário determinar os regimes e obter a aceleração do seguidor por meio de um pseudocódigo (Figura 2) baseado em Rodrigues *et al*. (2022). Após determinar a aceleração a(t+1) por meio do pseudocódigo, *d* e Δv são obtidos pelos seguintes passos finais:

- a[t+1] = min(max(a[t+1], −CC7), CC8 + Δt*CC9);
- v[t+1]: if regime = "frenagem": max(0, v[t] + a[t+1] × Δt); else: max(2,0, v[t] + a[t+1] × Δt); x[t+1]: max(CC0 + CC1 * v_{slower}, d + ($v_{líder}$ - $v_{seguidor}$[t]) × Δt);
- d[t+1] = $x_{líder}$[t+1] - $x_{seguidor}$[t+1]; sendo x = posição, CC9 = valor *default* do Vissim (PTV, 2025).

```
If regime = "frenagem":
   If v(t) > 0 and Δv(t) > 0:
      If d(t) > CC0:
         a(t+1) = min{ a_líder(t) + Δv(t)² / (CC0 - d(t)), a(t) }
      Else:                    # too close, emergency adjustment
         a(t+1) = min{ a_líder(t) - 0,5 * (Δv(t) + (CC4-CC6*(d²))), a(t) }

         If a(t+1) < -CC7:
            a(t+1) = -CC7
         Else:
            a(t+1) = max{ a(t+1), -10 + 0,5 * raiz(v(t)) }
   Else:
      a(t+1) = 0

If regime = "aproximação":
   a(t+1) = max{ Δv(t)² / (2 * (SDXc - d(t) – 0,1)), -10 }
(...)
```

```
(...)
If regime = "following":
   If a(t) <= 0:
      a(t+1) = min{ a(t), -CC7 }
   Else:
      a(t+1) = max{ a(t), CC7 }

If regime = "livre":
   If v(t) > v_desejada:
      a(t+1) = CC7
   Else:
      a_max = CC8 + Δt * CC9 * min{ v(t), v_desejada }

      If d(t) < SDX0:
         a(t+1) = min{ Δv(t)² / (SDX0 - d(t)), a_max }
      Else:
         a(t+1) = a_max
```

Figura 2: Pseudocódigo para obter regimes e aceleração do seguidor a cada intervalo *t* (Rodrigues *et al*., 2022)

Após a estimativa dos parâmetros globais, oriundos da melhor solução encontrada pelo AG, foi realizada uma análise dos locais com erros considerados altos, com RMSE > 10 (apenas uma vez). Após filtrar esses locais da base de dados, as etapas de tratamento dos dados, estimativas dos parâmetros por trajetória e globais foram realizadas novamente. Por fim, os parâmetros de *car-following* obtidos (W74 e W99) foram comparados com os resultados obtidos a partir dos parâmetros *default* do Vissim, como pode ser visto na próxima seção.

3. RESULTADOS

Ao final da aplicação do AG em cada um dos conjuntos de dados (A, B e C), foram obtidos os melhores parâmetros em cada uma dessas divisões (*folds*). Sendo assim, para a etapa de validação, foram utilizadas as médias dos parâmetros, conforme indicado na Tabela 2. No caso dos parâmetros do modelo W74, os resultados do RMSE foram muito próximos (às vezes, piores) em relação aos obtidos com os parâmetros *default* (com parâmetros próximos), o que mostra que o modelo possui pouca margem de melhoria para reproduzir o comportamento de um AV. Uma das razões é que o modelo é estático, obtendo-se a distância *d* diretamente em função de *v* (do campo). O modelo W99 é dinâmico, conforme supracitado, e envolve mais parâmetros; portanto, a estimativa dos parâmetros é mais desafiadora. A Figura 3 ilustra a redução dos valores de RMSE, com uma boa melhoria para o modelo W99 em relação ao uso dos parâmetros *default*, próxima de 65%, em média.

Tabela 2: Parâmetros de calibração estimados

Divisão	CC0	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	ax	bx$_{add}$	bx$_{mult}$
1	2,50	1,74	2,46	-15,01	-1,48	2,94	0,03	0,20	0,31	1,92	3,80	1,97
2	2,17	1,81	2,63	-14,89	-1,45	2,87	0,03	0,17	0,28	1,90	3,83	1,98
3	2,12	1,91	2,66	-15,04	-1,44	2,83	0,03	0,17	0,26	2,09	3,94	1,97
Média	**2,26**	**1,82**	**2,58**	**-14,98**	**-1,46**	**2,88**	**0,03**	**0,18**	**0,28**	**1,97**	**3,85**	**1,97**

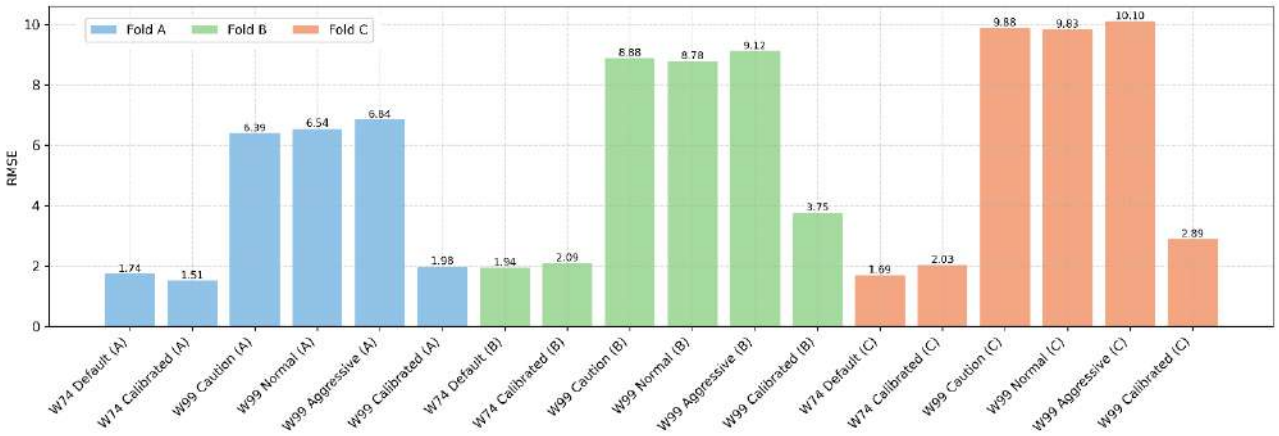


Figura 3: Valores do RMSE obtidos com os parâmetros estimados e *default*, para cada divisão de trajetórias (3 *folds*)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho foi estimar os parâmetros de *car-following* do Vissim (modelos Wiedemann de 74 e de 99) voltados para modelagem de veículos autônomos. Para isso, foi utilizada uma base de dados de AVs aberta denominada *Oxford RobotCar Dataset*, o que representa uma valiosa fonte aberta que ajuda na previsão desse tipo de veículo em ambiente de simulação. Os resultados da estimativa indicaram um comportamento similar aos parâmetros *default* do Vissim com o modelo de 74, mas uma redução de cerca de 75% no erro (RMSE) em relação ao campo quando usado o modelo de 99, se comparados com os parâmetros *default*.

Os parâmetros calibrados sugerem AVs bastante cautelosos, o que é reflexo dos dados utilizados. Esse resultado parece fazer sentido, uma vez que ainda há um certo grau de incerteza quanto à circulação desses veículos nas redes atuais, sobretudo compartilhando os espaços com os veículos convencionais. Os AVs, hoje, tendem a manter acelerações mais baixas e distâncias mais altas, além de usarem um tempo maior de aproximação para os veículos líderes, buscando maximizar conforto e segurança aos usuários. Dessa maneira, as principais recomendações, para trabalhos futuros, são: i) utilizar outras bases de dados de AVs abertas, sobretudo mais recentes e, talvez, no contexto brasileiro e não urbano, pois a amostra de trajetórias (42) utilizada foi reduzida; ii) testar um número de *folds* maior; iii) aplicar a metodologia proposta para estimar outros parâmetros de *car-following* (modelo ACC) e de mudança de faixas do Vissim, assim como modelos de outros simuladores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq (processos 409087/2023-8, 443810/2023-0 e 312498/2025-0) e à FAPEMIG (processo APQ-03308-24) pelo suporte. Também agradecem à iniciativa *Oxford RobotCar Dataset* pelos dados.

REFERÊNCIAS

Beza, A. D.; M. M. Zefreh; A. Torok e A. A. Mekonnen (2022) How PTV Vissim Has Been Calibrated for the Simulation of Automated Vehicles in Literature? *Advances in Civil Engineering*, v. 2022, ID: 2548175, p. 1-18.

Chaudhari, A.; K. Srinivasan; B. R. Chilukuri; M. Treiber e O. Okhrin (2022) Calibrating Wiedemann-99 Model Parameters to Trajectory Data of Mixed Vehicular Traffic. *Transportation Research Record*, v. 2676, n. 1, p. 718-735.

Hammami, A. e A. Borsos (2024) Safety of cyclists interacting with autonomous vehicles: A combined microscopic simulation and SSAM analysis. *Travel Behaviour and Society*, v. 36, p. 100805.

Lu, Q..; T. Tettamanti; D. Hörcher e I. Varga (2020) The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation letters*, v. 12, n. 8, p. 540-549.

Maddern, W.; G. Pascoe; C. Linegar e P. Newman (2016) 1 Year, 1000km: The Oxford RobotCar Dataset, *The International Journal of Robotics Research* (IJRR).

Maddern, W.; G. Pascoe; M. Gadd; D. Barnes; B. Yeomans e P. Newman (2020) *Real-time Kinematic Ground Truth for the Oxford RobotCar Dataset*, acesso em: arXiv preprint arXiv: 2002.1015.

Mehrabani, B. B.; L. Sgambi; A. Pel; S. Calvert e M. Snelder (2024) Impact of connected and autonomous vehicles on road network resilience in Belgium. *Transportmetrica A: Transport Science*, p. 1-24.

Morando, M.; Q. Tian; L. Truong e H. L. Vu (2018) Studying the Safety Impact of Autonomous Vehicles Using Simulation-Based Surrogate Safety Measures. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2018, p. 1-11.

Oliveira, G. M.; J. N. A. Pereira e F. J. C. Cunto (2024) Representação longitudinal de veículos autônomos e conectados na microssimulação com foco na segurança viária. *Anais do 38º* ANPET, v. 1. p. 1-5.

PTV (2025) *PTV Vissim 2025 and PTV Viswalk 2025 Help*: defining driving behavior in a driving behavior parameter set. Disponível em: <https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISSIM_2025_ENG/Content/4_BasisdatenSim/Fahrverhaltensparameter_def.htm> Acesso em: 11/07/2025.

Rodrigues, R.; A. B. Silva; L. Vasconcelos e A. Seco (2022) The Longitudinal Driving Behavior of a Vehicle Assisted with Lv2 Driving Automation: An Empirical Study. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2022, p. 1-17.

Sun, Y; H. Xu; J. Wu; J. Zheng e K. M. Dietrich (2018) 3-D Data Processing to Extract Vehicle Trajectories from Roadside LiDAR Data. *Transportation Research Record*, v. 2672, n. 45, p. 14-22.

Tafidis, P. e A. Pirdavani (2023) Application of surrogate safety measures in higher levels of automated vehicles simulation studies: A review of the state of the practice. *Traffic Injury Prevention*, v. 24, n. 3, p. 279-286.

Wang, Z.; X. Cheng; X. Yao; Z. Zhou; H. Zhang e H. Chang (2025) Vehicle tracking trajectory optimization algorithm based on bidirectional long short-term memory with Savitzky–Golay in a vehicle-road cooperative environment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, p. 1-23.

Zhang, T. e P. J. Jin (2022) Roadside LiDAR Vehicle Detection and Tracking Using Range and Intensity Background Subtraction. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2022, ID: 2771085, p. 1-14.

José Elievam Bessa Júnior (elievamjr@gmail.com ou elievam@etg.ufmg.br)
Achille Fonzone (A.Fonzone@napier.ac.uk)

IMPACTO DA CONFIGURAÇÃO 2+1 EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES SOB CONDIÇÕES DE TRÁFEGO BRASILEIRAS

Thais Berger Barbosa da Silva, José Elievam Bessa Júnior
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
A configuração 2+1 oferece uma solução intermediária entre rodovias de pista simples, que podem conter faixas adicionais de ultrapassagem, e rodovias com múltiplas faixas. No entanto, o uso do projeto 2+1 no Brasil ainda é limitado. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos dessa configuração nas condições brasileiras. Dados de campo foram coletados para validar um simulador de tráfego previamente calibrado para estradas locais de pista simples com faixas de ultrapassagem. Em seguida, foram realizadas simulações de tráfego para diversos cenários hipotéticos. Com base nos resultados dessas simulações, a 7ª edição do *Highway Capacity Manual* (HCM-7) foi ajustada para refletir o comportamento de tráfego observado no país. Os resultados indicaram que a introdução de rodovias 2+1 no Brasil pode resultar em uma redução de 20% a 41% na formação de pelotões e em um aumento de 4% a 18% na velocidade média de viagem.

1. INTRODUÇÃO

O projeto de rodovia 2+1 consiste em uma configuração contínua de três faixas, na qual a faixa central alterna sua direção em intervalos regulares (TRB, 2022). Essa disposição permite que os motoristas trafeguem em trechos com uma ou duas faixas, dependendo de sua posição na rodovia. Assim, os veículos mais rápidos podem utilizar a faixa central para ultrapassar veículos mais lentos, que permanecem na faixa externa. Segundo a AASHTO (2018), as rodovias 2+1 são adequadas para regiões onde os volumes de tráfego não justificam a construção de uma rodovia em pista dupla. No entanto, em alguns casos, a pista simples pode não operar de maneira satisfatória, mesmo com faixas adicionais de ultrapassagem. Dessa forma, a geometria 2+1 pode representar uma solução intermediária entre a pista simples e a dupla; além disso, pode ser uma alternativa vantajosa em locais com condições ambientais restritas, uma vez que exige menos espaço para sua implantação.

Pesquisas recentes sobre rodovias 2+1 mostram que as características do projeto variam entre as regiões, influenciadas por fatores como relevo, clima e comportamento dos motoristas. Diversos países realizaram avaliações técnicas para verificar a viabilidade dessas rodovias nos últimos anos; no entanto, ainda não há uma abordagem unificada para avaliar seu desempenho operacional (Romana *et al.*, 2018). Apesar disso, a 7ª edição do *Highway Capacity Manual* (HCM-7) (TRB, 2022) introduziu um método para determinar o nível de serviço nesses locais. A densidade de veículos em pelotões (*Follower Density* – FD) é a medida de desempenho utilizada e está relacionada à velocidade de fluxo livre (*Free-Flow Speed* – FFS), à velocidade média de viagem (*Average Travel Speed* – ATS) e à porcentagem de veículos em pelotões (*Percentage of Followers* – PF). Contudo, pesquisas recentes (Bessa Jr. *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2022; Oliveira e Bessa Jr., 2022) mostram que o uso do HCM sem calibração prévia para o Brasil produz resultados inconsistentes com os dados de campo, frequentemente subestimando o nível de serviço.

Pesquisas sobre a operação de rodovias 2+1 estão documentadas na literatura. Por exemplo, o estudo de Jafari *et al.* (2021) buscou identificar o comprimento ideal para faixas de ultrapassagem utilizando um simulador de tráfego, considerando diferentes condições de fluxo de tráfego, de porcentagem de veículos pesados (%HV) e de FFS. O comprimento ótimo foi determinado por meio de um modelo projetado para calcular a redução da PF. Constatou-se que a PF foi reduzida entre 35% e 65% e que a velocidade aumentou entre 5% e 10% ao empregar a configuração 2+1, em comparação com rodovias convencionais de pista simples. Estudos similares também foram identificados (Bergh *et al.*, 2016; Lee e Jim, 2019; Calvi *et al.*, 2023), todos utilizando simulação para avaliar as condições operacionais. Embora os estudos indiquem que o projeto de rodovia 2+1 é eficaz do ponto de vista operacional, ainda existem lacunas na literatura quanto à sua aplicação no Brasil. Assim, este artigo teve como foco avaliar os efeitos dessa configuração sob condições encontradas no país.

2. MÉTODO

2.1. Calibração e validação do modelo de simulação

Para calibrar os parâmetros comportamentais no contexto brasileiro, foi necessário utilizar dados de campo coletados em um trecho rodoviário com configuração semelhante ao arranjo 2+1, uma vez que a configuração

geométrica clássica, comumente encontrada na Europa, não foi identificada no Brasil. Assim, realizou-se uma análise exploratória com o objetivo de localizar um segmento de rodovia brasileira de pista simples com faixas de ultrapassagem alternadas que mantivesse três faixas na maior parte de sua extensão, desconsiderando as zonas de transição. Um trecho que atendia a esses critérios foi identificado na BR-040, uma rodovia federal que conecta Brasília (DF) ao Rio de Janeiro (RJ), com aproximadamente 10 quilômetros de extensão. O segmento encontra-se no município de João Pinheiro (MG) entre os quilômetros 173 e 183 da BR-040.

Uma vez definido o trecho de estudo, foram coletados dados de campo para determinar as velocidades operacionais e os *headways*. Esse processo consistiu na instalação de câmeras em pontos estratégicos ao longo da rodovia, em 28 de março de 2024, com o objetivo de registrar as categorias veiculares durante um período contínuo de cinco horas, das 12h às 17h. A definição da data da coleta foi fundamentada na análise do histórico de tráfego da região, visando identificar o dia e o horário de maior fluxo veicular, o que coincidiu com a quinta-feira santa. Além disso, dados geométricos foram obtidos com o uso de um dispositivo GPS, e as informações sobre sinalização horizontal foram extraídas por meio de imagens de satélite. Com os dados de campo adquiridos, modelou-se o segmento da rodovia no Aimsun Next, subdividindo-o em dez trechos com base em características geométricas e de tráfego similares.

Neste estudo, a velocidade desejada para o simulador, que varia entre automóveis e caminhões, foi definida como equivalente à velocidade de fluxo livre (*Free-Flow Speed* – FFS). Um *headway* crítico de 10 segundos foi estabelecido para caracterizar as condições de fluxo livre, assegurando que os veículos estivessem fora dos pelotões, conforme determinado pelo HCM-7 (TRB, 2022), que adota como referência o valor de 2,5 segundos. Esse critério está alinhado com outras pesquisas, como a de Boora *et al.* (2017), que sugerem calcular a FFS para *headways* superiores a 10 segundos. Assim, os resultados indicaram velocidades desejadas de 94 km/h para veículos de passeio e 61 km/h para caminhões.

Os parâmetros de calibração utilizados no Aimsun Next para essa modelagem foram derivados das metodologias propostas por Bicalho e Bessa Jr. (2025) e por Oliveira e Bessa Jr. (2022), ambos responsáveis por adaptações do HCM-7 para rodovias de pista simples com e sem faixas de ultrapassagem, respectivamente, no contexto brasileiro. Conforme observado em estudos anteriores sobre a configuração 2+1 (Jafari *et al.*, 2021; Washburn *et al.*, 2018), a calibração dos simuladores foi realizada a partir de dados coletados em rodovias de pista simples com faixas adicionais. Os autores justificaram essa escolha pelo fato de não disporem de segmentos com configuração 2+1 adequados para a calibração. Situação semelhante ocorre neste estudo, uma vez que não foram identificados trechos com essa configuração no Brasil. Com todas as condições de entrada definidas, foram simulados cenários considerando as demandas de tráfego para cada intervalo de 15 minutos durante o período de 5 horas de coleta, resultando em 20 cenários distintos. Os resultados foram obtidos por meio de detectores posicionados em cada faixa, conforme ilustrado na Figura 1.

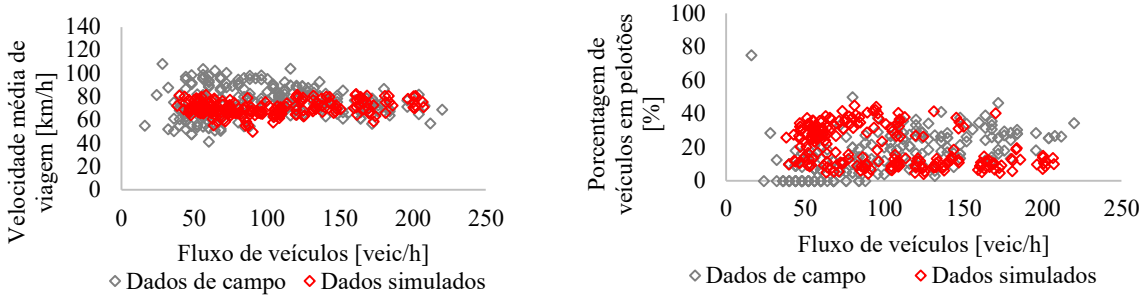


Figura 1: Medidas de desempenho de campo e simuladas: (a) ATS; e (b) PF

As medidas de desempenho obtidas por meio das simulações foram comparadas aos dados de campo utilizando funções de ajustamento. Foram calculados o Erro Absoluto Médio Normalizado (MANE) e o Erro Quadrático Médio Normalizado (RMSNE). Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Função de ajuste por medida de desempenho

Medida de desempenho	**Função de ajustamento**	
	MANE	**RMSNE**
PF	49,1%	0,908
ATS	11,7%	0,142

Essa análise demonstra que o modelo apresenta boa relação com os dados de campo, especialmente no que se refere à ATS, que resultou em um MANE de 11,7% e um RMSNE de 0,142, indicando uma boa representação dos dados observados em campo. Os resultados para a PF também foram satisfatórios, com um MANE de 49,1% e um RMSNE de 0,908. Embora os erros tenham sido maiores para a variável PF, é importante destacar que essa métrica é mais difícil de prever devido à sua alta variabilidade (Bessa Jr. *et al.*, 2017), especialmente em volumes de tráfego reduzidos, como observado no segmento analisado.

2.2. Simulação de cenários

Nessa etapa, os segmentos hipotéticos foram simulados com base nas características descritas no *Final Report for NCHRP Project 17-65* (Tabela 2), utilizando o Aimsun Next calibrado. As características geométricas das rodovias 2+1 simuladas incluíram um segmento de avaliação com extensão entre 16 e 18 milhas e dois trechos de aquecimento conectados em ambas as extremidades. O comprimento dos trechos de aquecimento foi definido em 18 milhas para volumes de tráfego de 300 e 600 veic/h, e em 12 milhas para volumes de 900 e 1200 veic/h. O segmento de aquecimento possuía 50% de zonas de proibição de ultrapassagem. Foram simuladas quatro diferentes demandas na direção de análise, considerando uma distribuição direcional de 55%/45%. As zonas de transição foram simuladas com comprimento de 1.000 pés, uma dimensão comumente adotada em rodovias 2+1 europeias (Romana *et al.*, 2018).

Tabela 2: Variáveis utilizadas nas simulações (Washburn *et al.*, 2018)

Variável	Valores
Fluxo de tráfego na direção da análise (veic/h)	300; 600; 900; 1200
Fluxo de tráfego na direção oposta (veic/h)	246; 491; 737; 982
Velocidade de fluxo livre (FFS) (km/h)	64; 80; 96
Comprimentos das faixas de ultrapassagem (km)	1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 2,8; 3,2
Número de faixas de ultrapassagem em cada direção	4; 5; 6; 7; 9
Percentual de veículos pesados (PHV) (%)	0; 10; 20; 30
Número de replicações por arquivo	6
Tipo de geometrias simuladas	Base (pista simples); rodovia 2+1
Número total de cenários simulados	4 × 3 × 6 × 5 × 4 × 6 × 2 = 17.280

Para obter o modelo calibrado do HCM, os cenários base foram simulados sem faixas de ultrapassagem. O comprimento do cenário base foi definido de modo a corresponder ao segmento de avaliação de cada configuração 2+1, com trechos de aquecimento variando conforme as condições de tráfego e 50% de zonas de proibição de ultrapassagem. Três medidas de desempenho foram avaliadas: ATS, PF e FD.

3. ADAPTAÇÃO DO HCM-7 PARA AS CONDIÇÕES BRASILEIRAS

No HCM-7 (TRB, 2022), o método para obtenção da densidade de veículos em pelotões (*Follower Density* – FD) envolve o cálculo das medidas de desempenho que a compõem: a velocidade média de viagem (*Average Travel Speed* – ATS) e a porcentagem de veículos em pelotões (*Percent Followers* – PF). Para a análise de segmentos com faixas de ultrapassagem e rodovias 2+1, um componente adicional do método busca estimar o impacto dessa configuração em comparação a um segmento convencional de rodovia de pista simples sem faixas de ultrapassagem. Esses impactos são denominados $\%Improve_{PF,2+1}$ – porcentagem de melhoria na PF – e $\%Improve_{ATS,2+1}$ – porcentagem de melhoria na ATS. Os modelos originais para estimar essas variáveis podem ser encontrados nas Equações 15-A2 e 15-A3 do HCM-7 (TRB, 2022).

Com os resultados das simulações detalhadas anteriormente, inicialmente foi realizado um modelo de regressão linear múltipla sem descartar nenhum dos dados gerados. Em seguida, utilizando o critério de Distância de Cook, foram identificados, como *outliers*, cerca de 5% dos valores do conjunto de dados de cada modelo. Os resultados da regressão indicaram valor-p < 0,0001 para todas as variáveis independentes no modelo $\%Improve_{ATS,2+1}$ e valor-p < 0,001 para todas as variáveis no modelo $\%Improve_{PF,2+1}$, confirmando que todos eram estatisticamente significativos. O teste VIF (*Variance Inflation Factor*) avaliou a multicolinearidade entre as variáveis explicativas. Todos os resultados ficaram próximos de 1 para ambos os modelos, indicando que eles são estáveis do ponto de vista da colinearidade.

Posteriormente, a independência dos resíduos foi avaliada por meio do teste de Durbin–Watson (DW), cujo valor obtido foi 0,119, indicando forte autocorrelação positiva nos resíduos. Essa característica pode estar associada não apenas a fatores de modelagem, mas também à própria natureza das variáveis analisadas. Neste trabalho, a velocidade de fluxo livre, o fluxo de veículos e o percentual de veículos pesados estão relacionados, de modo que alterações em uma variável tendem a refletir em outra.

A homocedasticidade dos resíduos foi avaliada por meio dos testes de Breusch–Pagan e White. Em todos os casos, os valores-p obtidos foram inferiores a 0,05 ($p < 0{,}001$), indicando rejeição da hipótese nula de variância constante dos erros. Esses resultados fornecem evidência estatisticamente significativa de heterocedasticidade no modelo, ou seja, a variância dos resíduos não se mantém constante ao longo do intervalo de valores preditos. Também foi avaliada a normalidade dos resíduos por meio dos testes Shapiro–Wilk e Lilliefors. Em todos os casos, os valores-p são inferiores ao nível de significância de 5%, levando à rejeição da hipótese nula de que os resíduos seguem distribuição normal. Esses resultados indicam que a distribuição dos resíduos apresenta desvios significativos em relação à normalidade teórica.

Após realizado o diagnóstico do modelo base, contatou-se um comportamento dos resíduos que viola as hipóteses de linearidade, independência, homoscedasticidade e normalidade. Assim, com o objetivo de avaliar alternativas, foram ajustados três novos modelos: OLS com erros-padrão robustos HC3, Box–Cox ($\lambda = 1{,}399$) + OLS e GLS com estrutura AR(1). Utilizando o Critério de Informação de Akaike (AIC) e Critério de Informação Bayesiano (BIC), o modelo GLS AR(1) foi considerado como a alternativa mais adequada, uma vez que possui melhor capacidade explicativa evidenciada pelos menos valores de AIC e BIC. Após a realização das análises estatísticas apropriadas, os modelos foram ajustados para as condições brasileiras, conforme Equações (1) e (2).

$$\%Improve_{PF,2+1} = 76{,}34 - 8{,}40 \times \ln(Fluxo) + 0{,}12 \times FFS + 0{,}19 \times HV\% + 2{,}38 \times \ln[\max(0{,}3; Extensão)] \quad (1)$$

$$\%Improve_{ATS,2+1} = \max(0; -7{,}33 + 3{,}94 \times \ln(Fluxo) - 0{,}33 \times \max[0; \min(FFS; 70) - 30] - -0{,}04 \times \max[0; 30 - HV\%] + 0{,}52 \times \ln[\max(0.3; Extensão)]) \quad (2)$$

Nas equações apresentadas, o fluxo corresponde à direção em análise, expresso em veículos por hora; a velocidade de fluxo livre é indicada em milhas por hora; o percentual de veículos pesados é dado em porcentagem; e a extensão da faixa de ultrapassagem é expressa em milhas.

Uma vez obtidas as equações dos modelos, foi calculada a FD para o trecho da BR-040 considerando o método do HCM-7 com e sem adaptações e os dados de campo, e os resultados podem ser vistos na Figura 2. Nota-se que o modelo sem adaptação superestima o sistema rodoviário em estudo, visto que retorna valores para FD menores do que aqueles obtidos em campo. Já o modelo adaptado se adequa melhor à realidade, resultando em valores mais próximos dos coletados.

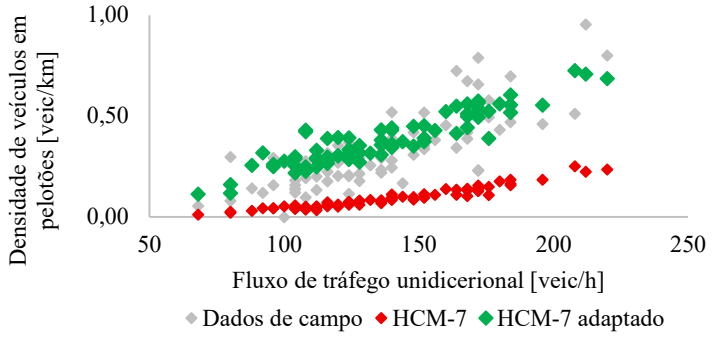


Figura 2: Comparativo entre o HCM-7 com e sem adaptação e os dados de campo

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou os efeitos da rodovia 2+1 em rodovias brasileiras de pista simples. Os resultados ressaltam a necessidade da calibração cuidadosa dos modelos, uma vez que as vantagens operacionais esperadas para os projetos de rodovias 2+1 podem variar significativamente dependendo da estrutura escolhida. Para chegar a essa conclusão, foram utilizados dados de campo de uma rodovia local com configuração semelhante para validar a calibração prévia do simulador de tráfego selecionado, o Aimsun Next. Após essa etapa, foram gerados dados sintéticos que refletem diversas condições geométricas e de tráfego. Os resultados sugerem que a implantação de rodovias 2+1 no Brasil pode reduzir a formação de pelotões entre 20% e 41% e aumentar a velocidade média de viagem entre 4% e 18%. Embora a geometria apresente resultados promissores, pesquisas adicionais são necessárias para examinar outros fatores, incluindo diferentes tipos de relevo (especialmente importantes para áreas com topografia acentuada), aspectos relacionados à segurança viária e rodovias com tráfego mais intenso. Estudos futuros também devem investigar os comprimentos ideais para as zonas de transição e faixas de ultrapassagem em diferentes condições geométricas e de tráfego.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq (processo 312498/2025-0) e à FAPEMIG (processo APQ-03308-24) pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2018) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (7ª ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Bergh, T.; M. Remgard; A. Carlsson; J. Olstam e P. Stromgren (2016) 2+1-highways: Recent Swedish Capacity and Level-of-Service Experience. *Transportation Research Procedia*, v. 15, p. 331–345. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.06.028.

Bessa Jr., J. E.; J. R. Setti e S. S. Washburn (2017) Evaluation of models to estimate percent time spent following on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. 143, n. 5, p. 1–9. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000032.

Bicalho, A. C. F. e J. E. Bessa Jr. (2025) Adaptation of the HCM-7 for estimating the level of service on a Brazilian two-lane rural highway with passing lanes. *Transportes*, v. 33, p. 1–15. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3032.

Boora, A.; I. Ghosh e S. Chandra (2017) Identification of free-flowing vehicles on two lane intercity highways under heterogeneous traffic condition. *Transportation Research Procedia*, v. 21, p. 130–140. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.03.083

Calvi, A.; S. D. Cafiso; C. D'Agostino; M. Kiec e G. Petrucci (2023) A driving simulator study to evaluate the effects of different types of median separation on driving behavior on 2+1 highways. *Accident Analysis & Prevention*, v. 180, p. 106922. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106922.

Jafari, A.; A. Al-Kaisy e S. S. Washburn (2021) Investigation of operational performance on 2+1 highways. *Advances in Transportation Studies*, v. 54. DOI: 10.53136/97912599405442.

Lee, D. e J. Lim (2019) Driver behavior analyses of 2+1 highways based on a driving simulation experiment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 23, p. 1351–1359. DOI 10.1007/s12205-019-0593-1.

Oliveira, J. K. S. e J. E. Bessa Jr. (2022) Adaptation of the HCM for the analysis of two-lane rural highways without passing lanes in Brazil. *Transportes*, v. 30, p. 1–15. DOI:10.14295/transportes.v30i3.2690.

Romana, M.; M. Martin-Gasulla e A. T. Moreno (2018) 2+1 highways: overview and future directions. *Advances in Civil Engineering*, v. 2018. DOI: 10.1155/2018/2705716.

Silva, F. A.; J. E. Bessa Jr.; A. L. Costa; A. L. Cunha e D. M. C. Velho (2022) Analysis of no-passing zones to assess the level of service on two-lane rural highways in Brazil. *Case Studies on Transport Policy*, v. 10, p. 248–256. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.12.006.

TRB (2022) *Highway Capacity Manual* (7ª ed.). Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Washburn, S. S.; D. Watson; Z. Bian; T. Luttinen; A. Al-Kaisy; A. Jafari; R. Downling e A. Elias (2018) *Improved analysis of two-lane highway capacity and operational performance.* Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program, TRB.

Thais Berger Barbosa da Silva (thais.berger@hotmail.com)
José Elievam Bessa Júnior (elievamjr@gmail.com ou elievam@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Endereço: Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Modelagem do tráfego

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

DESMISTIFCANDO O IMPACTO VIÁRIO DA CICLOFAIXA: UM ESTUDO COM PTV VISSIM NA AV. JOVITA FEITOSA - FORTALEZA/CE

Sávio Barbosa de Sousa, Paulo Bruno Souza Nunes
Centro Universitário Fametro (UNIFAMETRO)

RESUMO
Este estudo teve como objetivo analisar os impactos na fluidez do trânsito decorrentes da implantação de uma ciclofaixa na Avenida Jovita Feitosa, em Fortaleza/CE, utilizando o software de microssimulação PTV VISSIM. A metodologia adotada envolveu coleta de dados em campo, modelagem do trecho com e sem a ciclofaixa e posterior análise comparativa dos resultados. Os indicadores analisados incluíram velocidade média, atraso veicular, tempo de parada, número de paradas e nível de serviço. Os resultados indicaram um aumento no tempo de atraso e de parada por veículo, mas sem alteração significativa no nível de serviço da via, que se manteve em nível C. Dessa forma, conclui-se que a implantação da ciclofaixa é tecnicamente viável, apresentando impactos gerenciáveis sobre a fluidez e favorecendo uma mobilidade urbana mais segura e sustentável.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

Avaliar os impactos na fluidez do trânsito decorrentes da implantação de uma possível ciclofaixa na Avenida Jovita Feitosa, em Fortaleza/CE, de acordo com as condições geométricas mencionadas por Brasil (2018), por meio de simulações realizadas no software PTV VISSIM, com foco em indicadores de desempenho viário como atraso, paradas e nível de serviço.

2. MÉTODO

A Figura 1 a seguir apresenta a metodologia utilizada neste trabalho.

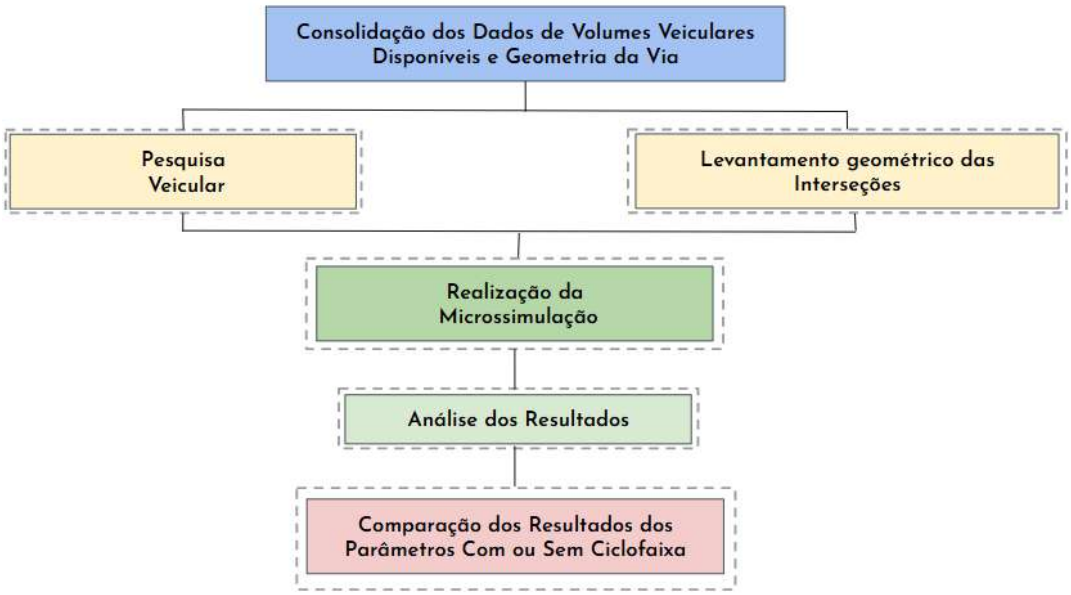


Figura 1: Processo metodológico adotado

3. RESULTADOS OBTIDOS

A partir da análise realizada por meio de simulações no software VISSIM, foram comparados os cenários com e sem a implantação da ciclofaixa na Avenida Jovita Feitosa. Os indicadores de desempenho operacional extraídos permitiram avaliar os impactos da intervenção na fluidez do tráfego motorizado.

Observou-se uma redução na velocidade média dos veículos, que passou de 33,46 km/h no cenário base (sem ciclofaixa) para 26,87 km/h após a implantação da infraestrutura cicloviária. Essa redução pode ser atribuída à diminuição do espaço viário disponível para os veículos motorizados e à reorganização da faixa de circulação.

Além disso, o tempo médio de atraso por veículo aumentou de 21,18 segundos para 26,71 segundos,

evidenciando um leve acréscimo no tempo de deslocamento dos condutores. Esse comportamento também é refletido no tempo médio em que os veículos permaneceram parados, que passou de 18,73 segundos para 26 segundos. O número médio de paradas por veículo aumentou de 0,67 para 0,84, indicando uma maior frequência de interrupções no fluxo, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Resultado Comparativo entre os Cenários

Cenário	LosVal (All)	VehDelay (All)	StopDelay (All)	Stops (All)
Sem Ciclofaixa	3 (C)	25,50	18,73	0,67
Com Ciclofaixa	3 (C)	26,71	26,00	0,84

Apesar desses impactos operacionais, o Nível de Serviço se manteve em nível C tanto antes quanto depois da implantação. O nível C é caracterizado por uma operação estável, com restrições moderadas de velocidade e manobra, sendo considerado aceitável em vias urbanas de médio porte.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar os impactos operacionais da implantação de uma possível ciclofaixa na Avenida Jovita Feitosa, utilizando simulações no software VISSIM. Os resultados apontaram pequenas variações em indicadores de desempenho viário, como redução da velocidade média e aumento de tempo parado e número de paradas por veículo. No entanto, o Nível de Serviço (LOS) da via se manteve em nível C, caracterizando uma operação estável e aceitável para o contexto urbano.

Esses resultados são importantes, pois desmistificam a ideia de que ciclofaixas causam grandes congestionamentos e prejuízos significativos ao tráfego motorizado. Embora existam percepções negativas em relação à redistribuição do espaço viário, os dados técnicos mostram que é possível implantar infraestrutura cicloviária sem comprometer de forma relevante o desempenho da via.

A utilização de ferramentas de simulação e a análise objetiva dos indicadores reforçam o papel fundamental da evidência técnica na formulação de políticas públicas e no convencimento da população. Em um cenário em que decisões urbanas muitas vezes enfrentam resistência por falta de compreensão, estudos como este se tornam essenciais para apoiar a promoção da mobilidade sustentável de forma equilibrada e informada.

Agradecimentos

O presente Trabalho foi realizado com o apoio do Centro Universitário Fametro (UNIFAMETRO).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume VI: Sinalização Cicloviária. Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN. Brasília: CONTRAN, 2018.

Savio Barboza de Sousa (savio.sousa01@aluno.unifametro.edu.br)
Paulo Bruno Souza Nunes (paulo.nunes@professor.unifametro.edu.br)
Centro Universitário Fametro (UNIFAMETRO), R. Carneiro da Cunha, 180 - Jacarecanga, Fortaleza - CE, 60010-470

Modelagem do tráfego

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SERVIÇO DE INFRAESTRUTURAS CICLOVIÁRIAS LOCALIZADAS EM RODOVIAS URBANIZADAS

Lucas Mariano Toledo, José Elievam Bessa Júnior, Leandro Cardoso
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
O *Highway Capacity Manual* (HCM) é um dos principais manuais utilizados para a avaliação de desempenho operacional de rodovias, incluindo metodologias específicas como a análise de infraestruturas cicloviárias. Entretanto, a aplicação direta do HCM ao contexto brasileiro apresenta limitações, por ter sido desenvolvido para a realidade norte-americana. Nesse contexto, esta proposta de dissertação de mestrado busca avaliar a qualidade de serviço em infraestruturas cicloviárias localizadas em rodovias urbanizadas. Os dados serão coletados na Região Metropolitana de Belo Horizonte. O método proposto visa considerar dados quantitativos (como largura de faixa, volume de veículos e velocidade) e qualitativos, obtidos por meio da avaliação da percepção de ciclistas. Foram definidos diferentes segmentos rodoviários urbanos com características variáveis de infraestrutura para compor a análise. Esta pesquisa busca obter uma metodologia que reflita, com maior precisão, a qualidade de serviço percebida pelos ciclistas em rodovias urbanas de tráfego misto.

1. INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras têm enfrentado desafios complexos em relação à mobilidade urbana, sendo o aumento do transporte motorizado privado uma das origens desses desafios (Pereira *et al*., 2021). Entre 2001 e 2022, a frota de automóveis e motocicletas, no Brasil, passou de 34 milhões para 77 milhões de unidades (DENATRAN, 2022). Esse processo de aumento de motorização da população intensifica diversos problemas, como congestionamentos, poluição sonora e atmosférica e aumento no número de acidentes. Nesse contexto, a bicicleta se apresenta como um meio de locomoção promissor, como uma alternativa para os veículos de passeio e as motocicletas, principalmente para trajetos de curta e média distâncias (Pereira *et al*., 2021).

Entretanto, o uso da bicicleta como meio de transporte principal ainda apresenta algumas barreiras significativas. Um exemplo claro de município que apresenta essas limitações é a capital mineira, Belo Horizonte, que carece de infraestrutura para promover a mobilidade ativa, especialmente no que tange aos ciclistas. O cenário é agravado quando se observam as condições das rodovias urbanas, que geralmente não são projetadas para acolher ciclistas de forma segura e confiável no Brasil (Cardoso *et al*., 2024, p. 112-113).

A avaliação da qualidade da infraestrutura percebida pelos ciclistas dessas vias é essencial como parâmetro para adequar as condições das vias utilizadas pelos ciclistas, a fim de reduzir o número de acidentes e promover um ambiente mais atrativo para a mobilidade ativa. Uma maneira de se fazer isso é por meio do cálculo do nível de serviço de infraestruturas cicloviárias, um campo de estudo ainda pouco explorado e que possui, como principal base metodológica, o manual americano *Highway Capacity Manual* (HCM), atualmente em sua 7ª versão (TRB, 2022). No entanto, justamente por serem desenvolvidos para atender a diferentes contextos, mas principalmente o americano, os métodos propostos no HCM podem não contemplar de forma satisfatória as peculiaridades da infraestrutura urbano-rodoviária brasileira e dos usuários locais (Lobo e Pinto, 2023, p. 157). Nesse sentido, as principais limitações incluem a simplificação funcional do método, a necessidade de recalibração com dados mais representativos e validação externa (Huff, 2014). Trabalhos publicados referentes à avaliação da qualidade da infraestrutura cicloviária, em âmbito nacional, como os de Cardoso (2024) e Batista e Lima (2020), utilizaram índices próprios e que não necessariamente avaliavam o nível de serviço.

Diante do exposto, o objetivo geral desta proposta de pesquisa em nível de mestrado é avaliar a qualidade de serviço de infraestruturas cicloviárias localizadas em rodovias urbanizadas. A fim de alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os principais fatores que afetam a qualidade de serviço percebida pelos usuários em rodovias urbanizadas, considerando a variabilidade de características operacionais;
- Reavaliar a metodologia do HCM-7 para estimar o Nível de Serviço para Bicicletas (NSB) em rodovias urbanas brasileiras.

2. MÉTODO

Esta proposta de pesquisa caracteriza-se como exploratória e aplicada, com enfoque tanto qualitativo como quantitativo. A abordagem tem por objetivo obter dados das características gerais de rodovias urbanas, na

Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), sob a ótica de ciclistas. Uma parte importante do método proposto é realizar uma revisão bibliográfica sistemática sobre metodologias de avaliação da qualidade de serviço cicloviária, com ênfase no HCM e suas adaptações internacionais e nacionais.

A coleta de dados quantitativos será realizada por meio de medições diretas e indiretas em campo, além de consultas de bases abertas como do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e concessionárias. As variáveis quantitativas serão as que estão na fórmula geral para a determinação do BLOS para rodovias urbanas, apresentada a seguir pela Equação 1 (TRB, 2022).

$$BLOS = \alpha + \beta_1.W + \beta_2.ln(V_m + 1) + \beta_3.S + \beta_4.P + \beta_5.PC \quad (1)$$

Onde:
W: largura efetiva da faixa externa (m);
V_m: volume de veículos motorizados (veíc/h);
S: velocidade média de viagem (km/h);
P: percentual de veículos pesados (%);
PC: condição do pavimento (índice ou categoria qualitativa);
$\alpha, \beta_1\beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$: coeficientes de calibração.

Por outro lado, os dados qualitativos serão obtidos por meio de questionários aplicados, no modelo de preferência declarada, aos usuários das vias que utilizam o modo cicloviário. Os questionários serão estruturados por meio de imagens das vias selecionadas para o estudo, as quais serão distribuídas em opções de escolha de preferência, considerando percepções relacionadas ao conforto, segurança, qualidade estrutural da via e interações com o tráfego motorizado. A Figura 1 ilustra um exemplo de cenário apresentado no questionário. Um exemplo de pergunta que pode ser realizada aos ciclistas: "Imagine que você está passando por uma rodovia. Que condições de ciclabilidade você imagina serem as melhores? Se você não se sente confortável com nenhuma das opções, não marque nada." São atributos possíveis na construção dos cenários: tipo de rodovia; limite de velocidade; relevo; presença de acostamento; volume de tráfego; condições do pavimento; motivo da viagem; presença de infraestrutura cicloviária (Moreno *et al*., 2025).



Figura 1: Exemplo simplificado de cenário na pesquisa de preferência declarada

A quantidade necessária de questionários respondidos válidos se baseia na regra de Green (2010), a qual recomenda um mínimo de 15 a 20 observações por variável independente. Considerando que já existem cinco variáveis independentes no método atual de Bicycle Level of Service (BLOS) do HCM e a possibilidade de inclusão de 2 ou 3 variáveis independentes, obtidas com base nos dados qualitativos, a amostra necessária seria estimada em 120 a 160 respostas válidas. A metodologia a ser empregada para o tratamento estatístico dos dados qualitativos se baseia em modelos de regressão múltipla e modelos Logit, utilizados para determinar a relevância de cada variável.

Os questionários serão elaborados de modo que possam ser aplicados *in loco*, mas também online. Eles poderão ser distribuídos em associações de ciclistas, por meio de grupos organizados (inclusive para lazer), em mídias sociais (Facebook, Instagram, LinkedIn, X), em postos de combustível e restaurantes no entorno das rodovias, em Polos Geradores de Viagens (PGVs) próximos das rodovias e até em espaços universitários. Na RMBH, são rodovias candidatas a BR-040, a BR-381 e a BR-262, que ligam a capital mineira a outras cidades importantes e possuem PGVs como CEASA-MG (em Contagem), Shopping Itaú Power (Contagem), Fiat Chrysler/Stellantis (Betim) e Acesso à Cidade Administrativa (via MG-010/BR-262).

A regressão múltipla será utilizada para quantificar a contribuição de fatores independentes, como largura de faixa, volume de tráfego motorizado e velocidade média, na variação das respostas obtidas nos questionários

aplicados. Já os modelos Logit, apropriados para dados categóricos, serão empregados para estimar a probabilidade de uma determinada avaliação de ciclabilidade ocorrer em função de um conjunto de condições estruturais e operacionais observadas nos trechos estudados. Esses modelos permitirão não apenas identificar as variáveis mais significativas, mas também subsidiar a construção de uma metodologia adaptada de avaliação do nível de serviço para ciclistas, considerando a realidade das rodovias urbanas avaliadas.

Os dados consolidados serão tratados por meio de regressão linear múltipla, com o objetivo de estimar a fórmula final que represente a qualidade de serviço percebida pelos ciclistas, adaptando as variáveis independentes do método original BLOS e incluindo novas variáveis relevantes, derivadas dos dados qualitativos. Dessa forma, a abordagem proposta permite uma nova proposição para obter o BLOS considerando a realidade das rodovias urbanas observadas, reestimando as variáveis independentes originais e ampliando sua capacidade de análise por meio da incorporação de variáveis qualitativas associadas à percepção dos ciclistas.

3. RESULTADOS ESPERADOS

O objetivo geral desta proposta de pesquisa em nível de mestrado é avaliar a qualidade de serviço de infraestruturas cicloviárias localizadas em rodovias urbanizadas. Serão identificados os principais fatores que afetam a qualidade de serviço percebida pelos usuários em rodovias urbanizadas; além disso, será obtida uma metodologia alternativa à do HCM-7 para estimar o Nível de Serviço para Bicicletas (NSB) em rodovias urbanas brasileiras. Essa metodologia adaptada serviria como uma ferramenta para a obtenção de rotas cicláveis mais atrativas, assim como para a definição de priorização de necessidade de intervenções infraestruturais nas rodovias. Vale ressaltar que os estudos que envolvem a qualidade de serviço e a opinião do usuário ainda são incipientes (TRB, 2022; Moreno *et al*., 2025), sobretudo no Brasil. No país, um estudo de destaque é Piva *et al*. (2025), que servirá de referência na captação da opinião do usuário no contexto de rodovias brasileiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq (processo 312498/2025-0) e à FAPEMIG (processo APQ-03308-24) pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Batista, D. G. P. e Lima, E. R. V. (2020) Índice de avaliação da qualidade de infraestruturas cicloviárias: um estudo em João Pessoa-PB. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, e20190086.

Cardoso, I. F. et al. (2024) Proposición de un índice de ciclabilidade para Belo Horizonte (Brasil) sob a ótica de especialistas em mobilidade urbana. *Transporte y Territorio*, n. 31, p. 110–138, jul./dez. 2024.

DENATRAN (2022) *Frota de veículos por tipo e UF – dezembro de 2022*. Brasília: Senatran/DENATRAN, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022. Acesso em: 07 jun. 2025.

Green, S. B. (2010) How many subjects does it take to do a regression analysis? *Multivariate Behavioral Research*, v. 26, n. 3, p. 499–510.

Huff, H. e R. Liggett (2014) *The Highway Capacity Manual's Method for Calculating Bicycle and Pedestrian Levels of Service: The Ultimate White Paper*. Los Angeles: Lewis Center for Regional Policy Studies; Institute of Transportation Studies, University of California, UCLA, jan. 2014.

Lobo, C.; P. e G. F. N. Nascimento (2023) Urban road cyclability: indicators for the municipality of Belo Horizonte – MG, Brazil. *Sustentabilidade em Debate*, Brasília, v. 14, n. 2, p. 151–169, ago. 2023.

Moreno, A. T.; Y. Cai; S. Linares-Ramirez; S. S. Washburn; A. Al-Kaisy; J. Barrios e B. Schroeder (2025) Evaluating quality of service for bicyclists on rural highways: insights from a comprehensive user survey and mixed-logit analysis. *Transportation*. https://doi.org/10.1007/s11116-025-10620-x

Pereira, R. H. M. et al. (2021) *Tendências e desigualdades da mobilidade urbana no Brasil: o uso do transporte coletivo e individual*. Brasília: IPEA, 2021. (Texto para Discussão, n. 2673). Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10713. Acesso em: 07 jun. 2025.

Piva, F. J.; S. S. Washburn e J. R. Setti (2025) Enhancing the estimation of freeway level-of-service thresholds with travelers perceptions. *Transportation Research Part A*, v. 199.

TRB (2022) *Highway capacity manual 7th edition: A guide for multimodal mobility analysis*. Transportation Research Board. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, D.C. E-book.

Lucas Mariano Toledo (lucasmmtoledo2@gmail.com); *José Elievam Bessa Júnior* (elievamjr@gmail.com ou elievam@etg.ufmg.br); *Leandro Cardoso* (leandro@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG

CIDADES COMPLEXAS: APLICAÇÃO DA TEORIA DAS REDES COMPLEXAS NA ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES ENTRE TRÁFEGO E FORMA URBANA NA CIDADE DE ARACAJU/SE

Vitor Meireles Dória, Rozana Rivas de Araújo
Universidade Federal de Sergipe

RESUMO
Esta pesquisa aborda a relação entre morfologia urbana e mobilidade em Aracaju, cujo problema central são os desafios de mobilidade decorrentes de um crescimento desassistido e de um Plano Diretor desatualizado há mais de duas décadas. A investigação parte da premissa de que a necessidade de deslocamento é consequência da distribuição de uso e ocupação do solo, com os sistemas viários como indutores. O objetivo é investigar quantitativamente a correlação estatística entre a estrutura topológica da rede viária e os padrões de fluxo de veículos. A metodologia emprega a teoria dos grafos e o Multiple Centrality Assessment (MCA), utilizando dados do OpenStreetMap (OSM), processados em Python (OSMnx, momepy), e enriquecidos com dados de tráfego da SMTT e demográficos do IBGE. A contribuição esperada é uma análise quantitativa e replicável para subsidiar planejadores na integração entre forma urbana e mobilidade sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Aracaju enfrenta problemas de mobilidade originados em sua forma de ocupação espacial. A cidade, principal polo de viagens, opera com um Plano Diretor com mais de 20 anos e sem um Plano de Mobilidade Urbana, cenário que torna essencial a análise de sua estrutura. A pesquisa parte do princípio de que a necessidade de deslocamento é consequência da distribuição de uso e ocupação do solo, e que os sistemas de transporte são indutores desta distribuição (Melo, 2004). Diante da lacuna nas abordagens tradicionais, o objetivo é transpor a análise da forma urbana para um domínio quantitativo, permitindo uma análise estatística. O trabalho visa, assim, correlacionar a estrutura topológica da rede viária de Aracaju com dados de tráfego, fornecendo uma nova lente analítica para um planejamento urbano mais eficiente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica da pesquisa está na Morfologia Urbana, que estuda a forma física das cidades e sua evolução (Lamas, 2007; Rego e Meneguetti, 2011). Existem diferentes correntes metodológicas, e a classificação de Kropf (2009) divide o campo em quatro abordagens principais que norteiam a investigação. A abordagem Histórico-geográfica (Conzen, 1960) analisa a cidade decompondo sua paisagem. A Tipo-morfológica (Caniggia e Maffei, 1979; Muratori, 1959) compreende a forma urbana a partir de relações culturais e do conceito de "tipo". A Configuracional, como a Sintaxe Espacial (Hanson, 1999; Hillier, 2007; Hillier e Hanson, 1984), foca na estrutura espacial e nas relações topológicas da rede. Por fim, a Analítica espacial (Batty, 2007; Batty e Longley, 1994; Tobler, 1979) emprega modelos computacionais para simular a complexidade dos sistemas urbanos.

Uma análise bibliométrica (Scopus, Web of Science) foi conduzida para identificar as correntes de pesquisa mais ativas, sendo refinada para focar no planejamento urbano. A análise quantitativa revelou uma predominância dos trabalhos que utilizam as abordagens analíticas espaciais e, sobretudo, as configuracionais. Esta constatação, junto à posição central dos trabalhos do Bill Hillier, justificou o aprofundamento na abordagem configuracional. Com o foco definido, uma revisão sistemática (PRISMA) da abordagem configuracional, com 63 trabalhos, identificou o *Multiple Centrality Assessment* (MCA) (Porta *et al*., 2006) como um avanço metodológico. O MCA usa uma representação "primal" da rede e múltiplos índices de centralidade. A revisão também destacou a importância de ferramentas de código aberto como OSMnx (Boeing, 2017) e momepy (Fleischmann, 2019). O principal achado consolidado pela revisão é a forte e consistente correlação entre a estrutura da rede viária e os padrões de tráfego (Hillier e Hanson, 1984; Penn *et al*., 1998; Porta *et al*., 2006), validando a premissa de que a forma da rede é um poderoso preditor de mobilidade.

3. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi elaborada para analisar a estrutura topológica da rede viária de Aracaju e correlacioná-la estatisticamente com dados de fluxo de tráfego. A abordagem é fundamentada na teoria dos grafos e na análise de redes espaciais, com o Multiple Centrality Assessment (MCA) como principal ferramenta analítica (Porta *et al*., 2006).

3.1. Construção do Modelo Urbano Digital

A base da análise é um modelo digital integrado da área de estudo, compreendendo Aracaju e suas conexões funcionais com Nossa Senhora do Socorro, São Cristóvão e Barra dos Coqueiros. A delimitação é justificada pela forte integração socioeconômica e por projetos de infraestrutura que reestruturarão suas conexões. As fontes de dados incluem a malha viária do OpenStreetMap (OSM), dados demográficos do IBGE (Censo 2022), contagens de tráfego da SMTT e projetos de infraestrutura. A malha viária foi extraída com a biblioteca Python OSMnx (Boeing, 2017) e o pré-processamento envolveu a simplificação topológica para consolidar interseções complexas, a garantia de conectividade da rede pela seleção do maior subgrafo fortemente conectado e a conversão do grafo para um formato não direcionado para a análise de centralidade.

3.2. Quantificação da Forma Urbana e da Centralidade

A quantificação da morfologia da rede foi realizada em ambiente Python, utilizando as bibliotecas momepy (Fleischmann, 2019) e NetworkX (Hagberg *et al*., 2008). A rede foi modelada em uma abordagem "primal", onde interseções são nós e segmentos de rua são arestas. Foram calculadas quatro métricas de centralidade principais, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1: Quadro resumo das métricas em análise

Métrica	Definição Conceitual	Relevância para Fluxo de Tráfego	Interpretação (Valor Alto)
Grau (Degree)	Número de conexões diretas de um nó (interseção).	Medida básica de conectividade local..	A interseção é um ponto de conexão complexo.
Proximidade (Closeness)	Inverso da distância média de um elemento a todos os outros elementos alcançáveis.	Mede a acessibilidade e a eficiência para alcançar múltiplos destinos.	A via é central e altamente acessível.
Intermediação (Betweenness)	Frequência com que um elemento está nos caminhos mais curtos entre outros elementos da rede.	Indica o potencial de uma via para canalizar tráfego de passagem.	A via é um importante "corredor" conector.
Retitude (Straightness)	Quão direto é o caminho de um elemento para todos os outros, comparado a uma linha reta.	Vias que oferecem rotas mais diretas são preferenciais para deslocamentos	A via oferece conexões eficientes e diretas.

A análise não se limitou a uma única escala, sendo adotada uma abordagem multiescalar, testando múltiplos raios de análise para as métricas locais. Esta estratégia permite investigar empiricamente qual escala de centralidade possui maior poder preditivo para os fluxos de tráfego observados.

3.3. Integração de Dados Empíricos (Tráfego e Demografia)

Os dados de contagem de veículos, provenientes dos radares da SMTT, servem como a variável de "verdade de campo". Para a análise, os dados brutos foram agregados temporalmente em três variáveis distintas para testar a estabilidade da relação forma-fluxo: Volume Diário Médio (VDM), Fluxo Médio de Pico da Manhã (FMPM) e Fluxo Médio de Fora de Pico (FMFP). Para enriquecer o modelo, dados demográficos do Censo do IBGE foram integrados à rede através da técnica de Tesselação de Voronoi, que atribui a população de setores censitários a cada nó da rede de forma ponderada pela área de influência, mitigando o viés de fronteira.

3.4. Estrutura Analítica e Correlação

Inicialmente, a correlação de Pearson foi usada para medir associações lineares básicas entre as métricas de centralidade e as variáveis de fluxo. Entretanto, o núcleo da análise é a Regressão Geograficamente Ponderada (GWR), modelo que foi escolhido para lidar com a não estacionariedade espacial. Em vez de um único resultado global, o GWR produz um mapa de coeficientes, mostrando onde e como a centralidade se relaciona com o tráfego com maior ou menor intensidade, fornecendo um resultado geograficamente rico e contextualizado (Liu *et al*., 2024; Sheng *et al*., 2021).

3.5. Análise Prospectiva de Cenários Futuros

Para avaliar o impacto potencial de futuras intervenções, três projetos de infraestrutura reais foram modelados como cenários, conforme o Tabela 2.

Tabela 2: Quadro resumo dos cenários para análise prospectiva

	Nome do Projeto	Descrição	Principais Alterações na Rede	Status
C1	Complexo Viário Sen. Maria do Carmo	Viaduto e ponte estaiada (360 m) na interseção das avenidas Tancredo Neves e Beira Mar	Adição de novas arestas (ponte) e reconfiguração da topologia na interseção, criando um fluxo de nível separado	Obras iniciadas
C2	Nova Ponte Aracaju/Barra	Segunda ponte sobre o Rio Sergipe, ligando a Coroa do Meio à Atalaia Nova	Adição de uma nova aresta de grande porte (ponte com ~1.080 m) e nós de conexão	Estudo de viabilidade
C3	Avenida Perimetral Oeste	Novo eixo viário de 6,17 km, do bairro Capucho ao Marivan	Adição de novas arestas e nós ao longo de todo o trecho proposto no projeto	Planejado

A análise de impacto não é uma simulação de tráfego, mas uma avaliação do impacto topológico. Para cada cenário, a rede foi modificada digitalmente e as métricas de centralidade foram recalculadas. A análise da variação percentual na centralidade permite identificar quais áreas da cidade ganham ou perdem importância estrutural, o que pode indicar uma redistribuição potencial dos fluxos de tráfego.

REFERÊNCIAS

Batty, M. (2007). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals* (1. paperback ed). MIT.

Batty, M., e Longley, P. (1994). *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*.

Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, *65*, 126–139. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004

Caniggia, G., e Maffei, G. L. (1979). *Composizione architettonica e tipologia edilizia: Lettura dell'edilizia di base* (4. ed, Vol. 1). Marsilio.

Conzen, M. R. G. (1960). Alnwick, Northumberland: A Study in Town-Plan Analysis. *Transactions and Papers (Institute of British Geographers)*, *27*, iii. https://doi.org/10.2307/621094

Fleischmann, M. (2019). momepy: Urban Morphology Measuring Toolkit. *Journal of Open Source Software*, *4*(43), 1807. https://doi.org/10.21105/joss.01807

Hagberg, A. A., Swart, P., e Chult, D. S. (2008). *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*. 11–15.

Hanson, J. (1999). *Decoding Homes and Houses* (1º ed). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511518294

Hillier, B. (2007). *Space is the Machine* (3ª). Press Syndicate of the University of Cambridge.

Hillier, B., e Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*.

Kropf, K. (2009). *Aspects of urban form*.

Lamas, J. M. R. G. (2007). *Morfologia Urbana e Desenho da Cidade*.

Liu, X., Chen, X., Orford, S., Tian, M., e Zou, G. (2024). Does better accessibility always mean higher house prices? *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *51*(9), 2179–2195. https://doi.org/10.1177/23998083241242212

Melo, B. P. D. (2004). *Indicadores de Ocupação Urbana sob o Ponto de Vista da Infra-estrutura Viária*.

Muratori, S. (1959). *Studi per una operante storia urbana di Venezia*. Istituto Poligrafico dello Stato.

Porta, S., Crucitti, P., e Latora, V. (2006). The Network Analysis of Urban Streets: A Primal Approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *33*(5), 705–725. https://doi.org/10.1068/b32045

Rego, R. L., e Meneguetti, K. S. (2011). A respeito de morfologia urbana. Tópicos básicos para estudos da forma da cidade. *Acta Scientiarum. Technology*, *33*(2). https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i2.6196

Sheng, Q., Jiao, J., e Pang, T. (2021). Understanding the Impact of Street Patterns on Pedestrian Distribution: A Case Study in Tianjin, China. *Urban Rail Transit*, *7*(3), 209–225. https://doi.org/10.1007/s40864-021-00152-9

Tobler, W. R. (1979). Cellular Geography. Em *Philosophy in Geography* (p. 379–386). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9394-5_18

Vitor Meireles Dória (vitor_m_doria@academico.ufs.br)
Rozana Rivas de Araújo (rozanarivas@academico.ufs.br)
Universidade Federal de Sergipe (UFS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC)
Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Bairro Rosa Elze, São Cristóvão, SE, Brasil

CONFIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES RURAIS A PARTIR DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO

Davi Antônio Avelar Brêtas[1,2], **José Elievam Bessa júnior**[1]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]ENGETRAF Consultoria e Projetos Ltda.

RESUMO
A confiabilidade do tempo de viagem (*Travel Time Reliability* – TTR) é um indicador essencial da qualidade de serviço, mas ainda pouco explorado em rodovias rurais de pista simples, especialmente sob a ótica do usuário. Este estudo, em nível de doutorado, propõe uma abordagem que incorpora a percepção dos usuários na definição de métricas e na classificação da TTR, uma vez que os atuais métodos são baseados em métricas objetivas da variabilidade e da distribuição dos tempos de viagem. A metodologia contempla coleta de dados por sensores, em plataformas digitais e por meio de entrevistas com os usuários, seguida de análises estatísticas e modelagem preditiva. Como resultado, serão propostas classes de TTR, análogas aos níveis de serviço, que reflitam a confiabilidade percebida pelos usuários.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A confiabilidade no tempo de viagem (Travel Time Reliability - TTR) refere-se à relação da estabilidade dos tempos de viagem vivenciados pelos usuários de um sistema de transporte com a capacidade desse sistema de satisfazer suas expectativas dentro de um conjunto específico de condições (Zang *et al.*, 2022). Nesse sentido, a crescente demanda por sistemas de transporte eficientes e previsíveis tem elevado a importância da TTR como um indicador chave de desempenho (Taylor, 2013; Small *et al*., 2021). Tradicionalmente, a avaliação do desempenho de redes viárias foca em métricas objetivas e de tendência central como a velocidade média e a densidade (Boer, 2014), que, embora importantes, não capturam a percepção do usuário sobre a previsibilidade de suas viagens e nem a dispersão dessas variáveis. A TTR, por outro lado, reflete a consistência e a previsibilidade dos tempos de percurso, sendo um fator crucial na tomada de decisão dos usuários e na eficiência dos sistemas viários.

O *Highway Capacity Manual* (TRB, 2022), principal manual para avaliação de capacidade e níveis de serviço do mundo, em sua 7ª edição, passou a incorporar a TTR como um componente crítico para a avaliação da qualidade de serviço de vias urbanas e de *freeways*, reconhecendo que os usuários valorizam não apenas a velocidade, mas também a previsibilidade de suas viagens (Washburn *et al*., 2024). No entanto, é fundamental distinguir a confiabilidade da variabilidade (que se refere às variações dos tempos de percurso). Apesar de serem termos que se complementam, os conceitos de variabilidade e de confiabilidade do tempo de viagem são distintos (Boer, 2014), em que a percepção do usuário, um elemento crucial para a confiabilidade, é predominantemente desconsiderada em favor de métricas puramente objetivas (que representam a variabilidade do tempo de viagem). Sendo assim, a variabilidade é comumente tratada como confiabilidade (TRB, 2022; Washburn *et al.*, 2024) por meio de métricas objetivas baseadas principalmente no volume de tráfego e na distribuição do tempo de viagem (TTD) (Carrion e Levinson, 2012; TRB, 2022).

Dessa maneira, por hipótese, a confiabilidade do tempo de viagem, para ser estimada, deveria incorporar a percepção e a opinião do usuário. Essa distinção é análoga à diferença entre Nível de Serviço (estimada com base em uma medida objetiva, como a densidade de tráfego) e a Qualidade de Serviço (que envolve a opinião do usuário), conforme abordado no HCM-7 (TRB, 2022). Piva *et al.* (2025), por exemplo, propuseram critérios baseados na percepção do viajante para determinar o nível de serviço em *freeways* paulistas.

A maioria dos estudos existentes concentram-se em redes urbanas ou em rodovias de pista dupla (Costa *et al*., 2025; Yang e Wu, 2016; Zang *et al.,* 2022), negligenciando a opinião do usuário e as particularidades e importância das rodovias de pista simples rurais para a conectividade e o desenvolvimento econômico. Diante disso, surge a pergunta de pesquisa central desta proposta de tese de doutorado: como a TTR em rodovias rurais de pista simples pode ser adequadamente mensurada, considerando a percepção do usuário? Nesse sentido, a hipótese do presente trabalho é que a TTR pode ser efetivamente mensurada em rodovias rurais de pista simples através do desenvolvimento de métricas e de classes de confiabilidade que integrem a percepção do usuário. Este projeto de pesquisa visa preencher essa lacuna na literatura.

2. JUSTIFICATIVA

A inevitável variabilidade do tempo de viagem em redes de transporte, resultante das incertezas generalizadas

em função da oferta e da demanda por viagens, faz com que a TTR seja um interesse comum e central de todas as partes interessadas em sistemas de transporte, incluindo planejadores, viajantes, prestadores de serviços e gestores (Zang *et al.,* 2022). Embora haja um corpo crescente de pesquisas sobre a TTR em ambientes urbanos e rodovias de pista dupla e *freeways*, há uma lacuna significativa no estudo da confiabilidade especificamente em rodovias rurais de pista simples. Essas rodovias desempenham um papel vital na conectividade regional e na logística de transporte de um país, especialmente no Brasil, onde representam cerca de 85% de toda malha viária nacional (CNT, 2024). A ausência de estudos aprofundados sobre a confiabilidade nessas vias impede uma compreensão mais profunda sobre o seu desempenho e a formulação de estratégias eficazes para otimizar a experiência do usuário e a eficiência do transporte.

Na 7ª versão do HCM (TRB, 2022), há capítulos voltados para análise da confiabilidade no tempo de viagem em *freeways* (autoestradas) e em vias urbanas. No Brasil, estudos recentes têm explorado a confiabilidade em diferentes contextos como o de Cançado (2024), que analisou rodovias de pista dupla urbanas e rurais em Minas Gerais, e Costa *et al*. (2025), que focaram em vias arteriais urbanas de Belo Horizonte. Há, portanto, uma lacuna na compreensão aprofundada da confiabilidade no tempo de viagem especificamente para rodovias rurais de pista simples no Brasil, que possuem características e desafios distintos. Além disso, não foram encontrados trabalhos na literatura que sugerissem classes da TTR com base na opinião do usuário, como ocorre, por exemplo, com o conceito de Nível de Serviço (que variam de A a F), o que justifica o desenvolvimento desta proposta de pesquisa em nível de doutorado.

Este estudo desenvolverá indicadores de TTR e estratégias de modelagem que reflitam acuradamente essa realidade, enriquecendo o arcabouço teórico existente. Adicionalmente, serão propostas classes de TTR com base na opinião do usuário, que efetivamente classifiquem a confiabilidade, em detrimento da variabilidade, aspecto pouco explorado na bibliografia internacional (Zang *et al*., 2022). De forma geral, esta proposta de pesquisa sobre a TTR em rodovias rurais de pista simples no Brasil oferecerá uma importante ferramenta para outros países que compartilham infraestruturas e desafios semelhantes. O conhecimento gerado poderá contribuir para o desenvolvimento de políticas de transporte mais eficazes, diretrizes de projeto mais adequadas e sistemas de gestão de tráfego adaptados às especificidades dessas redes viárias.

3. OBJETIVOS

O objetivo geral desta proposta de pesquisa é avaliar a confiabilidade do tempo de viagem em rodovias de pista simples rurais a partir da percepção do usuário. Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos: (i) Identificar os principais fatores que influenciam a TTR em rodovias rurais de pista simples, com foco na diferenciação entre variabilidade e confiabilidade do tempo de viagem e com base na opinião do usuário; (*ii*) Desenvolver e selecionar métricas de TTR voltadas às características de rodovias de pista simples rurais; (iii) Propor uma classificação do nível de TTR que reflitam a opinião do usuário.

4. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa está estruturada nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica e fundamentação teórica: será realizada uma revisão sistemática da literatura sobre confiabilidade e variabilidade do tempo de viagem, dando atenção especial à sua distinção conceitual, às métricas de desempenho e aos procedimentos para a sua obtenção. A pesquisa também se aprofundará em estudos que tratam da percepção do usuário sobre a qualidade do serviço de transporte, buscando metodologias para capturar essa percepção de forma quantitativa e qualitativa.
- Coleta de dados de tráfego: serão coletados dados de tráfego de tempo de viagem em rodovias de pista simples utilizando ferramentas como a *Google Distance Matrix* API, sensores de tráfego para estimar informações como composição viária, volume de tráfego e velocidade; serão ainda realizadas pesquisas para coletar a opinião dos usuários sobre a previsibilidade e os fatores que afetam a confiabilidade de suas viagens em rodovias de pista simples rurais.
- Análise e modelagem da confiabilidade: Nesta fase, serão aplicadas técnicas estatísticas para analisar os dados obtidos, para desenvolver métricas de confiabilidade.
- Validação dos Modelos: os modelos desenvolvidos serão validados utilizando um conjunto de dados independente do processo de desenvolvimento dos modelos preditivos.

5. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que este projeto de pesquisa produza os seguintes resultados: (*i*) Identificação de um conjunto de indicadores de TTR comprovadamente adequados para caracterizar o desempenho de rodovias rurais de pista simples no Brasil, considerando as particularidades locais; (*ii*) Compreensão dos fatores influenciadores que mais impactam a confiabilidade, incluindo a opinião do usuário, os padrões de tráfego, condições climáticas e a ocorrência de incidentes; (*iii*) Modelos Preditivos de Confiabilidade capazes de prever a TTR em trechos de rodovias de pista simples rurais, fornecendo uma ferramenta para o planejamento e a gestão

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq (processo 312498/2025-0) e à FAPEMIG (processo APQ-03308-24) pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boer, C. W. (2014) *Travel Time Reliability and Quality Assessment of a Route Set through Route Aggregation*. Tese de Doutorado. TU Delft, Delft University of Technology.

Cançado, A. L. E. (2024) *Análise da confiabilidade do tempo de viagem em rodovias de pista dupla de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Carrion, C.; Levinson, D. (2012) Value of travel time reliability: A review of current evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(4), 720–741. doi: 10.1016/j.tra.2012.01.003.

CNT (2025) *Pesquisa CNT de Rodovias 2024*. Confederação Nacional dos Transportes. Brasília, DF.

Costa, T. G.; Isler, C. A.; Bessa Júnior, J. E. (2025) Method for Identifying Homogeneous Periods to Evaluate Urban Travel Time Reliability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1, p. 1-15.

Kwon, J.; Barkley, T.; Hranac, R.; Petty, K.; Ccompin, N. (2011) Decomposition of Travel Time Reliability into Various Sources. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2229(1), 28–33.

Piva, F. J.; Washburn, S. S.; Setti, J. R. (2025) Enhancing the estimation of freeway level-of-service thresholds with travelers' perceptions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, [S.l.], v. 199, DOI: https://doi.org/10.1016/j.tra.2025.104568.

Small, K. A.; Verhoef, E. T. (2021) *The Economics of Urban Transportation*. 2. ed. Routledge.

Taylor, M. A. P. (2013) Travel through time: the story of research on travel time reliability. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, v. 1(3), p. 174194.

TRB (2022) *Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, 7th ed. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Washburn, S. S. et al. (2024) *Reliability and Quality of Service Evaluation Methods for Rural Highways: A Guide*. Washington, D.C.: National Academies Press.

Yang, S.; Wu, Y. (2016) Mixture models for fitting freeway travel time distributions and measuring travel time reliability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2594, 95–106.

Zang, Z., Xu, X., Qu, K., Chen, R., Chen A. (2022) Travel Time Reliability in Transportation Networks: A review of methodological developments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 143, 2022, 103866, ISSN 0968-090X.

MSc. Davi Antônio Avelar Brêtas (bretas.eng@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Av. Antônio Carlos, 6.627, Belo Horizonte, Minas Gerais.
Engetraf Consultoria e Projetos Ltda., Rua Gonçalves Dias, 229/301 – Belo Horizonte, Minas Gerais
Prof. Dr. José Elievam Bessa Júnior (elievamjr@gmail.com ou elievam@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Av. Antônio Carlos, 6.627, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Análise e controle de tráfego

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTIMATIVAS DE VELOCIDADE MÉDIA EM FORTALEZA: DADOS DE RADARES DE FISCALIZAÇÃO E API DISTANCE MATRIX DO GOOGLE

Marco Antônio Machado de Araújo[1], Manoel Mendonça de Castro Neto[1]
[1]Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
Este artigo apresenta uma análise comparativa entre as velocidades médias estimadas pela *Application Programming Interface* (API) *Distance Matrix* do Google Maps e as calculadas com base nos tempos de viagem obtidos por pares de radares de fiscalização eletrônica. O estudo abrange 47 trechos viários de Fortaleza, com dados do pico da manhã no segundo semestre de 2024. Os resultados indicaram que a correlação entre as estimativas aumenta com o número de veículos amostrados pelos radares, com estimativas pontuais das diferenças médias variando entre -2,1 km/h a 1,2 km/h. Com relação à hora do dia não foram observados padrões claros. Com relação às análises por classes de velocidade, as estimativas pontuais das diferenças variaram de -6,5 km/h a +4 km/h. Para as velocidades médias de 10 a 40 km/h, que são as mais frequentes na amostra, as diferenças variaram entre -3,1 e +2,4 km/h.

1. INTRODUÇÃO

Dados de tempo de viagem confiáveis, que geram métricas de desempenho como velocidade média e atraso, são imprescindíveis para o planejamento e a operação de redes viárias urbanas. Tais dados subsidiam o monitoramento do tráfego, a simulação de intervenções e a estimativa de acessibilidade em contextos urbanos complexos (Genser *et al.*, 2022; Fink *et al.*, 2024). Tradicionalmente, a coleta desses dados é feita por sensores fixos instalados na via, como laços indutivos, radares e câmeras com reconhecimento óptico de caracteres (OCR - *Optical Character Recognition*), amplamente utilizados por órgãos de gestão do tráfego (He *et al.*, 2019; Araújo e Castro Neto, 2024). Esses dispositivos oferecem uma boa acurácia, porém apresentam custos elevados de instalação e manutenção, cobertura restrita e falhas operacionais.

Nos últimos anos, a difusão de smartphones e tecnologias de geolocalização viabilizou novas fontes de dados baseadas na movimentação de usuários. Plataformas como *Google Maps*, *Here Technologies* e *TomTom* passaram a disponibilizar estimativas de tempo de viagem por meio de APIs comerciais, que integram dados históricos e em tempo real de milhões de dispositivos (Christodoulou *et al.*, 2020; Google, 2025). Essas soluções oferecem vantagens em capilaridade, atualização e custo, sendo promissoras para cidades em desenvolvimento.

No contexto brasileiro, estudos recentes exploram a combinação de sensores e fontes digitais. Pesquisas em Fortaleza e Belo Horizonte apontam avanços na integração de dados de tráfego, GPS de ônibus e APIs como a *Distance Matrix* do *Google Maps* (Alves, 2018; Cançado, 2024). Ainda assim, há lacunas no entendimento sobre a convergência e as discrepâncias entre os dados dessas fontes digitais e os de sensores físicos. Diante disso, este artigo realiza uma comparação pareada entre duas formas de estimativa das velocidades médias em 47 rotas urbanas de Fortaleza-CE: i) a partir dos tempos de viagem médios estimados pela API *Distance Matrix* do *Google Maps*; e ii) a partir dos tempos entre os instantes de passagem dos veículos por pares de sensores de fiscalização eletrônica (FE). A análise busca caracterizar a correspondência entre os dois métodos sob diferentes condições de tráfego, discutindo aspectos das semelhanças e diferenças observadas para o planejamento e a gestão do tráfego urbano.

2. MÉTODO

2.1. Coleta de dados

Para ambos os métodos, os dados foram coletados entre 14 de agosto e 29 de novembro de 2024, exclusivamente em dias úteis (segunda a sexta-feira, sem feriados), totalizando 69 dias de observação. As medições ocorreram diariamente no intervalo das 06h30 às 08h30, segmentado em janelas de 15 minutos. O estudo abrangeu 47 rotas urbanas em Fortaleza-CE, monitoradas por radares de FE (Figura 1). Foram considerados apenas automóveis e utilitários, devido a melhor classificação veicular desses tipos de veículos pelos sensores (Braga, 2016).

Para os dados dos radares de FE, o tempo de viagem de cada veículo foi calculado pela diferença entre os instantes de passagem pelos sensores. Valores extremos de veículos individuais foram eliminados conforme

método proposto por Alves (2018). A velocidade média de cada intervalo de 15 minutos foi estimada pela razão entre a extensão do trecho viário e a média dos tempos de viagem, sendo, portanto, uma estimativa da velocidade média no espaço. Para um determinado intervalo de 15 minutos, foram considerados todos os veículos cuja média entre os instantes de passagem pelos sensores origem-destino se encontra nesse intervalo. Assim, um veículo que trafegou no trecho durante mais de um intervalo de 15 minutos foi alocado ao intervalo em que ele percorreu por mais tempo.

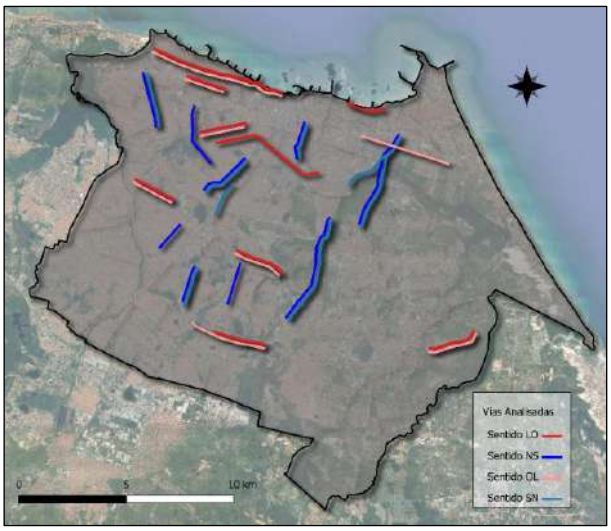


Figura 1: Mapa com as vias de Fortaleza analisadas.

Para a API *Distance Matrix* do Google Maps, foram realizadas consultas no modo de transporte "driving", que engloba carros e utilitários, compatível com os tipos de veículo considerados nos dados analisados dos radares. As consultas abrangeram a mesma cobertura espacial e temporal da amostra obtida por fiscalização eletrônica; os pontos origem–destino coincidem com as localizações dos radares. A API disponibilizou estimativas do tempo médio de viagem a cada 15 minutos. Esses valores foram divididos pelas extensões dos trechos para se obter as velocidades médias, como feito com os dados dos radares.

2.2. Comparação entre as estimativas

Para melhor entender as diferenças entras as estimativas, as comparações foram feitas desagregadas por três fatores. Primeiro, pelo tamanho da amostra de tempos de viagem de campo, ou seja, pelo número de veículos registrados em ambos os radares de FE (variável *n_FE*). Isso permite analisar a hipótese de que um maior tamanho amostral, o que resultaria em estimativas de velocidade média do trecho mais precisas pelos sensores, estaria em maior concordância (correlação) com as estimativas da API. Este fator representa o tamanho da amostra da estimativa pela FE, e não deve ser confundido com o volume de tráfego, pois nem todos os veículos passam ou são identificados em ambos os radares. Os outros dois fatores foram o horário e a velocidade média, para avaliar se as condições de tráfego afetam a similaridade das estimativas. As diferenças entre as estimativas foram feitas com base em análises de correlação, regressão e intervalos de confiança para dados pareados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as comparações por tamanho da amostra de veículos no intervalo de 15 minutos (*n_FE*). O número n, entre parênteses, acima de cada gráfico, indica o número de pontos, ou seja, o número de intervalos de 15 minutos considerados. De modo geral, as correlações foram fortes ($r > 0{,}93$) para n_FE intermediários e altos. Para a faixa mais baixa ($n_FE < 25$ veículos), a correlação foi de 0,75. As retas de regressão (em vermelho) confirmam essa tendência: à medida que *n_FE* aumenta, o coeficiente angular se aproxima de 1,0 e o intercepto de zero, alinhando-se à reta de igualdade entre as estimativas (reta de 45º, tracejada). A comparação entre as retas de regressão e de identidade indica que, em média, para velocidades médias mais baixas, as estimativas da API tendem a ser maiores do que as da FE, e que, para velocidades mais altas, parece ocorrer o contrário, embora com menos intensidade.

As áreas sombreadas em azul na Figura 2 representam uma faixa de tolerância de ±5 km/h em torno da reta de igualdade. Percebe-se que quanto maior *n_FE*, maior a proporção de pontos dentro dessa faixa. Para *n_FE* maior que 25, o R^2 se estabiliza. A maior similaridade entre as estimativas para amostras veiculares maiores pode indicar maior qualidade das estimativas da API, pois quanto maior o número de veículos amostrados pelos radares, mais eficiente será a medição de velocidade média do trecho pela FE, a qual pode servir como referência.

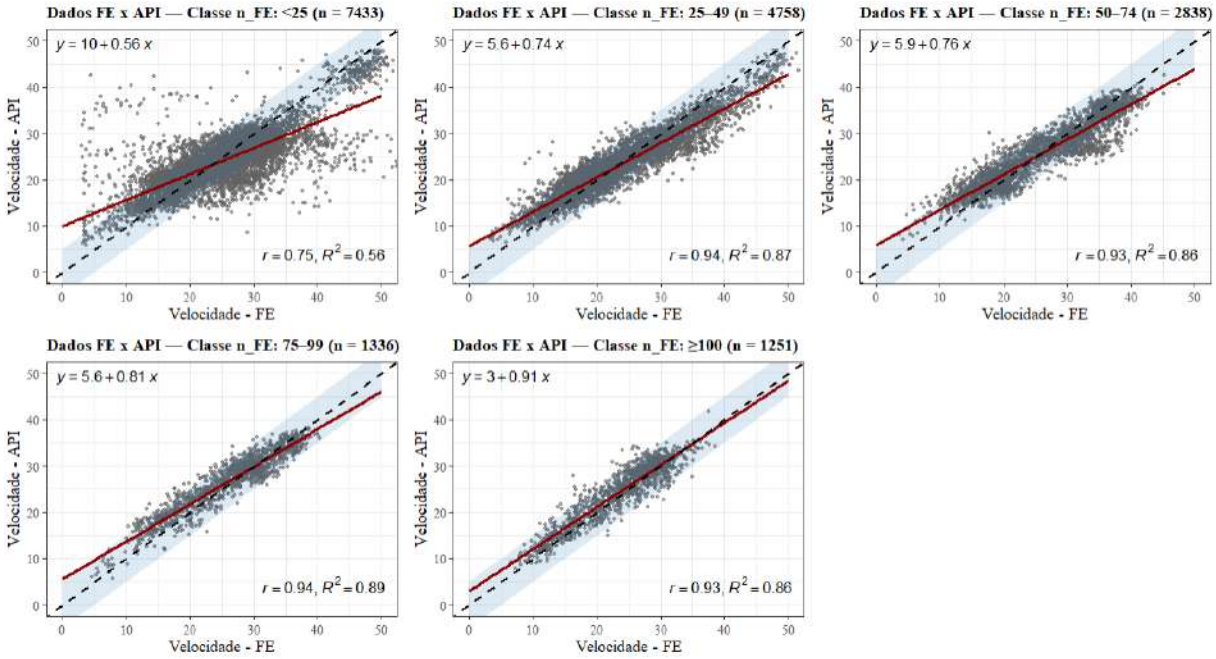


Figura 2: Velocidades médias FE x API, por número de veículos amostrados (*n_FE*).

Os resultados da comparação por n_FE e hora do dia estão apresentados na Tabela 1 e Figura 3. Na Tabela 1, nota-se que para n_FE > 25, as correlações foram altas em todos os horários, com uma notável exceção às 06h30, quando trechos com n_FE > 100 resultaram em uma correlação inesperadamente baixa (r = 0,53). Dentre as rotas avaliadas nesse horário, a R17-2 (Av. Raul Barbosa-SN), conhecida por apresentar congestionamentos severos a partir das 06h45, concentrou o maior número de observações (n = 47). Embora a formação de filas intermitentes nesse período de transição de tráfego seja uma possível explicação para a anomalia, uma causa definitiva para essa discrepância isolada não pôde ser estabelecida no escopo deste trabalho. Desta forma, esse resultado é reconhecido como uma limitação da análise e um ponto que merece investigação futura. Ressalta-se, contudo, que essa exceção pontual não invalida a forte concordância geral observada entre as estimativas nas demais condições avaliadas.

Tabela 1: Tamanho da amostra (n) e coeficiente de correlação (r) entre as estimativas, por número de veículos amostrados (*n_FE*) e horário.

Hora	*n_FE* < 25	*n_FE* 25-49	*n_FE* 50-74	*n_FE* 75-99	*n_FE* > 100
	n / r				
06:30	966 / 0,75	554 / 0,93	215 / 0,95	70 / 0,89	101 / 0,53
06:45	953 / 0,76	617 / 0,92	308 / 0,90	161 / 0,91	123 / 0,91
07:00	887 / 0,79	604 / 0,92	324 / 0,91	137 / 0,86	126 / 0,91
07:15	873 / 0,75	595 / 0,93	369 / 0,92	174 / 0,94	153 / 0,92
07:30	922 / 0,74	582 / 0,93	409 / 0,92	229 / 0,96	180 / 0,96
07:45	931 / 0,75	597 / 0,93	386 / 0,92	229 / 0,96	187 / 0,96
08:00	981 / 0,72	621 / 0,94	403 / 0,93	189 / 0,96	193 / 0,93
08:15	920 / 0,68	588 / 0,94	424 / 0,94	147 / 0,94	188 / 0,91

A Figura 3 mostra que nas classes n_FE ≥ 75 a API estimou velocidades médias levemente superiores às da FE (diferenças entre 0,0 e 1,9 km/h, considerando os limites mais extremos dos intervalos). Por outro lado,

para amostras menores, a API tendeu a fornecer velocidades inferiores às da FE (diferenças de 0,3 km/h a -2,4 km/h). Comparando-se os intervalos dentro de cada categoria de n_FE, não parecer haver um padrão bem definido das diferenças das estimativas de velocidade média em função do horário.

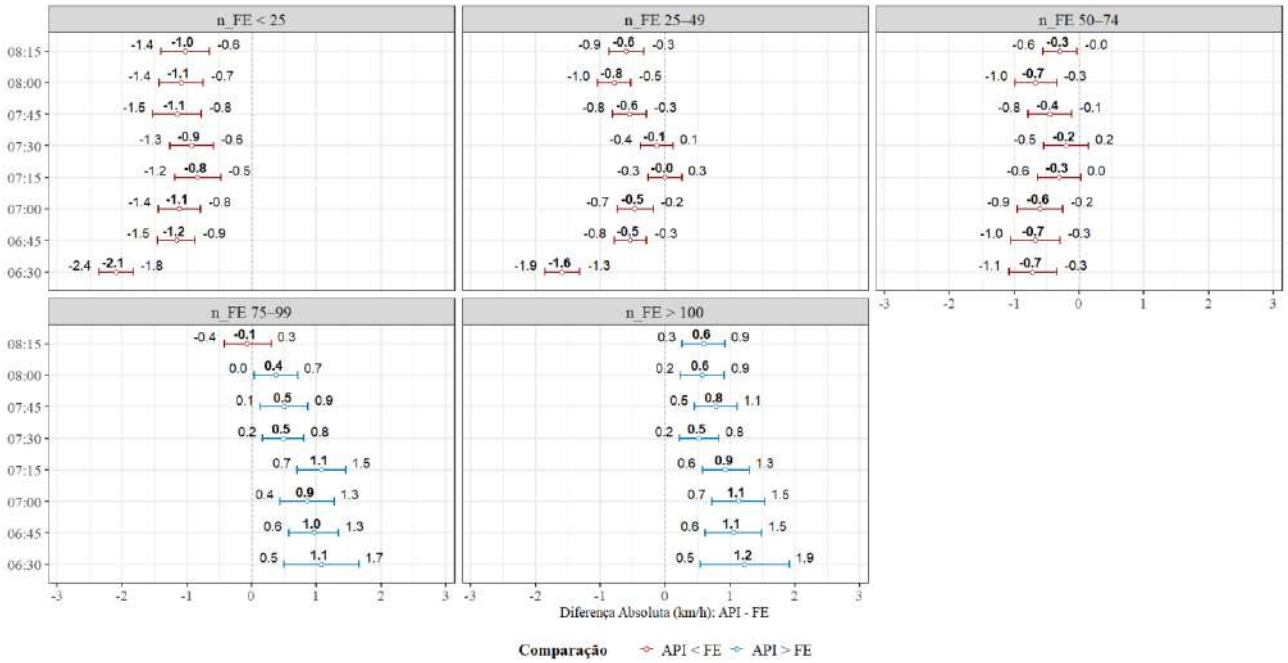


Figura 3: Intervalos de confiança de 95% das médias das diferenças (*D=API-FE*), por número de veículos amostrados (*n_FE*) e por horário.

As comparações com base na velocidade média da FE estão na Figura 4, que traz os intervalos de confiança da média das diferenças pareadas (API - FE). Nota-se uma tendência de a API superestimar em faixas de baixa velocidade (até 25 km/h) e subestimar a partir de 25 km/h. A maior discrepância ocorre na faixa de 50 a 55 km/h, onde a API chega a subestimar a velocidade em 6,5 km/h, em média. A precisão das estimativas é maior nas velocidades intermediárias, o que está associado, pelo menos em parte, ao tamanho amostral: essas classes concentram a maior parte das observações (n). Para as velocidades médias entre 10 e 40 km/h, as mais frequentes na amostra, as diferenças pontuais foram de +2,4 a -3,1 km/h.

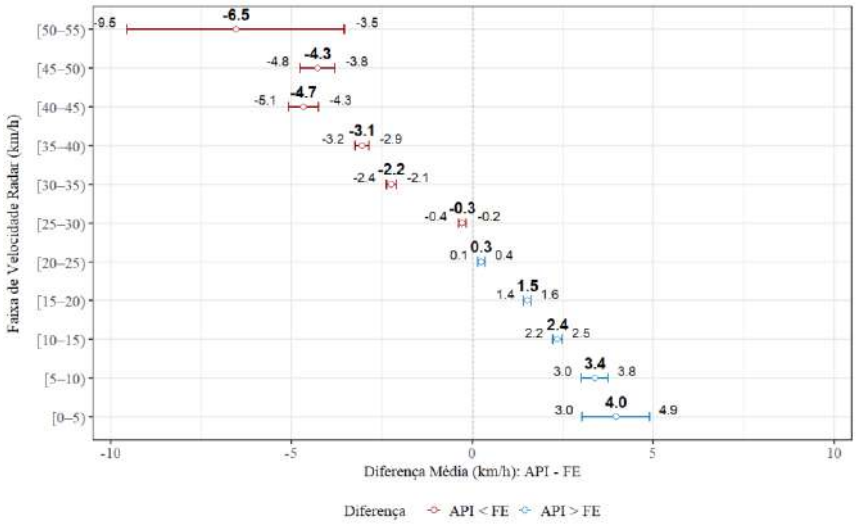


Figura 4: IC95% da Diferença API - FE por Faixa de Velocidade Real

4. CONCLUSÃO

A comparação entre as estimativas de velocidade da API *Distance Matrix* do Google Maps e dos dados de radares de fiscalização eletrônica (FE) estabeleceu uma forte correlação entre os dois métodos, especialmente

quando a amostra de veículos registrados em pares de radares de FE (*n_FE*) é superior a 25. A crescente similaridade com o aumento de *n_FE* sugere maior validação à API, pois quanto maior n_FE, melhor tende a ser a estimativa da velocidade média a partir dos dados dos radares.

Com relação às análises por classes de velocidade, a análise indica um viés sistemático: a API tende a superestimar as velocidades em condições de tráfego lento (+4,0 km/h na faixa de 0-5 km/h) e a subestimar em condições de maior fluidez (-6,5 km/h na faixa de 50-55 km/h). Para as classes de velocidade mais frequentes na amostra (10 a 40 km/h), as estimativas pontuais das diferenças médias variaram de 2,4 a -3,1 km/h, valores relativamente pequenos em termos de análise do nível de serviço do tráfego. Com relação à hora do dia, em contrapartida, não foram observados padrões claros de variação nas diferenças das estimativas, o que possivelmente se deve à agregação de dados de vias com diferentes níveis de saturação em um mesmo horário. Para o período de análise considerado neste trabalho, das 06h30 às 08h30, os efeitos do fator hora do dia são, na verdade, os causados pela variação das demandas e dos resultantes níveis de serviço.

Como recomendação para estudos futuros, as comparações entre as estimativas podem ser feitas com base nas características físicas e operacionais das vias, para se compreender melhor as diferenças entre os métodos. Além disso, trabalhos futuros podem avaliar os impactos das diferenças das estimativas nos resultados de análises que se baseiam na velocidade média ou no tempo de viagem, como análises de nível de serviço e de confiabilidade de tempo de viagem de vias urbanas.

Ainda como sugestão, trabalhos futuros podem englobar estimativas feitas por outros métodos, como GPS de veículos de transporte coletivo e de transporte por aplicativos, seja por automóvel ou por motocicleta. Outros estudos podem ainda analisar os efeitos da resolução temporal das coletas via API, investigando se a agregação de dados capturados em maior frequência (a cada minuto, por exemplo) altera as estimativas. Por fim, a incorporação de variáveis externas, como condições climáticas e ocorrência de eventos ou incidentes, poderá contribuir para um entendimento mais abrangente das condições sob as quais as estimativas de diferentes métodos convergem ou divergem, aprimorando a aplicação combinada dessas fontes de dados no monitoramento do tráfego urbano.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Os autores agradecem à Autarquia de Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), da Prefeitura Municipal de Fortaleza, pelos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, A. S. (2018). *Comparação da variabilidade do tempo de viagem entre automóveis e ônibus em vias urbanas de Fortaleza.* Dissertação de mestrado – UFC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza, 2018.

Araújo, M.A.M; Castro Neto, M.M. (2024). *Confiabilidade do tempo de viagem em vias de fortaleza: análise exploratória com dados de fiscalização eletrônica*. In: anais do 38º congresso de pesquisa e ensino em transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos., Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/confiabilidade-do-tempo-de-viagem-em-vias-de-fortaleza-analise-exploratoria-com?lang=pt-br>. Acesso em: 07 Jun. 2025.

Braga, C. K. V. (2016). Qualidade da classificação veicular por laços indutivos do sistema de fiscalização eletrônica de Fortaleza. Graduação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. (2016).

Cançado, A. L. E. (2024). *Análise da Confiabilidade do tempo de viagem em rodovias de pista dupla de Minas Gerais.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2024.

Christodoulou, A.; Dijkstra, L.; Christidis, P.; Bolsi, P.; Poelman, H. (2020). *A fine resolution dataset of accessibility under different traffic conditions in European cities*. Sci Data. 2020 Aug 25;7(1):279. doi: 10.1038/s41597-020-00619-7. PMID: 32843662; PMCID: PMC7447804.

Fink, C.; Willberg, E.; Klein, R.; Heikinheimo, V.; Toivonen, T. (2024). *A travel time matrix data set for the Helsinki region 2023 that is sensitive to time, mode and interpersonal differences, and uses open data and novel open-source software*. Scientific Data, 11, Article 3689

Genser, A.; Hautle, N.; Makridis, M.; Kouvelas, A. (2022). *An Experimental Urban Case Study with Various Data Sources and a Model for Traffic Estimation*. Sensors, 22(1), 144. https://doi.org/10.3390/s22010144

Google (2025). *Google Maps Platform Documentation*. Disponível em: https://developers.google.com/maps/documentation. Acesso em: 07 de junho 2025.

He, Z.; Chow C.-Y.; Zhang, J.-D. (2019). *A Comparative Analysis of Journey Time from Google Maps and Intelligent Transport System in Hong Kong*. In 2019 IEEE 21st International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 17th Inter. Conf. on Smart City; IEEE 5th Intern. Conference on Data Science and Systems (pp. 2610-2617). IEEE.

Marco Antonio Machado de Araújo (marco.araujo@det.ufc.br)
Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)
Univ. Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Dept.de Eng.de Transportes, Campus do Pici, Bl. 703 – Fortaleza, Brasil

MODELAGEM ESTATÍSTICA DOS TEMPOS DE VIAGEM EM CONTEXTOS URBANOS: IMPACTOS NAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DO TEMPO DE VIAGEM

Marco Antônio Machado de Araújo, Manoel Mendonça de Castro Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
Este estudo avalia o impacto do uso das distribuições de probabilidade Normal, Lognormal, Gamma e Weibull sobre alguns importantes indicadores de confiabilidade do tempo de viagem (TTR). A partir de dados de 35 trechos arteriais de Fortaleza-CE, comparou-se os valores dos percentis 10, 50, 90 e 95 e dos indicadores BTI, TTI_{95}, Sk e Wd, calculados a partir dos modelos que se aderiram aos dados. Os resultados revelam que a distribuição Gamma apresentou os menores erros médios na modelagem dos percentis. Contudo, a análise de erros extremos nos indicadores expôs perfis de risco distintos: a Normal apresentou a maior subestimação do BTI (-0,18), uma falha crítica para a operação, enquanto a Lognormal registrou a maior superestimação (0,19). Conclui-se que a aderência estatística é insuficiente, pois a escolha de um modelo implica uma decisão estratégica sobre qual risco operacional é mais aceitável para o planejamento viário.

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade do tempo de viagem, ou apenas confiabilidade, ou ainda TTR, do inglês *travel time reliability* tem sido uma métrica cada vez mais considerada como importante para a qualidade do serviço de sistemas de transportes. A confiabilidade depende de diversos fatores, como demanda e a oferta viária, as condições meteorológicas e a ocorrência de eventos imprevistos (Taylor, 2013; Lu e Dong, 2017; TRB, 2022). Uma das etapas de estudos de confiabilidade é o emprego de modelos teóricos de probabilidade que representem a variabilidade dos tempos de viagem (Van Lint e Van Zuylen, 2005; Zang *et al.*, 2022).

Essa variabilidade se reflete diretamente no comportamento estatístico dos dados. Estudos indicam que os tempos de viagem em ambientes urbanos raramente seguem distribuições simétricas, como a Normal. Em geral, predominam as distribuições assimétricas à direita, com caudas longas que capturam a ocorrência de atrasos severos, ainda que ocasionais (Van Lint e Van Zuylen, 2005). A correta especificação do modelo probabilístico é, portanto, crucial não apenas para compreender, mas também para prever o comportamento da TTR.

Entre as distribuições encontradas na literatura, destaca-se o uso da Lognormal (Pu, 2011), Gamma (Harsha e Mulangi, 2022), Normal (Li *et al.* 2013) e Weibull (Costa, 2024), cada qual com propriedades particulares que as tornam mais ou menos adequadas a diferentes situações. Apesar da ampla aplicação desses modelos, a literatura revela uma lacuna quanto à análise dos impactos da escolha da distribuição sobre os indicadores de confiabilidade. Portanto, o objetivo deste estudo foi investigar o efeito que diferentes distribuições de probabilidade usadas para modelar tempos de viagem de vias urbanas (Lognormal, Gamma, Normal e Weibull) exerce sobre os valores dos indicadores de confiabilidade *Buffer Time Index* (BTI), *Planning Time Index* (TTI_{95}), *Skewness* (Sk) e *Width* (Wd).

2. MÉTODO

O método proposto nesse artigo foi dividido em três etapas: coleta e preparação dos dados; análise do ajuste (aderência) das distribuições de probabilidade; e análise comparativa dos indicadores de confiabilidade.

2.1 Coleta e preparação dos dados

Os dados foram os tempos de viagem obtidos por radares de fiscalização eletrônica instalados em 35 trechos de vias arteriais de Fortaleza–CE, abrangendo cerca de 85 km de malha viária urbana ao longo de 2019. A análise concentrou-se em dias típicos, totalizando 161 dias, distribuídos entre os meses de março, abril, maio, junho, agosto, setembro, outubro e novembro. As medições foram realizadas durante o pico da manhã, das 6h30 às 8h30, em intervalos de 15 minutos, visando capturar variações de desempenho nos períodos de maior demanda. Para assegurar a homogeneidade da amostra e mitigar possíveis vieses, restringiu-se a análise a veículos utilitários. Registros com interrupções ou inconsistências foram previamente identificados e descartados com base na metodologia de Alves (2018), que utiliza uma média móvel para o tratamento de *outliers* nessa situação.

2.2 Análise do ajuste das distribuições de probabilidade

Foram ajustadas quatro distribuições de probabilidade comumente usadas na modelagem de tempos de viagem no tráfego urbano: a Lognormal e a Gamma, assimétricas à direita; a Normal, simétrica; e a Weibull, flexível, capaz de modelar diferentes formas de assimetria. A aderência dos modelos foi verificada por meio dos testes estatísticos de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS) e Anderson-Darling (AD), escolhidos por suas complementaridades na detecção de desvios em diferentes regiões da distribuição (Stephens, 1986). Para as etapas seguintes, somente foram analisados os dados em que todas as quatro distribuições passaram em pelo menos um dos dois testes de aderência. Adotou-se este critério para garantir que as comparações fossem realizadas apenas considerando modelos que, pelo menos em princípio, são satisfatórios. A qualidade do ajuste das distribuições foi quantificada por meio do erro percentual absoluto médio (MAPE), que expressa a média das diferenças entre os valores modelados e os de campo, relativas aos valores de campo.

2.3 Análise dos efeitos da distribuição nos indicadores de confiabilidade.

Antes da análise dos indicadores de confiabilidade, foram analisados os percentis P10, P50, P90 e P95 dos tempos de viagem, pois são estatísticas fundamentais para o cálculo e para a compreensão dos quatro indicadores de confiabilidade analisados: o *Buffer Time Index* (BTI), que expressa o tempo adicional necessário em relação à média para assegurar a pontualidade em 95% das viagens, ou seja, usa a diferença entre o P95 e o tempo de viagem médio; o *Planning Time Index* (TTI_{95}), razão entre o P95 e o tempo de viagem em condições de fluxo livre; o *Skewness* (Sk), que reflete a assimetria ao comparar a diferença P90-P50 com a diferença P50-P10; e o *Width* (Wd), que compara a diferença P90-P10 com o P50. Em seguida, procedeu-se às análises dos indicadores de confiabilidade calculados a partir das distribuições, considerando as diferenças absolutas entre os valores, os MAPEs e as implicações práticas das variações observadas. A análise buscou identificar se a escolha do modelo estatístico influencia a avaliação da confiabilidade do sistema de transporte urbano.

3. RESULTADOS

A análise do tempo de viagem em Fortaleza-CE cobriu 35 rotas durante o pico da manhã (06h30-08h30), segmentado em 8 intervalos de 15 minutos, o que gerou 280 amostras distintas. Cada amostra contém os tempos médios diários coletados em dias úteis do ano de 2019, com o número de observações (n) variando de 103 a 157. Todas as amostras foram submetidas aos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling para quatro distribuições de probabilidade. Os resultados da aderência inicial indicaram que em 103 amostras (37%), nenhuma distribuição se mostrou adequada. Nas outras 177 amostras (63%), ao menos uma distribuição foi compatível com os dados. Para uma avaliação aprofundada do desempenho de cada modelo, a análise subsequente concentra-se exclusivamente no subconjunto de 43 amostras (15% do total) nas quais todas as quatro distribuições foram consideradas aderentes em pelo menos um dos testes. A Figura 1 compara os tempos de viagem empíricos com os estimados pelos modelos para os percentis de interesse. De forma geral, observa-se uma tendência de aumento dos tempos de viagem entre 07h15 e 08h00, refletindo a intensificação do tráfego nesse intervalo.

O maior desafio de modelagem foi observado no percentil 10 (P10), que representa os tempos de viagem mais baixos, associados aos veículos que trafegam com maior velocidade. Neste caso, os erros absolutos e percentuais foram consistentemente mais elevados, evidenciando a dificuldade dos modelos em capturar condições de tráfego mais fluido. Em especial, as distribuições Weibull e Normal apresentaram tendência sistemática de subestimar os tempos de viagem, indicando uma superestimação implícita da velocidade. Por outro lado, a distribuição Lognormal demonstrou o efeito inverso, com tendência à superestimação dos tempos. Esses resultados apontam para fragilidades dessas distribuições ao modelar a cauda inferior dos dados empíricos, independentemente do horário observado.

Nos percentis intermediários (P50), os modelos apresentaram desempenho mais equilibrado, com menores variações de erro percentual ao longo do intervalo analisado. A distribuição Gamma destacou-se com os menores erros médios e medianos, sobretudo fora dos horários de transição de tráfego. Exceções ocorrem nos intervalos de 06h45–07h00 e 07h45–08h00, que concentram maiores flutuações nos dados e dificultam a acurácia das estimativas. Ainda assim, os erros permaneceram em geral abaixo de 2%, evidenciando a eficiência da distribuição Gamma para representar a mediana dos tempos de viagem.

No percentil 90 (P90), correspondente a tempos mais longos e situações de maior congestionamento, os erros

se tornaram mais homogêneos entre os modelos. Observa-se um bom desempenho especialmente entre 06h45 e 07h00, com erros percentuais abaixo de 2%, sugerindo um breve período de saturação e maior previsibilidade do sistema. Especificamente no percentil 95 (P95), a distribuição Gamma novamente se destacou, ao lado da Weibull, com erros médios e medianos mais baixos. Em contrapartida, as distribuições Lognormal e Normal apresentaram maior dispersão nos resultados, com a Normal subestimando os tempos de viagem e a Lognormal tendendo à superestimação. A Tabela 1 resume essas observações, apresentando os valores médios do Erro Percentual Absoluto médio (MAPE). Os dados confirmam o desempenho superior da distribuição Gamma, que obteve os menores erros médios em todos os percentis analisados.

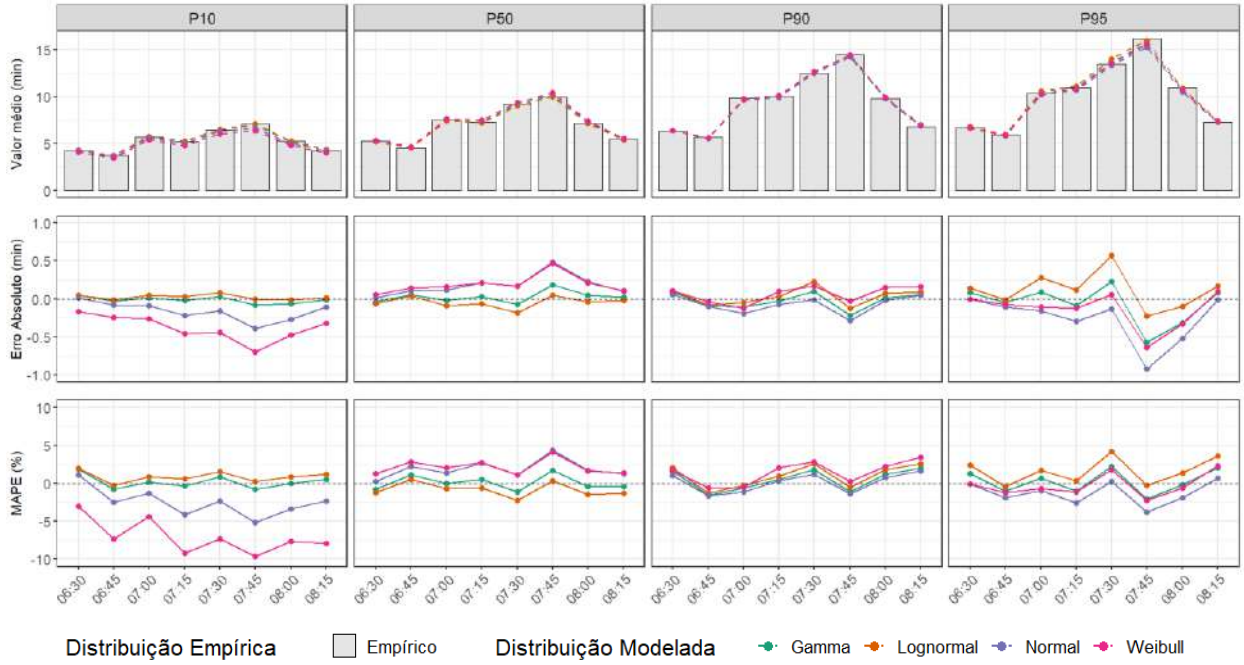


Figura 1: Comparativo entre valores modelados e empíricos dos percentis de tempo de viagem e seus respectivos erros.

Tabela 1: MAPE (%) dos percentis agregado por distribuição.

Distribuição	P10	P50	P90	P95
Gamma	0,2	0,0	0,5	0,1
Lognormal	0,9	-0,9	1,0	1,5
Normal	-2,5	1,8	0,1	-1,4
Weibull	-7,0	2,1	1,5	-0,4

A análise dos indicadores de confiabilidade, por sua vez, ilustrada na Figura 2, confirma que a escolha da distribuição estatística exerce influência ainda mais sensível sobre as métricas operacionais do que nos percentis isolados. Observando a evolução dos indicadores ao longo do pico da manhã, percebe-se que as maiores discrepâncias entre os modelos ocorrem justamente nos períodos de maior congestionamento, quando a variabilidade dos tempos de viagem se intensifica. O BTI, por exemplo, atinge seus valores mais altos entre 07h15 e 07h45, intervalo em que a divergência entre as estimativas dos modelos se torna mais acentuada. As inconsistências mais críticas foram na assimetria (Sk) e da dispersão (Wd), onde a distribuição Weibull, em particular, se distancia de forma notável tanto dos valores empíricos quanto das demais distribuições, sugerindo limitações estruturais em representar trajetos com comportamento altamente assimétrico.

Para avaliar a magnitude dos riscos envolvidos na adoção de cada modelo, foi conduzida uma análise dos erros extremos, a maior subestimação e a maior superestimação, para cada indicador e distribuição, conforme resumido na Tabela 2. Essa abordagem permite dimensionar não apenas o erro médio, mas também a faixa de incerteza potencial de cada modelo, expondo sua vulnerabilidade a estimativas excessivamente otimistas ou conservadoras, com implicações operacionais relevantes.

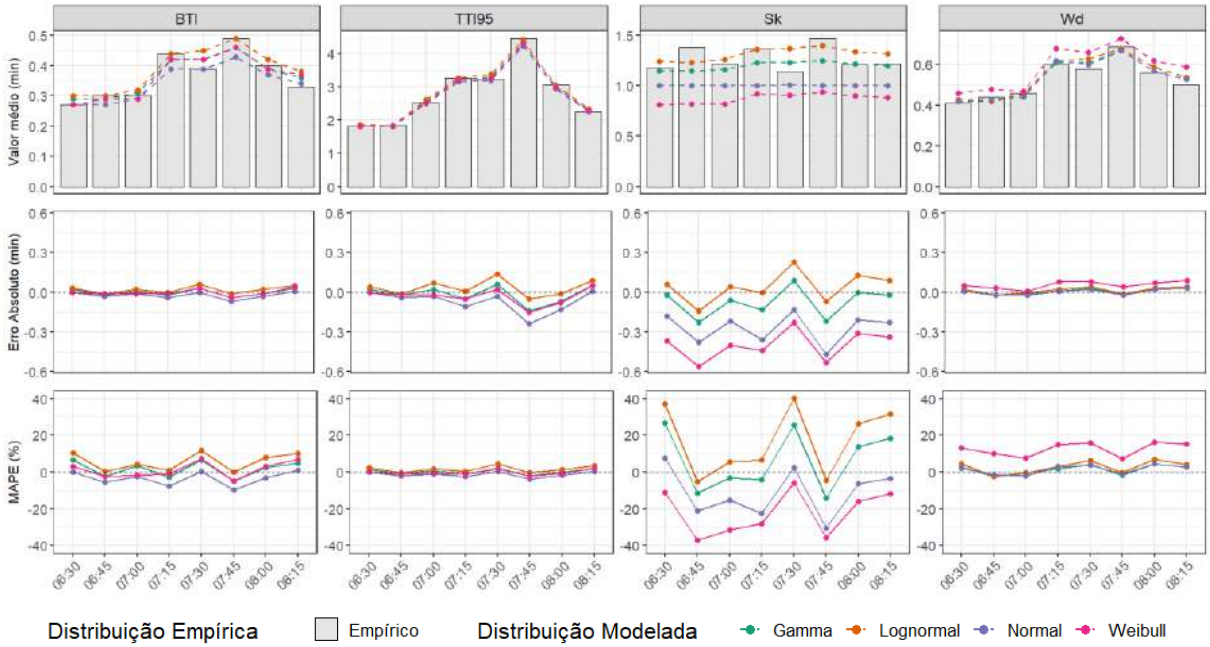


Figura 2: Valores modelados e empíricos dos indicadores de confiabilidade com os erros dos modelos

Tabela 2: Valore mínimo/valor máximo do erro absoluto (em minutos) dos indicadores agregados por distribuição.

Distribuição	BTI	TTI_{95}	Sk	Wd
Gamma	-0,15/0,13	-0,56/0,22	-0,71/0,75	-0,10/0,15
Lognormal	-0,12/0,19	-0,46/0,40	-0,65/0,92	-0,10/0,16
Normal	-0,18/0,10	-0,66/0,13	-0,90/0,48	-0,12/0,16
Weibull	-0,14/0,17	-0,53/0,20	-1,06/0,47	-0,07/0,29

A análise dos erros extremos revela a criticidade dessas escolhas. O caso mais severo de subestimação do BTI (-0,18) foi registrado na rota R20-3 (Av. da Universidade) às 07h45, utilizando a distribuição Normal. Essa via, caracterizada por intenso fluxo de estudantes, transporte coletivo e travessias frequentes, gera uma dinâmica difícil de capturar com modelos simétricos como a Normal, o que resulta em uma estimativa perigosamente baixa do tempo de margem necessário, e, por consequência, em um risco real de atraso para os usuários. No extremo oposto, a maior superestimação do BTI (0,19) foi produzida pela distribuição Lognormal na rota R21-2 (Av. Eng. Santana Jr.) às 08h00. Este eixo viário, situado em uma região de uso misto com grande concentração comercial, aparenta sofrer saturação no final do pico, onde pequenos distúrbios geram atrasos não lineares. A estrutura da Lognormal, com cauda direita alongada, tende a amplificar tais eventos, resultando em uma estimativa de BTI excessivamente conservadora.

Além da divergência em relação aos dados empíricos, a escolha do modelo gerou discrepâncias entre as distribuições. Por exemplo, tomando-se o BTI, na rota R17-2 (Av. Raul Barbosa), a análise em um mesmo horário (07h00) revelou uma diferença de 0,13 entre o BTI estimado pelo modelo Lognormal (0,72) e o do modelo Normal (0,59). Esta discrepância mostra que dois modelos, ambos não-rejeitados nos testes estatísticos de aderência, podem levar à conclusões distintas acerca da confiabilidade.

O desafio de modelagem torna-se ainda mais evidente ao observar a assimetria (Sk), onde a distribuição Weibull apresentou a maior subestimação (-1,06), registrada na rota R06-1 (Av. Silas Munguba) às 06h30. Esse trecho e horário marcam o início da transição para o pico matinal, período caracterizado por padrões de tráfego incipientes e heterogêneos. A forma rígida e menos flexível da Weibull dificulta a representação de tal complexidade, resultando em uma caracterização distorcida da distribuição dos tempos de viagem.

Esses achados conduzem à conclusão central deste trabalho: a aderência a testes estatísticos de ajuste, embora necessária, é insuficiente para validar um modelo de tempo de viagem para fins operacionais. A escolha da distribuição tem um impacto direto e substancial na estimativa dos indicadores de confiabilidade,

especialmente sob condições extremas. Modelos diferentes implicam riscos distintos, sendo fundamental considerar sua eficiência diante de cenários críticos, justamente aqueles que mais desafiam a resiliência e a eficiência do sistema de transporte.

4. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o impacto da escolha de diferentes distribuições de probabilidade (Gamma, Lognormal, Normal e Weibull) nos indicadores de confiabilidade do tempo de viagem em corredores arteriais de Fortaleza-CE. A principal conclusão não é a identificação de um modelo uniformemente superior, mas a demonstração de que a seleção da distribuição leva a interpretações da confiabilidade distintas, expondo a inexistência de uma solução única e a natureza do compromisso inerente à modelagem. A distribuição Gamma, por exemplo, destacou-se pelo melhor ajuste médio na representação dos percentis, mas não impediu a ocorrência de erros consideráveis nos indicadores. A análise dos erros extremos demonstrou que cada modelo possui um perfil de risco distinto: a distribuição Normal apresentou a maior subestimação do BTI (-0,18), uma falha crítica que pode levar à alocação insuficiente de tempo de folga, enquanto a Lognormal registrou a maior superestimação (0,19), com potencial para gerar planejamentos excessivamente conservadores.

A contribuição central deste trabalho, portanto, é a evidência de que a validação de um modelo de tempo de viagem não pode se restringir à aderência estatística. A escolha de uma distribuição implica a aceitação de um perfil de risco específico, tornando imperativo que o analista ou planejador compreenda qual tipo de erro (subestimação ou superestimação) representa a maior ameaça para seus objetivos operacionais. Esta constatação é especialmente relevante para cidades do Sul Global como Fortaleza, onde a alta variabilidade do tráfego, amplificada por fatores estruturais, exige abordagens de modelagem mais eficientes.

Reconhece-se como limitação o foco da análise no subconjunto de 43 amostras onde todos os modelos foram considerados estatisticamente válidos, o que pode ter excluído os cenários de tráfego ainda mais complexos. Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a exploração de modelos de maior flexibilidade, como as distribuições mistas (*mixture models*) ou abordagens não paramétricas. Estudos futuros também podem avaliar os efeitos das distribuições de probabilidade dos tempos de viagem por tipo de métrica de confiabilidade.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Os autores agradecem à Autarquia de Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), da Prefeitura Municipal de Fortaleza, pelos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, A. S. (2018). Comparação da variabilidade do tempo de viagem entre automóveis e ônibus em vias urbanas de Fortaleza. Dissertação de mestrado – UFC, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes.

Costa, T. G. (2024). Estimativa da Confiabilidade do Tempo de Viagem em vias arteriais urbanas de Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2024

Harsha, A.; Mulangi, V. (2022). Analysis of bus travel time variability using different probability distributions: A case study of Mysore city, India. Journal of Transportation Safety & Security, 14(2), 189-211.

Li, R.; Chai, H.; Tang, J. (2013). Empirical Study of Travel Time Estimation and Reliability. Mathematical Problems in Engineering Volume 2013, Article ID 504579, 9 pages http://dx.doi.org/10.1155/2013/504579

Lu, C.; Dong, J. (2017). Estimating freeway travel time and its reliability using radar sensor data. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 6(2), 97114. doi:10.1080/21680566.2017.1325785

Stephens, M. A. (1986). Tests based on EDF statistics. In D'Agostino, R. B., & Stephens, M. A. (Eds.), Goodness-of-Fit Techniques (pp. 97–193). Marcel Dekker. Acesso em 17/06/2025.

Taylor, M. A. P. (2013). Travel through time: the story of research on travel time reliability. Transportmetrica B: Transport Dynamics, v. 1(3), p. 174194. doi:10.1080/21680566.2013.859107

TRB (2022). Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis, 7th ed. Transportation Research Board, Washington, D.C., EUA.

Van Lint, J.W.C.; Van Zuylen, H.J., (2005). Monitoring and predicting freeway travel time reliability. Transportation Research Record 1917, 54–62.

Zang, Z., Xu, X., Qu, K., Chen, R., Chen A. (2022), Travel Time Reliability in Transportation Networks: A review of methodological developments. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 143, 2022, 103866, ISSN 0968-090X, https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103866.

Marco Antonio Machado de Araújo (marco.araujo@det.ufc.br)
Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)
Univ. Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Dept.de Eng.de Transportes, Campus do Pici, Bl. 703 – Fortaleza, Brasil

SWITCHING CONTROL LOGIC FOR DYNAMIC LANE CONFIGURATION ON FREEWAYS

Rodrigo Castelan Carlson[1], Felipe de Souza[2], Konstantinos Ampountolas[3]
[1]Federal University of Santa Catarina, [2]Argonne National Laboratory, [3]University of Thessaly

ABSTRACT
A real-time switching control logic for dynamic lane configuration (DLC) on freeways is proposed. DLC temporarily modifies the lane configuration to accommodate more lanes within the same road width. Using DLC during peak periods increases bottleneck throughput and helps prevent congestion. The control logic is based on the fundamental diagram and ensures efficient lane configuration switches. For analysis, we used an extended cell transmission model from the literature tailored for DLC simulation. We simulated a 1.8 km freeway stretch with a bottleneck that transitions from three to four lanes. The control logic performance is close to an optimal controller and superior to the no-control case.

1. INTRODUCTION

Dynamic Lane Configuration (DLC) (Rostami-Shahrbabaki *et al.*, 2025) is a traffic lane management approach that takes advantage of the relationship between lane capacity and lane width that can add freeway capacity by narrowing lane width while increasing the number of lanes on the same road width. The DLC approach resembles other traffic lane management techniques such as tidal lanes (Ampountolas *et al.*, 2020), dynamic hard shoulder running (Lima *et al.*, 2023), and controlled all lane running (Lima *et al.*, 2024). However, instead of reversing or using existing idle lanes, DLC creates more lanes from existing ones.

According to the Highway Capacity Manual (TRB, 2022), a 60 ft wide highway with five 12 ft wide lanes could have its capacity increased by 17%, ignoring any other factors, if the number of lanes increases to six and their width is reduced to 10 ft. However, the results by Chandra and Kumar (2003) suggest that adding lanes actually decreases the capacity by 3%. Multiple factors may be at play, such as traffic composition, lateral clearance, roadway construction, and culture. In addition, there are concerns about safety and the implementation feasibility of DLC (Rostami-Shahrbabaki *et al.*, 2025). Since it is a new concept and additional research is needed (Rostami-Shahrbabaki *et al.*, 2025), we consider that it is possible to increase capacity by narrowing lanes and increasing their number within the same road width for the remainder of this work.

Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025) proposed the DLC concept. To demonstrate the concept, they modified an extended Cell Transmission Model (Kontorinaki *et al.*, 2017) to incorporate DLC modeling. They used the modified model to formulate an optimal control problem that gives the optimal DLC according to prevailing traffic conditions. However, the optimal controller is not suitable for real-time applications. We propose instead a simple real-time switching control logic for the DLC that approximates the optimal control results.

In Section 2 we describe the basics of the model and of the optimal control formulation proposed by Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025). In Section 3 we propose our switching control logic. In Section 4 we compare the two control methods in simulation. In Section 5 we conclude this work and outline future research on the topic.

2. MODELING AND CONTROL FOR DYNAMIC LANE CONFIGURATION

We present the adaptation of the Cell Transmission Model (CTM) by Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025) for the modeling of dynamic lane configuration (DLC) as well as the corresponding optimal control formulation.

2.1. The cell transmission model for dynamic Lane Configuration

The main changes in the CTM proposed by Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025) are making the capacity drop and the supply and demand functions dependent on the prevailing lane configuration.

2.1.1. The core model

The CTM divides a freeway section into N homogeneous cells of equal length L. The state of the cell i is determined by its density $\rho_i(k)$ which is computed via the conservation equation at each time step k:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L}\left[q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - \beta_i(k) q_{i-1}(k)\right], \quad i = 1, \ldots, N, \tag{1}$$

with $q_i(k)$, $r_i(k)$, and $\beta_i(k)$ the outflow, the on-ramp flow, and the off-ramp exit rate in cell i at time step k, respectively, prevailing during time interval $[kT, (k+1)T)$ and T the model time step. The flows are computed from demand and supply functions based on triangular fundamental diagrams.

2.1.2. The triangular fundamental diagrams

A sketch of a three-lane and a modified four-lane configuration (with narrower lanes) is shown in Figure 1(a). The two corresponding triangular fundamental diagrams (FDs) are shown schematically in Figure 1(b). Generally, the original configuration has λ^{o} lanes, and the modified lane configuration has λ^{m} lanes with $\lambda^{\mathrm{o}} < \lambda^{\mathrm{m}}$. The parameters of the FD associated with lane configuration $c \in \{\mathrm{o}, \mathrm{m}\}$, each covering all current lanes, are: critical density ρ^c_{cr}, jam density ρ^c_{max}, free flow speed v^c_{f}, capacity flow q^c_{c}, and backward wave speed w^c, with o and m indicating the original and modified lane configuration, respectively. The new free-flow speed is the result of the application of a new (lower) speed limit, via variable speed limits. The parameter w is assumed to be the same since it is associated with a driving behavior that is arguably not impacted by the DLC (reaction time).

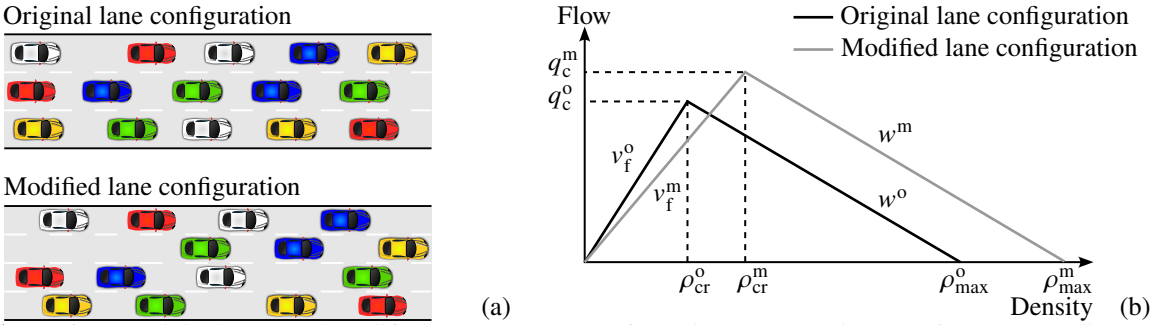


Figure 1: (a) Original (top) and modified (bottom) lane configuration; and (b) triangular fundamental diagrams

The two FDs in Figure 1(b) can be related to each other by a lane ratio $\epsilon = \lambda^{\mathrm{m}}/\lambda^{\mathrm{o}}$, from which we get $\rho^{\mathrm{m}}_{\mathrm{max}} = \epsilon \cdot \rho^{\mathrm{o}}_{\mathrm{max}}$, and a speed limit ratio $\sigma = v^{\mathrm{m}}_{\mathrm{f}}/v^{\mathrm{o}}_{\mathrm{f}}$. Their values depend on the prevailing lane configuration and are also crucial for defining the supply and demand functions in the modified CTM. Then, the capacity flow and critical density can be determined as functions of the parameters of the original lane configuration FD as:

$$\bar{q}_{\mathrm{c}} = \frac{\epsilon\sigma w v^{\mathrm{o}}_{\mathrm{f}}}{\sigma v^{\mathrm{o}}_{\mathrm{f}} + w}\rho^{\mathrm{o}}_{\mathrm{max}}, \qquad \bar{\rho}_{\mathrm{cr}} = \frac{\epsilon w}{\sigma v^{\mathrm{o}}_{\mathrm{f}} + w}\rho^{\mathrm{o}}_{\mathrm{max}}, \tag{2}$$

in which case $\bar{q}_{\mathrm{c}} = q^{\mathrm{o}}_{\mathrm{c}}$ and $\bar{\rho}_{\mathrm{cr}} = \rho^{\mathrm{o}}_{\mathrm{cr}}$ if $\epsilon = 1$ and $\sigma = 1$, and $\bar{q}_{\mathrm{c}} = q^{\mathrm{m}}_{\mathrm{c}}$ and $\bar{\rho}_{\mathrm{cr}} = \rho^{\mathrm{m}}_{\mathrm{cr}}$ otherwise.

2.1.3. The capacity drop extension due to DLC

Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025) followed the CTM formulation with a capacity drop (CD) extension at on-ramp merges proposed by Kontorinaki *et al.* (2017) (Approach 5). With DLC, another potential source of CD occurs when one section is on the modified lane configuration and the section immediately downstream is on the original lane configuration. To reproduce the CD in this situation, they introduced an additional variable:

$$\alpha_i(k) = \max\left(1, 1 + \theta_{\mathrm{l}}\frac{\lambda_i(k) - \lambda_{i+1}(k)}{\lambda_i(k)}\right) \tag{3}$$

with θ_{l} a parameter and $0 \leq \theta_{\mathrm{l}} < 1$. This variable is used as a multiplication factor that affects the supply function that, in its turn, affects the downstream cell inflow. This effect is described next.

2.1.4. Supply and demand functions

The flows in Equation 1 for each cell depend on the supply and demand functions defined, respectively, as:

$$q_{\mathrm{S},i}(k) = \min\left\{w\left(\epsilon_i(k)\rho^{\mathrm{o}}_{\mathrm{max}} - \rho_i(k)\right), \bar{q}_{\mathrm{c}}(k)\right\}, \text{and} \tag{4}$$

$$q_{\mathrm{D},i}(k) = \min\left\{\sigma_i(k)v^{\mathrm{o}}_{\mathrm{f}}\rho_i(k), \bar{q}_{\mathrm{c}}(k)\left(1 + \theta_{\mathrm{d}}\frac{\rho_i(k) - \bar{\rho}_{\mathrm{cr},i}(k)}{\bar{\rho}_{\mathrm{cr},i}(k) - \epsilon_i(k)\rho^{\mathrm{o}}_{\mathrm{max}}}\right)\right\}. \tag{5}$$

Equations 4 and 5 are adjusted, relatively to the work by Kontorinaki *et al.* (2017), to account for changes in lane configuration and speed limit via time and cell-dependent ϵ_i and σ_i. Equation 5 accounts for the CD at on-ramp merges via the decreasing function of density on the second term of the right-hand side. The magnitude of the CD is influenced by the parameter $\theta_{\mathrm{d}} > 0$ for cells with on-ramps; otherwise $\theta_{\mathrm{d}} = 0$.

Then, considering the CD extension for DLC (Equation 3) and the supply and demand functions (Equations 4

and 5), the flows for the conservation equation (Equation 1) are obtained from:

$$q_i(k) = \begin{cases} \min\left\{q_{\mathrm{D},i}(k), \alpha_i(k)\dfrac{q_{\mathrm{S},i+1}(k)}{1-\beta_{i+1}} - \theta_{\mathrm{r}} r_{i+1}(k)\right\}, & i = 1,\ldots,N-1, \\ q_{\mathrm{D},i}(k), & i = N. \end{cases} \tag{6}$$

The parameter $\theta_{\mathrm{r}} < 1$ multiplying the on-ramp flow affects the supply function for cells with on-ramps, enabling the formation of congestion in the cell i. The resulting overcritical density affects the outflows via the decreasing function in Equation 5. The DLC specific variable α_i affects the CD because if the number of lanes in the downstream section is less than the number of lanes in the upstream section, that is, $\lambda_{i+1}(k) < \lambda_i(k)$, α_i becomes greater than one and makes a higher supply for the downstream section. For more details about this formulation of the CTM the reader is referred to the work by Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025).

2.2. Optimal control for dynamic lane configuration

The discrete-time state-space representation of the macroscopic traffic model described by Equations 1 to 6 is:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}\left[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k), \boldsymbol{\psi}\right] \tag{7}$$

with $\mathbf{x}$ the state vector of the densities in each cell, $\mathbf{u}$ the control vector of the variables ϵ and σ of each cell, $\mathbf{d}$ the disturbance vector accounting for the demand at the most upstream cell and on-ramps, and $\boldsymbol{\psi}$ the parameters vector comprising the fundamental diagram parameters and the CD related parameters.

The following constraints apply to the control variables: $\epsilon_i(k) \in \{1, \epsilon_{\max}\}$, $\sigma_i(k) \in \{\sigma_{\min}, 1\}$, with $\epsilon_{\max}$ the maximum lane ratio and $\sigma_{\min}$ the minimum speed limit ratio. In addition, because the speed limit is always applied when the number of lanes is increased, the following relation must be enforced:

$$(\epsilon_i(k) - 1)\,(\sigma_i(k) - \sigma_{\min})) = 0. \tag{8}$$

The control objective is to determine the configuration of each cell at each time instant that minimizes the Total Travel Time (TTT). To this end, the following objective function is minimized:

$$J = T\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N} L_i\rho_i(k) + \phi_1 \sum_{k=1}^{K-1}\sum_{i=1}^{N}(\epsilon_i(k) - \epsilon_i(k-1))^2 + \phi_2 \sum_{k=0}^{K-1}\sum_{i=2}^{N}(\epsilon_i(k) - \epsilon_{i-1}(k))^2. \tag{9}$$

The first term consists of the TTT, since the model assumes that there are no queues at the entrances. The second and third terms penalize the variation in the lane configuration of each cell in consecutive control time steps and between adjacent cells, respectively. The parameters ϕ_1 and ϕ_2 are weighting factors on control variations.

The optimal control problem resulting from Equations 7 to 9 is a nonlinear non-convex mixed integer problem and it is difficult to solve. Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025) opted for a global heuristic optimization algorithm based on Particle Swarm Optimization for its solution. Instead, we applied Differential Evolution through the SciPy package, known to reach the optimal more consistently at the cost of higher computation time (Das and Suganthan, 2011).

3. A SWITCHING CONTROL LOGIC FOR DYNAMIC LANE CONFIGURATION

The switching between lane configurations that are reflected by different FDs in the DLC approach calls for a switching control logic similar to other traffic lane management problems that considered multiple FDs (Ampountolas *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2023, 2024). In fact, the logic proposed below is an adaptation of the switching control logic proposed by Lima *et al.* (2023) for the related dynamic hard shoulder running control.

Consider a single direction of a freeway as shown in Figure 1(a), in which the road width is such that switching from λ^{o} lanes to λ^{m} narrower lanes, $\lambda^{\mathrm{o}} < \lambda^{\mathrm{m}}$, increases the road capacity from $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{o}}$ to $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{m}}$ with corresponding critical densities $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}}$ and $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{m}}$ as seen in the FDs of Figure 1(b). For convenience, we assume triangular FDs as shown in the figure, that can be estimated off-line provided empirical data from periods operating in both configurations. However, the following switching control logic for DLC is valid for any strictly concave FD:

$$u_i(k+1) = \begin{cases} 1, & \text{if } u_i(k) = 0 \text{ and } \rho_i(k) > \gamma\rho_{\mathrm{cr},i}^{\mathrm{o}}, \\ 0, & \text{if } u_i(k) = 1 \text{ and } \rho_i(k) < \gamma'\rho_{\mathrm{cr},i}^{\mathrm{o}}, \\ u_i(k), & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{10}$$

with $u_i(k)$ and $\rho_i(k)$, respectively the the control action and the density measured over all current lanes in the cell i for the time interval time interval $[kT, (k+1)T)$, and $\gamma \in [0.5, 1)$ and $\gamma' \in [0.5, 1)$, with $\gamma' < \gamma$, parameters that add hysteresis to the control logic, preventing late activation and excessive switching. The control action defines the lane configuration: $u_i(k) = 0 \rightarrow$ original lane configuration with λ_i^{o} lanes and $v_{\mathrm{f},i}^{\mathrm{o}}$ or $u_i(k) = 1 \rightarrow$ modified lane configuration with λ_i^{m} lanes and $v_{\mathrm{f},i}^{\mathrm{m}}$.

The control logic monitors the prevailing density ρ every control period T_{C} and compares it with the critical density $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}}$. If ρ exceeds $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}}$, then the lane configuration changes to provide extra capacity. The modified configuration holds until ρ goes below $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}}$ and the extra capacity becomes unnecessary. Then, the road is changed back to the original configuration. The control action may be computed often, but should be held for a minimum time after a switch occurs to avoid frequent switching. The density ρ is aggregated over the measurement interval T_{m} for a period that sustains the freeway capacity; typically $T_{\mathrm{m}} = 5$–15 min. Simple filters can be used to smooth measurements. The control logic can operate with occupancy o and critical occupancy $o_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}}$, instead of ρ and $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}}$ since it is a direct measurement and does not depend on any forecasts. Thus, it can be applied with limited knowledge of the environment whenever loop-detector data is available in real-time.

4. RESULTS

Using the model described in Section 2.1, we modeled a real three-lane 1.8 km-long freeway stretch with an on-ramp merge 1.2 km downstream from the start of the stretch followed by an off-ramp 300 m further downstream (Figure 2). The link between the ramps may be subject to DLC with its configuration modified from three to four lanes ($\epsilon = \frac{4}{3}$).

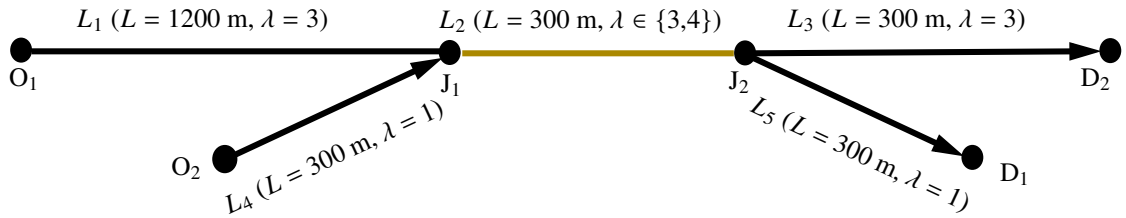


Figure 2: Schematic of a real 1.8 km long freeway stretch with an on-ramp followed by an off-ramp

The FD parameters (Figure 1(b)) are: $v_{\mathrm{f}}^{\mathrm{o}} = 30$ m/s, $\rho_{\mathrm{max}}^{\mathrm{o}} = 315$ veh/km, $w = 6.6$ m/s, leading to $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{o}} = 6135$ veh/h and $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{o}} = 56.8$ veh/km, and $v_{\mathrm{f}}^{\mathrm{m}} = 20$ m/s ($\sigma = \frac{2}{3}$) resulting in $\rho_{\mathrm{cr}}^{\mathrm{m}} = 420$ veh/km and $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{m}} = 7503$ veh/h and $\rho_{\mathrm{max}}^{\mathrm{m}} = 140$ veh/km. The values for the original configuration ($\lambda = 3$ lanes) were not extensively calibrated, but do resemble the capacity and free-flow speed from where the demand data was collected from. The net capacity gain is therefore 22.3%, chosen similar to Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025), as opposed to 33.3% had the per-lane fundamental diagram been kept the same. The remaining model parameters are: $\theta_{\mathrm{l}} = 0.3$, $\theta_{\mathrm{d}} = 0.3$, $\theta_{\mathrm{r}} = 0.25$, and $T = 1$ s. The traffic demand in Figure 3 is based on field data and reproduces a peak period lasting 100 minutes. The turning rate into link L_5 is 15%.

We study a no-control scenario (NCS) with $\lambda = 3$ lanes fixed for link L_2 and two control scenarios, one with the optimal control formulation (OCS) by Rostami-Shahrbabaki *et al.* (2025) presented in Section 2.2 and one with the switching control logic scenario (CLS) proposed in Section 3. The optimal control parameters are: $T_{\mathrm{C}} = 300$ s, $\phi_1 = \phi_2 = 0.5$ veh·s. The switching logic control parameters are: $\gamma = 0.92$ and $\gamma' = 0.89/\sigma$, obtained based on the values used by Lima *et al.* (2023) and tuned via trial and error based on the control behavior. Specifically, we needed to modify γ' compared to the previous work because the prevailing densities increase due to the assumption of lower free-flow speed when there is an additional lane.

The proposed control logic (CLS) achieved a Total Travel Time (TTT) of 174.1 h, while the optimal control (OCS) resulted in a TTT of 173.8 h, both improving by around 54.7% over the no-control scenario (NCS) with 384.2 h. The Total Traveled Distance was 17,548.81 km in all scenarios, confirming a fair comparison. Figure 3 presents the upstream and ramp demand, the upstream and critical density, and downstream capacity for all scenarios, along with actuations for the control scenarios. Right after 20 minutes of simulation the density

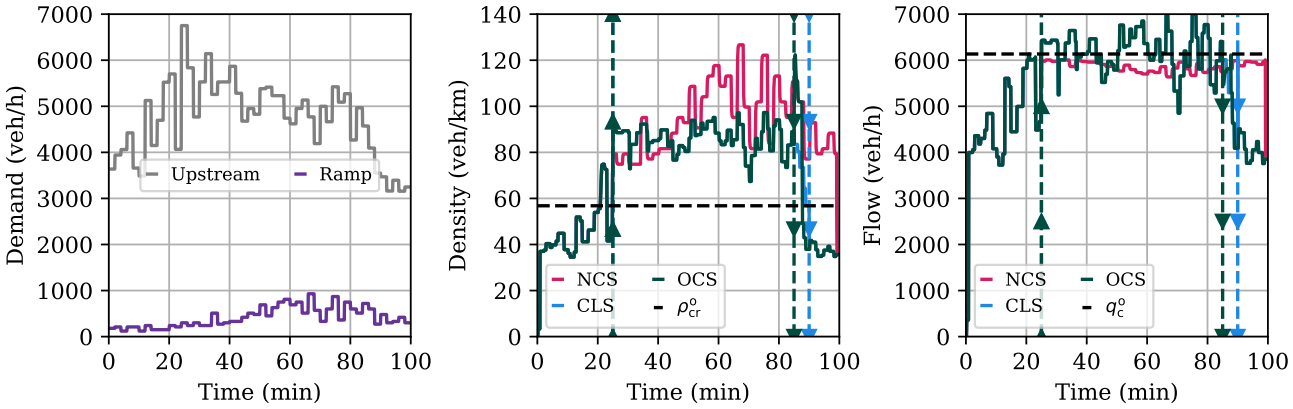


Figure 3: Demand at the entrances, bottleneck upstream density, and bottleneck downstream flow

exceeds ρ^{o}_{cr}. In NCS, the density keeps increasing until around 70 minutes, when the demand starts reducing and the congestion dissipating. In the NCS, CD occurs yielding flows below capacity while congested. Differently, in the OCS and CLS there is a switch in the lane configuration in link L_2 to 4 lanes and lower speed limit at 25 minutes of simulation. Densities remain around ρ^{m}_{cr} and flow around the capacity. In fact, both scenarios are identical until near the end of the simulation when the OCS restores the original configuration 5 minutes earlier.

5. CONCLUSIONS

This work introduced and evaluated a simple, real-time switching control logic for dynamic lane configuration (DLC) on freeways aiming at alleviating congestion during peak periods by increasing the number of lanes within the same road width. The CTM simulation demonstrated control logic effectiveness by reducing TTT by about 54% compared to the no-control scenario, and matching the optimal control result.

In future work, the approach by Lima *et al.* (2024) could be used to extend the control logic to account for more than one reduction of lane width for the creation of even more lanes. DLC could also be used along with tidal lane control (Ampountolas *et al.*, 2020) by expanding capacity for the direction with more demand and adding more flexibility into the concept by also allowing changes in lane width in addition to just switch the direction of a specific lane. Implementation and safety of these approaches must be subject to additional research.

Acknowledgements

This work was supported by the National Council for Scientific & Technol. Devel. (CNPq) under grant 314561/2023-4.

REFERENCES

Ampountolas, K.; J. A. dos Santos and R. C. Carlson (2020) Motorway tidal flow lane control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 21, n. 4, p. 1687–1696.

Chandra, S. and U. Kumar (2003) Effect of lane width on capacity under mixed traffic conditions in India. *Journal of Transportation Engineering*, v. 129, n. 2, p. 155–160.

Das, S. and P. N. Suganthan (2011) Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 15, n. 1, p. 4–31.

Kontorinaki, M.; A. Spiliopoulou; C. Roncoli and M. Papageorgiou (2017) First-order traffic flow models incorporating capacity drop: Overview and real-data validation. *Transportation Res. Part B: Methodological*, v. 106, p. 52–75.

Lima, E. R. de; R. C. Carlson; E. R. Müller; K. Ampountolas and F. A. de Souza (2023) Switching logic for the dynamic hard shoulder running on motorways. *37º ANPET - Congr. de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Santos, SP, Brazil.

Lima, E. R. de; R. C. Carlson; F. A. de Souza and K. Ampountolas (2024) Switching logic for controlled all-lane running on motorways. *38º ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Florianópolis, Santa Catarina, Brazil.

Rostami-Shahrbabaki, M.; M. Keyvan-Ekbatani; K. Bogenberger and M. Papageorgiou (2025) Dynamic lane configuration for balancing demand and capacity in motorways. *Proc. 104th TRB Annual Meeting*. Washington, D.C., USA.

TRB (2022) *Highway Capacity Manual 7th Ed.: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. TRB, National Academies Press.

Rodrigo Castelan Carlson (rodrigo.carlson@ufsc.br)
Dept. of Automation and Systems Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, 88040-900, Brazil
Felipe Augusto de Souza (fel.asouza@gmail.com)
Energy Systems, Argonne National Laboratory, Lemont, IL 60439 USA
Konstantinos Ampountolas (k.ampountolas@uth.gr)
Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, Volos 38334, Greece

Análise e controle de tráfego

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE NÍVEIS DE SERVIÇO EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES OBTIDOS POR MEIO DAS METODOLOGIAS DO HCM-6 E DO HCM-7

Davi Antônio Avelar Brêtas[1, 2], **Isabelle Giovanna Pereira Moreira**[1], **Rodrigo Max Mendes Reis**[1]
[1]ENGETRAF Consultoria e Projetos Ltda., [2]Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
Este trabalho compara as metodologias de avaliação de capacidade e níveis de serviço para rodovias de pista simples das edições 6ª (2016) e 7ª (2022) do *Highway Capacity Manual* (HCM). O objetivo principal foi identificar as modificações e os impactos práticos das diferenças entre as versões, como a classificação viária e a segmentação. Para isso, aplicou-se as metodologias em um estudo de caso da BR-030/BA, analisando seu desempenho no 1º e 10º ano de projeto, considerando taxas de crescimento de tráfego por tipo veicular. Os resultados obtidos por ambas as metodologias são apresentados e discutidos, evidenciando que os níveis de serviço obtidos com o HCM-7 são superiores aos encontrados com o HCM-6.

1. INTRODUÇÃO

O *Highway Capacity Manual* (HCM) é reconhecido mundialmente como a principal referência para a análise e avaliação do desempenho operacional de vias e interseções (Elefteriadou, 2024). Ao longo de suas edições, o manual tem evoluído para incorporar novas pesquisas e avanços tecnológicos, buscando aprimorar a precisão das avaliações e refletir as complexas dinâmicas do tráfego (TRB, 2016). Dentre as diversas tipologias viárias, as rodovias de pista simples (*two-lane highways*) apresentam desafios particulares para a análise de desempenho operacional, em razão da complexidade das interações entre veículos, sobretudo quanto às restrições de ultrapassagem impostas pela presença de veículos lentos e à dinâmica do tráfego bidirecional (Pereira e Bessa Jr.; 2017). Estudos como o de Santos e Bessa Jr. (2024) evidenciam essas dificuldades ao comparar métodos distintos de cálculo do nível de serviço aplicáveis a esse tipo de via.

A transição da 6ª edição (HCM-6), publicada em 2016, para a 7ª edição (HCM-7), lançada em 2022, introduziu modificações significativas nas metodologias de análise para rodovias de pista simples. Essas visam aprimorar a representação das condições operacionais reais e fornecer ferramentas mais robustas para engenheiros e planejadores de transporte (Washburn *et al.*, 2018). O presente trabalho tem como objetivo principal comparar as metodologias do HCM-6 e do HCM-7, focando nas diferenças conceituais e nos impactos práticos na avaliação de capacidade e níveis de serviço, por meio de um estudo de caso aplicado a um trecho da BR-030/BA. A análise abrangerá o desempenho da rodovia para o 1º e 10º ano de projeto, considerando taxas de crescimento de tráfego, e discutirá as implicações dos seus resultados.

2. PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE AS METODOLOGIAS HCM-6 E HCM-7 PARA RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

A evolução do HCM-6 para o HCM-7 trouxe alterações relevantes que impactam diretamente nos resultados obtidos (Santos e Bessa Jr., 2024). Dentre as principais mudanças, tem-se a revisão na classificação das rodovias, uma vez que o HCM-6 (TRB, 2016) classifica essas em três classes (I, II e III), baseando-se nas suas características funcionais em termos de segmentos rurais e urbanizados e na hierarquização viária. Em contraste, o HCM-7 (TRB, 2022) adota uma classificação mais simplificada, focando em duas categorias principais, relacionadas às velocidades regulamentadas do segmento, sendo rodovias de alta velocidade (maior ou igual a 50 mi/h (80,46 km/h)) e rodovias de baixa velocidade (menor que 50 mi/h (80,46 km/h)). Essa mudança visa facilitar a aplicação do método, tornando-o menos suscetível a ambiguidades interpretativas e mais direto em sua utilização.

Outra modificação importante refere-se à metodologia de segmentação das rodovias, que constitui um ponto crucial de divergência entre as duas edições. O HCM-6 recomendava a divisão da rodovia em segmentos homogêneos com base em variáveis como volume de tráfego, composição da frota, greide e oportunidades de ultrapassagem, o que resultava em trechos relativamente longos. Já o HCM-7 introduz uma segmentação mais detalhada e fragmentada, onde os segmentos são definidos em função das mudanças nas zonas de ultrapassagens permitidas e proibidas, variações de greide e a presença de curvas horizontais. Essa abordagem, embora aumente a complexidade da análise, parece permitir uma avaliação mais precisa e localizada do

desempenho operacional da rodovia, como demonstrado por Santos e Bessa Jr (2024) em estudo comparativo.

No que diz respeito à adoção dos Fatores de Equivalência de Veículos (FEV), a 6ª edição faz uso extensivo desses para converter os volumes de veículos pesados, como caminhões e ônibus, em unidades equivalentes de veículos de passeio. Esses fatores variavam de acordo com o tipo de terreno e a proporção de veículos pesados no fluxo. A 7ª edição, por sua vez, revisou tanto a aplicação quanto os valores desses fatores e, em algumas situações, passou a integrar o impacto dos veículos pesados diretamente nas equações de desempenho. Essa mudança visa uma representação mais realista da capacidade e do nível de serviço, reduzindo a dependência de conversões explícitas (Washburn et al., 2018).

A análise por sentido de tráfego, já presente no HCM-6, foi mantida no HCM-7. Ambas as versões reconhecem que as condições operacionais e as oportunidades de ultrapassagem podem variar significativamente entre os sentidos de tráfego. No entanto, o HCM-7 reforça ainda mais a importância de se avaliar individualmente cada direção, a fim de se obter uma compreensão mais abrangente do desempenho viário.

Por fim, foram alteradas as medidas de desempenho entre as versões do HCM, sendo utilizado na 6ª edição as medidas de "velocidade média de viagem" (para rodovias enquadradas na "Classe I"), "percentual do tempo gasto seguindo" (para rodovias enquadradas nas "Classe I ou II") e "porcentagem de velocidade de fluxo livre" (para Rodovias enquadradas na "Classe III"), e na 7ª edição a "densidade de veículos em pelotões" (FD). Tal alteração dificulta a comparação direta entre os resultados obtidos, restringindo a comparação aos níveis de serviço obtidos.

3. ESTUDO DE CASO: BR-030/BA

Para efeito de comparação de resultados obtidos com o emprego das duas metodologias, desenvolveu-se um estudo de caso na rodovia BR-030/BA. Esta, por sua vez, é uma rodovia federal que atravessa os estados de Goiás, Minas Gerais e Bahia e desempenha um papel estratégico no desenvolvimento econômico e social da Bahia conectando importantes municípios e regiões agrícolas e facilitando o escoamento de produtos do Centro-Oeste brasileiro.

O estudo de caso foi conduzido em um trecho da rodovia BR-030/BA a ser pavimentado (previsão de conclusão no ano de 2028), com extensão de 190,80 km, conectando a Divisa GO/BA ao entroncamento com a BR-135/BA (Cocos). A análise considerou a operação da rodovia no 1º e 10º ano de projeto, com as seguintes taxas de crescimento anual para diferentes classes veiculares: Motocicletas: 3,10%; Automóveis + Utilitários: 3,28%; Ônibus: 2,88%; e, Caminhões: 3,47%, definidas em estudos específicos.

Para definição dos fatores "K" e "FHP" e do volume médio diário de tráfego - VMD atual dos segmentos da rodovia, foram realizadas pesquisas de contagens volumétricas, classificatórias e direcionais de veículos automotores em 7 postos com duração variando de 3 a 7 dias no período integral de 24 horas. Foram ainda realizados postos de origem e destino que permitiram avaliar a parcela de tráfego desviado que passará a circular no trecho em estudo após a conclusão das obras de pavimentação.

Para a realização das análises o trecho da BR-030 foi dividido em dois segmentos, devido às características de volumes de tráfego, sendo o primeiro com extensão de 90,60 km e o segundo com 99,40 km de extensão. Para estes foram obtidos os seguintes VMD´s, apresentados na Tabela 1.

As características geométricas e operacionais consideradas no trecho estudado foram: Relevo: Ondulado; Velocidade Regulamentada: 100 km/h; Velocidade de Fluxo Livre: 116 km/h; Número de Faixas por Sentido: 1 (uma); Largura da Faixa de Rolamento: 3,60 m; Largura do Acostamento: 3,00 m.

Tabela 1: VMD´s obtidos para o trecho em estudo

Segmento	Rodovia	Sentido	Fator "K"	1º Ano (2028)			10º Ano (2037)		
				VMD	Veh/h	% Veículos Pesados	VMD	Veh/h	% Veículos Pesados
1	BR-030	Crescente	0,085	1084	92	34	1456	124	34
		Decrescente	0,085	1012	86	40	1360	115	39
2		Crescente	0,085	1349	115	18	1802	153	18
		Decrescente	0,085	1228	105	21	1641	139	21

3.1. Análise com HCM-6

Para a aplicação da metodologia do HCM-6, o trecho da BR-030/BA foi dividido em 2 (dois) segmentos homogêneos em termos de tráfego (segmento 1 e 2), para a análise geral, sendo cada um destes analisados unidirecionalmente, tornando-se assim 4 segmentos. Além disso, foram identificados 8 (oito) segmentos de rampas específicas para avaliação, seguindo o critério que estabelece a análise de qualquer rampa com greide igual ou superior a 3,00% e extensão superior a 0,60 mi (i $\geq$3,0 e L > 0,6mi), onde i é a declividade em porcentagem e L é a extensão em quilômetros. Foi ainda considerado o percentual de não ultrapassagem de 40%. Desta forma, considerando-se a metodologia do HCM-6 foram analisados 12 segmentos.

3.2. Análise com HCM-7

A metodologia do HCM-7 foi aplicada utilizando o *software Highway Capacity Software* – HCS (versão 2025), que implementa fielmente os métodos e procedimentos documentados na 7ª edição do manual. A segmentação da rodovia resultou em um total de 676 segmentos, considerando cada sentido da via separadamente. Esse grande número de segmentos é um dos aspectos mais marcantes da atualização do manual, com os critérios de segmentação baseados em zonas de ultrapassagens permitidas e proibidas, variações de greide e curvas horizontais. Essa abordagem está alinhada com a discussão apresentada por Santos e Bessa Júnior (2024), que destacam o aumento significativo no número de segmentos e a complexidade analítica da nova versão.

Para tanto, devido ao nível de detalhamento dos segmentos necessários para o emprego da metodologia, foi desenvolvida uma aplicação no *Microsoft Excel*, com utilização do *Visual Basic,* de modo a permitir a realização das segmentações necessárias de maneira mais precisa, considerando as diversas especificidades dos dados do projeto do trecho. Após a segmentação, os dados foram formatados para permitir sua aplicação direta no *software* HCS, de forma a tornar o processo automatizado.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A comparação dos resultados obtidos através das metodologias do HCM-6 e HCM-7 para a BR-030/BA demonstram as implicações das diferenças metodológicas na avaliação do desempenho de rodovias de pista simples.

4.1. Resultados HCM-6

Para o segmento homogêneo 1, obteve-se o Nível de Serviço "B" no 1º ano de operação (2028), mantendo essa classificação até o 8º ano (2035). A partir do 9º ano (2036), após a pavimentação do trecho, o nível de serviço decresceu para "C", permanecendo assim até o final do horizonte de projeto (2037). Já o segmento 2, operará no Nível de Serviço "B" no 1º ano de operação (2028) e manteve-se nesse nível até o final do horizonte de projeto (2036). Tais resultados, dos segmentos 1 e 2, permaneceram inalterados para ambos os sentidos analisados. Para as rampas específicas de subida foram obtidos resultados similares a estes níveis de serviço.

4.2. Resultados HCM-7

A análise dos níveis de serviço com o HCM-7, utilizando o *software* HCS (versão 2025), apresentou resultados mais otimistas, em que todos os segmentos analisados, inesperadamente, operarão no Nível de Serviço "A" ao longo de todo o horizonte de projeto.

A Figura 1, a seguir, ilustra os resultados obtidos pelas diferentes edições do HCM de forma comparativa para o horizonte de projeto, a partir de uma média ponderada das medidas de desempenho, em função das extensões dos segmentos, e, consequentemente, dos níveis de serviços obtidos.

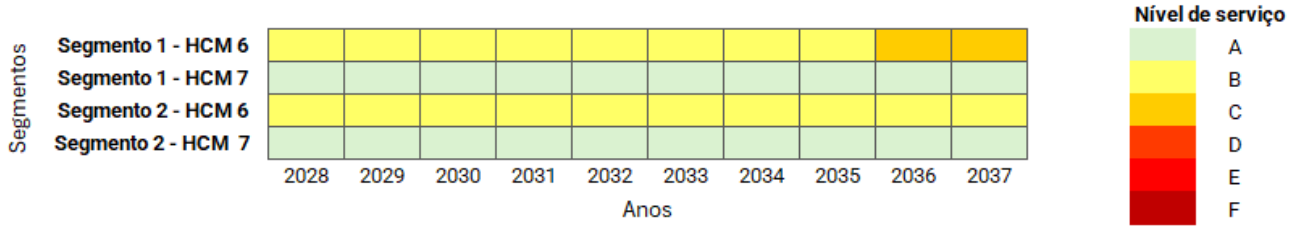


Figura 1: Resultados comparativos do nível de serviço

A principal conclusão é constatação da significativa divergência nos níveis de serviço obtidos pelas duas metodologias. Enquanto o HCM-6 indicou níveis de serviço "B" e "C" o HCM-7, com sua segmentação mais granular, projetou um desempenho operacional mais otimista, com todos os segmentos operando em Nível de Serviço "A", ao longo de todo o horizonte de projeto. Melhoria bastante significativa, como esta, foi também identificada em (Santos e Bessa Júnior, 2024). Essa diferença pode ser atribuída à maior precisão na representação das condições de ultrapassagem no HCM-7, que, ao detalhar mais a análise, pode identificar eficiências operacionais que não eram capturadas na abordagem mais macro do HCM-6. Outro aspecto que também pode ser considerado é que, a primeira segmentação realizada no procedimento do HCM-7 é a divisão dos segmentos de acordo com as zonas de ultrapassagem permitida e proibida, o que, de fato, pode subdividir segmentos específicos de rampa de subida, que no contexto de rodovias com elevados percentuais de veículos comerciais (coletivo + carga), como a brasileira, pode atenuar os resultados obtidos.

Desta forma, a adoção das diferentes metodologias aqui analisadas, no contexto de rodovias de pista simples, podem influenciar diretamente os resultados obtidos, necessitando, portanto, de investigações mais aprofundadas e adaptações, conforme realizado por Oliveira e Bessa Jr. (2022). Não se pode concluir no presente trabalho qual a metodologia mais indicada para aplicação à realidade brasileira, porém recomenda-se, na elaboração de estudos futuros, uma análise ainda mais criteriosa e com cenários mais diversos para análise da sensibilidade de cada um dos parâmetros envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Elefteriadou, L. (2024). The Highway Capacity Manual (HCM) and Its Methods. In: An Introduction to Traffic Flow Theory. Springer Optimization and Its Applications, vol 84. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54030-1_6

Oliveira, J. K. S. e J. E. Bessa Jr. (2022) Adaptation of the HCM for the analysis of two-lane rural highways without passing lanes in Brazil. Transportes, v. 30, n. 3.

TRB (2016) Highway Capacity Manual (6ª ed.). Washington, D.C.: Transportation Research Board.

TRB (2022) Highway Capacity Manual (7ª ed.). Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Santos, I. V; Bessa Jr, J. E. (2024) Análise de intervenções de ampliação de capacidade em rodovias de pista simples. Transporte y Territorio, Buenos Aires, n. 31, p. 139–162, jul./dez. 2024. DOI: 10.34096/rtt.i31.12523. ISSN 1852-7175.

Washburn, S.S., Watson, D.; Bian, Z.; Luttinen, T.; Al-Kaisy, A.; Jafari, A.; Downlong, R.; Elias, A. (2018) Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance. Final Report for NCHRP Project 17-65 National Cooperative Highway Research Program, TRB, Washington, Web-Only Document 255.

MSc. Davi Antônio Avelar Brêtas (bretas.eng@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Av. Antônio Carlos, 6.627, Belo Horizonte, Minas Gerais.
Engetraf Consultoria e Projetos Ltda., Rua Gonçalves Dias, 229/301 – Belo Horizonte, Minas Gerais
Isabelle Giovanna Pereira Moreira (*isabellegpm@gmail.com)*
Engetraf Consultoria e Projetos Ltda., Rua Gonçalves Dias, 229/301 – Belo Horizonte, Minas Gerais
Rodrigo Max Mendes Reis (rodrigo.*mmreis@gmail.com)*
Engetraf Consultoria e Projetos Ltda., Rua Gonçalves Dias, 229/301 – Belo Horizonte, Minas Gerais

Análise e controle de tráfego

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ESTIMAÇÃO DE FATORES DE EQUIVALÊNCIA VEICULAR PARA MOTOCICLETAS EM INTERSEÇÕES SEMAFÓRICAS DE FORTALEZA

Daniel Nunes Magalhães Arruda[1], Manoel Mendonça de Castro Neto[1], José Elievam Bessa Júnior[2]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
O crescente volume de motocicletas em Fortaleza gera fluxos de tráfego heterogêneos, desafiando modelos convencionais que subestimam o impacto na capacidade viária. Esta proposta de dissertação de mestrado visa estimar fatores de equivalência veicular (FEQs) específicos para motocicletas, empregando a análises de regressão que envolvem *headways* de descarga, a partir de dados coletados por filmagens em vias interseções semaforizadas de Fortaleza. A estimação explorará os múltiplos fatores que influenciam o FEQ, como as relacionadas com o comportamento dos motociclistas, o grau de saturação e a geometria da via e a composição do tráfego. Como resultado, espera-se fornecer valores de FEQs para motocicletas, que são parâmetros importantes para modelagem do tráfego urbano de cidades como Fortaleza.

1. INTRODUÇÃO

As motocicletas assumiram um papel preponderante na mobilidade urbana de Fortaleza. Em 2025, elas representam mais de 28% da frota registrada, segundo dados do Departamento Estadual de Trânsito (Detran-CE) e constituem um meio de transportes muito presente na logística urbana e na mobilidade de milhares de usuários. Seja para o deslocamento ágil entre bairros ou como ferramenta essencial na crescente economia de entregas, a motocicleta é uma solução acessível e vital para a cidade. Contudo, essa proeminência tem um impacto significativo na segurança viária. A Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC), em seu Relatório Anual de Segurança Viária de 2023, aponta que os ocupantes de motocicletas foram as maiores vítimas fatais, correspondendo a 52,2% do total de óbitos no trânsito, um indicador crítico que se traduz em uma sobrecarga no sistema de saúde pública e em perdas humanas e sociais.

Para a área da modelagem do desempenho do tráfego urbano, o desafio reside no fato de que o comportamento dinâmico observado nas vias de Fortaleza, com motocicletas executando o comportamento de infiltração (trafegar entre as faixas), contrasta com as premissas dos modelos convencionais da teoria do fluxo de tráfego interrompido. Modelos de referência internacional, como o *Highway Capacity Manual* (TRB, 2022), baseiam-se em comportamentos dos usuários e fatores do sistema viários que não foram concebidos para essa realidade de tráfego heterogêneo. Ao desconsiderar o comportamento de infiltração, os modelos subestimam a capacidade das vias, seja em veículos/hora ou pessoas/hora, resultando em programações semafóricas inadequadas, projetos geométricos deficientes e, criticamente, uma incapacidade de prever e mitigar os pontos de conflito entre veículos.

A quantificação do impacto das motocicletas no tráfego urbano é um desafio, cuja compreensão passa pela estimação de Fatores de Equivalência Veicular (FEQ), que significa quantos unidades de carro de passageiro uma moto representa. Esse parâmetro adimensional normaliza o fluxo heterogêneo, sendo sua acurácia mandatória para a calibração de modelos de capacidade e de microssimulação (Demarchi, 2000). A complexidade na definição de FEQs para motocicletas, devido à sua capacidade de infiltração, foi evidenciada por estudos iniciais, como os de Mihn e Sano (2003) e Nakatsuji et al. (2001). Tais abordagens, de natureza macroscópica, produziram resultados divergentes, expondo a fragilidade de modelos que não capturam as interações diretas entre veículos.

A evolução das tecnologias de coleta de dados tem trazido abordagens microscópicas para estimativa dos efeitos de diferentes veículos, como as análises baseadas nos *headways* veiculares individuais, importante para estiamação de FEQs em interseções semaforizadas, pois os tempos entre veículos sucessivos estão relacionados com os atrasos dos veículos, principal medida de desempenho de interseções.

Chandra e Ghosh (2015) afirmam que o FEQ não é um valor fixo, e é influenciado por múltiplos fatores, incluindo a composição do tráfego, as condições do fluxo (como o nível de congestionamento e a velocidade) e a geometria da via (como a largura das faixas). Como esses fatores afetam o FEQ em interseções de Fortaleza ainda está por ser investigado.

No Brasil, manuais técnicos de referência, como o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito do DENATRAN (atual SENATRAN), propõem um Fator de Equivalência Veicular (FEQ) padrão de 0,5 para motocicletas em estudos de capacidade e programação semafórica (CONTRAN, 2014). Contudo, a necessidade de uma calibração local, em oposição à adoção de valores padrões, é amplamente corroborada por estudos empíricos em contextos de tráfego heterogêneo.

Pesquisas conduzidas em Manila, Filipinas (Quezon *et al*., 2021) e na cidade de Fortaleza (Torquato *et al*., 2020), encontraram valores de FEQ substancialmente inferiores: 0,24 e 0,21, respectivamente. Como contribuição em relação ao trabalho de (Torquato *et al*., 2020), esta pesquisa estimar FEQs em variadas interseções semaforizadas, com diferentes geometrias e condições operacionais. Isso possibilitará uma análise mais ampla e aprofundada.

É nesse contexto, entre a realidade operacional e a limitação técnica, que reside a lacuna do conhecimento a ser tratada na dissertação: a carência de FEQs que sejam específicos para Fortaleza e reflita o comportamento dos motociclistas. Diante desse cenário, o objetivo principal desta pesquisa de mestrado será estimar FEQs para motocicletas que reflita as condições de tráfego de Fortaleza, considerando o forte comportamento de infiltração dos motociclistas.

Para atingir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos: (i) coleta e modelagem dos *headways* de descarga, por tipo de veículo, nas interseções semaforizadas do estudo (ii) analisar e quantificar o efeito da infiltração de motocicletas na fluidez do tráfego. Estimar os FEQs das motos.

2. MÉTODO

A coleta de dados ocorrerá em aproximações de interseções semaforizadas, com variados níveis de volumes de tráfego e de participação de motocicletas. As gravações serão realizadas em dias úteis durante os horários de pico (matutino e vespertino), por meio de filmagens com câmeras de alta resolução posicionadas em pontos elevados. O objetivo é registrar a dissipação das filas sob variadas condições de fluxo, inclusive de saturação, que permite a extração dos *headways* de saturação, parâmetros fundamentais para o cálculo do FEQ em regime de fluxo interrompido.

Após a coleta, os dados brutos serão submetidos à extração e processamento. Em cada registro de vídeo, uma linha de referência transversal será fixada virtualmente sobre a imagem para estabelecer um ponto de medição padrão. Os vídeos serão então analisados para registrar o instante (*timestamp*) em que o eixo dianteiro de cada veículo cruza a referida linha, sendo cada veículo simultaneamente classificado como Veículo Leve (VL) ou Motocicleta (MC).

A fase subsequente consiste na análise dos *headways* e na aplicação de uma correção estatística para quantificar o impacto de cada tipo de veículo no fluxo. Inicialmente, o *headway* temporal é extraído para cada veículo e os dados são segmentados em quatro categorias baseadas no par líder-seguidor (VL-VL, VL-MC, MC-VL, MC-MC). Conforme a metodologia de Irwandi *et al*. (2025), a correção é mandatória, pois a influência dos veículos no consumo de tempo-espaço é assimétrica e as amostras de cada par são inerentemente desbalanceadas. O uso direto dos *headways* médios introduziria um viés estatístico, já que a condição ideal de equilíbrio entre os pares raramente é observada em campo. Para mitigar essa distorção, o método emprega um fator de correção que ajusta matematicamente os *headways* médios, aplicando uma ponderação que considera o desequilíbrio no número de observações. O resultado é um conjunto de *headways* estatisticamente corrigidos, constituindo a base para o cálculo acurado do Fator de Equivalência Veicular (FEQ).

3. CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

As contribuições esperadas desta pesquisa se dão tanto no âmbito científico como e técnico/profissional. No campo científico, a contribuição desta pesquisa se estabelece em duas frentes principais. Primeiramente, ela expande o conhecimento local ao avançar sobre estudos precursores, como o de Torquato (2019). Enquanto a análise anterior se concentrou em uma interseção, este trabalho se propõe a aumentar consideravelmente a base de dados, investigando múltiplos tipos de interseções semaforizadas. Essa abordagem permitirá analisar o impacto de diferentes configurações geométricas e operacionais, resultando em FEQs mais representativos para as diversas condições de tráfego de Fortaleza. Em segundo lugar, o estudo contribuirá ao avaliar,

empiricamente, a aplicabilidade de metodologia de Irwandi *et al*. (2025) para a realidade brasileira, constituindo um referencial metodológico para futuras investigações sobre a dinâmica de fluxos heterogêneos na região.

Do ponto de vista técnico-operacional, os FEQs resultantes desta dissertação servirão como parâmetros importantes para análises do tráfego urbano, nos níveis estratégico, tático e operacional. Isso propiciará técnicos da Autarquia Municipal de Trânsito (AMC), de demais órgãos gestores e de empresas de consultorias, construam e usem modelos, como os de microssimulação o VISSIM e o Aimsun Next, com maior grau de representatividade. O aumento do nível de realismo desses modelos, ao incorporar as motos por meio dos FEQs, se reflete em melhores análises e atividades, como a otimização de planos de controle semafórico, acarretando melhorias na fluidez do tráfego, e o dimensionamento mais eficiente de infraestruturas, a exemplo das áreas de espera exclusivas para motocicletas (motobox).

Agradecimentos
Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de mestrado, essencial para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume V – Sinalização Semafórica*. Brasília, DF: CONTRAN, 2014

Chandra, S., & Ghosh, S. (2015). Passenger car units for two-wheelers under heterogeneous traffic conditions. *Journal of Transportation Engineering*, v. 141, n. 12.

Demarchi, S. H. (2000) *Influência dos veículos pesados na capacidade e nível de serviço de rodovias de pista dupla*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Irwandi, Sutandi, A. C., & Mukti, E. T. (2025) The value of passenger car equivalent using the time headway method on urban roads. *Civil Engineering Dimension*, v. 27, n. 1, p. 33-46.

Mihn, H. T., & Sano, K. (2003) A new method for estimating passenger car equivalents for motorcycles. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 5, p. 1237-1246.

Nakatsuji, T., Hai, N. G., & Tanaboriboon, Y. (2001) Effects of motorcycle on capacity of signalized intersections. *Journal of Infrastructure Planning*, v. 18, n. 5, p. 935-942.

Quezon, E. C., et al. (2021) Determination of passenger car unit (PCU) for different vehicle types at signalized intersections in the city of Manila. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 770, n. 1.

Torquato, R. M. N., Maciel, M. S. C., & de Castro-Neto, M. M. (2020) Estimação do efeito de motocicletas na capacidade de interseções semaforizadas. *Transportes*, v. 28, n. 5, p. 220-234.

TRB (2022) *Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, 7. ed. Transportation Research Board, The National Academies Press, Washington, DC.

Daniel Nunes Magalhães Arruda (daniel.arruda@det.ufc.br)
Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)
Univ. Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Dept. Eng. De Transportes, Campus do Pici – Bl.703, Fortaleza, CE, Brasil
José Elievam Bessa Júnior (elievam@etg.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Dept. de Eng.de Transportes e Geotecnia, , Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Fatores de risco associados à Segurança Viária

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ACIDENTALIDADE FERROVIÁRIA NO BRASIL (2014–2024): UMA ANÁLISE HISTÓRICA E ESPACIAL

Marcela Fraga Nunes Pereira[1,2], Fábio Zanchetta[2], Mateus Tiago Andrade de Oliveira[1], Marco Aurélio Bezerra Diniz[3], Paulo César Marques da Silva[2]
[1]Agência Nacional de Transportes Terrestres, [2]Universidade de Brasília, [3]Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A.

RESUMO
Este estudo analisa a acidentalidade ferroviária no Brasil entre 2014 e 2024, com enfoque espacial e temporal, a partir de dados da ANTT. Para os registros georreferenciados - pós Resolução ANTT nº 5.902/2020 - aplicou-se a técnica de Estimativa de Densidade Kernel (KDE) no QGIS, enquanto os demais foram tratados por meio de análise estatística convencional. Identificaram-se 8.574 acidentes no período, com destaque para a MRS Logística, que, embora não lidere em frequência, apresentou os maiores índices de gravidade, atribuídos à intensa interação com áreas urbanas densas. Atropelamentos e abalroamentos concentrados em horários de pico revelam deficiências na segregação da via férrea. A análise evidenciou que os acidentes, embora em queda, permanecem estruturais e concentrados em regiões metropolitanas. Conclui-se que abordagens geoespaciais, aliadas à melhoria na categorização dos registros e segregação da infraestrutura, são essenciais para subsidiar políticas públicas e ações regulatórias mais eficazes voltadas à segurança ferroviária.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A efetividade e a segurança dos sistemas de transporte são pilares para o desenvolvimento socioeconômico de um país. No Brasil, o transporte ferroviário exerce papel estratégico, especialmente no escoamento de cargas de baixo valor agregado em longas distâncias, oferecendo vantagens logísticas e ambientais. Apesar de sua relevância, o sistema ferroviário nacional ainda enfrenta desafios operacionais e convive com acidentes recorrentes, os quais podem acarretar impactos sociais, econômicos e ambientais.

De acordo com dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), extraídos do Sistema de Acompanhamento e Fiscalização do Transporte Ferroviário (SAFF), mais de 600 acidentes foram registrados em 2024, resultando em aproximadamente 100 dias de interrupção e mais de 300 vítimas. Embora ainda elevado, esse número representa uma redução próxima de 20% em relação aos índices registrados em anos anteriores. Nesse sentido, a Resolução ANTT nº 5.902/2020 e, posteriormente, a promulgação da Lei nº 14.273/2021 representaram avanços importantes, ao instituírem a obrigatoriedade de comunicação georreferenciada de ocorrências ferroviárias, que até então eram alocadas na estação mais próxima, limitando a acurácia das análises espaciais.

A literatura reforça a importância da análise sistemática de acidentes como ferramenta de apoio à tomada de decisão em âmbito regulatório e operacional (SHAFABAKHSH et al., 2017; AUSTIN e CARSON, 2002). Apesar de o transporte ferroviário registrar, em média, menos acidentes do que os modos rodoviário e aéreo, os eventos que ocorrem costumam ser mais graves, a exemplo de descarrilamentos, abalroamentos e atropelamentos (CARVALHO, 2017; RIBEIRO, 2019). Estudos nacionais apontam que fatores como falhas humanas, interferência de terceiros e deficiências na infraestrutura são as principais causas dos sinistros, o que evidencia a necessidade de compreender sua distribuição espacial para a formulação de estratégias eficazes de mitigação (MIGUEL, 2020; COSTA, 2021).

Ferramentas de geoprocessamento vêm sendo utilizadas para mapear padrões de acidentalidade, destacando-se a técnica de Estimativa de Densidade Kernel (KDE), amplamente empregada na identificação de áreas críticas (AUSTIN e CARSON, 2002; LE et al., 2020). No Brasil, ainda são escassas as aplicações dessa abordagem ao setor ferroviário, embora estudos recentes já indiquem seu potencial no apoio ao planejamento regulatório e à gestão da segurança operacional (MIGUEL, 2020; SILVA; LIMA, 2022). A integração entre dados georreferenciados e métodos estatísticos espaciais tem se mostrado promissora para o diagnóstico preciso e acurado dos riscos e para a priorização de intervenções em trechos críticos da malha ferroviária.

Diante disso, este artigo tem como objetivo o uso de ferramentas de georreferenciamento e da técnica de Estimativa de Densidade Kernel (KDE) para identificar áreas de concentração de ocorrências (hotspots) e analisar a acidentalidade ferroviária em cruzamentos urbanos no Brasil, no período de 2014 a 2024. Busca-se, com isso, oferecer subsídios técnicos ao aprimoramento da segurança nas concessões ferroviárias e ao

planejamento de ações preventivas por parte dos operadores e órgãos reguladores.

2. MÉTODO

O método utilizado neste estudo foi estruturado em quatro fases principais. A primeira fase consistiu na coleta, organização e pré-processamento dos dados de acidentes ferroviários disponibilizados no site de dados abertos da ANTT (https://dados.antt.gov.br) e/ou por meio de solicitação de acesso ao Sistema de Acompanhamento e Fiscalização do Transporte Ferroviário (SAFF). Foram considerados registros ocorridos entre 2014 e 2024, contendo informações como data, natureza da ocorrência, gravidade, causa presumida, número de vítimas e localização.

Na segunda fase, os dados foram preparados para análise geoespacial. Para esta análise foram considerados apenas os dados georreferenciados no modelo definido pela Resolução ANTT nº 5.902/2020, ou seja, a partir do final de 2020, o que permitiu sua inserção direta de camadas vetoriais no QGIS. As informações tratadas foram processadas e organizadas com o apoio de planilha eletrônica, complementando a base de análise.

Na terceira fase, foi aplicada a técnica de Estimativa de Densidade Kernel (KDE) na ferrovia crítica, com o objetivo de identificar padrões de concentração de acidentes (*hotspots*). Essa análise foi conduzida no QGIS, utilizando raio de influência de 1.000 metros, por refletir a escala do risco urbano e, em sensibilidade (250–1.500 m), minimizar fragmentação e suavização. Por fim, a quarta fase compreendeu a sistematização e apresentação dos resultados por meio de mapas temáticos, gráficos e tabelas, analisando os dados quanto à gravidade, causa, natureza e horário de ocorrência. Além disso, foi realizada uma análise temporal considerando os últimos 10 anos destacando os trechos com maior incidência de acidentes e permitindo interpretações relevantes para subsidiar ações preventivas no setor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre 2014 e 2024, foram registrados 8.574 acidentes ferroviários no Brasil, com 1.187 óbitos e 2.485 feridos, evidenciando um cenário crítico de segurança operacional. Na Tabela 1 pode-se observar os dados compilados de todas as ferrovias.

Tabela 1: Acidentes registrados entre os anos de 2014 e 2024

Ferrovia	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Total
FCA	233	177	167	184	191	135	136	145	150	145	107	**1770**
RMO	45	51	18	28	36	38	14	23	20	4	2	**279**
RMS	194	288	184	201	217	276	233	214	266	198	172	**2443**
MRS	112	122	95	107	107	101	104	119	104	156	138	**1265**
RMP	108	130	79	74	100	102	92	78	105	95	100	**1063**
RMN	19	25	13	14	16	15	10	10	9	8	16	**155**
FTL	40	57	60	92	115	109	97	103	74	69	69	**885**
EFPO	1	4	2	2	4	4	2	0	0	2	1	**22**
EFVM	36	30	35	30	30	23	11	20	25	17	28	**285**
EFC	34	35	29	28	22	20	19	14	13	15	8	**237**
FNSTN	8	2	4	3	9	4	7	7	4	6	4	**58**
FTC	3	2	6	9	9	15	9	13	10	11	13	**100**
RMC	0	3	1	1	0	1	0	0	2	2	2	**12**
Total	**833**	**926**	**693**	**773**	**856**	**843**	**734**	**746**	**782**	**728**	**660**	**8574**

As ferrovias com o número mais elevado de acidentes no período foram a RMS (2443), FCA (1770) e MRS (1265). A FCA detém a maior extensão de malha ferroviária do país, com 7.856,8 km, seguida pela RMS, com 7.223,4 km; contudo, foi a MRS Logística que apresentou os indicadores mais críticos de gravidade. Embora não lidere em frequência, 32% dos acidentes na MRS resultaram em óbitos e 50% em feridos, contrastando com os índices da RMS, de 10% e 25%, respectivamente. Tal disparidade justificou o aprofundamento da análise sobre a MRS, cuja base de dados permitiu uma investigação mais robusta sobre causas, natureza, horários e impactos das ocorrências.

3.1. Análise da ferrovia crítica

3.1.1. Análise dos dados

Na MRS, 97% dos acidentes estão associados à interferência de terceiros (734 casos) e casos fortuitos (498). Entre 2016 e 2020, observa-se uma inversão entre essas categorias, sugerindo possível reclassificação nos registros, e não alteração real nas causas. Tal inconsistência evidencia fragilidades nos critérios de categorização, comprometendo a precisão e acurácia do diagnóstico.

Atropelamentos (777) e abalroamentos (455) predominam na MRS, sendo os primeiros responsáveis por 95% dos óbitos (378) e 66% dos feridos (422), evidenciando a intensa interação entre a ferrovia e áreas urbanas densas. A concentração de acidentes em horários como 9h, 12h e 18h sugere correlação com os fluxos urbanos típicos e aponta possível deficiência no isolamento da via férrea.

A análise operacional revela forte correlação entre o tipo de serviço e a interrupção dos serviços. Por exemplo, na ferrovia estudada os acidentes com trens de carga somaram mais de 2.500 horas de paralisação, representando grande impacto na operação. Também foram afetadas máquinas de serviço e, em escala inferior, autos de linha e locomotivas escoteiras. A predominância nas operações de carga ressalta o elevado custo econômico, decorrente da interrupção da cadeia logística e dos fluxos de transporte.

Os acidentes mais graves, com interrupção de linha, concentram-se em interferência de terceiros e casos fortuitos. Esses eventos comprometem a eficiência logística, reduzem a produtividade da ferrovia e geram elevados custos com atrasos e danos materiais.

Em resumo, a ferrovia MRS se destaca pela letalidade e gravidade dos acidentes, apesar de não ser a que mais registra eventos. A combinação entre alta densidade populacional, proximidade com áreas urbanas e recorrência de acidentes fatais sugere que esse trecho possa apresentar maior sensibilidade a eventos de risco, configurando-se como área potencialmente prioritária para intervenções. Além disso, sobreposição entre diferentes tipos de registros indica necessidade de padronização, de modo a aprimorar os diagnósticos e a formulação de políticas preventivas eficazes.

3.1.2. Análise espacial

A análise espaço-temporal dos acidentes na MRS, pelos mapas de calor anuais de 2020 a 2024 (Figura 1), mostra a formação crescente e consistente de hotspots em áreas urbanas. Isso reforça que a interação com áreas densamente povoadas é o principal fator ligado à frequência e gravidade dos acidentes.

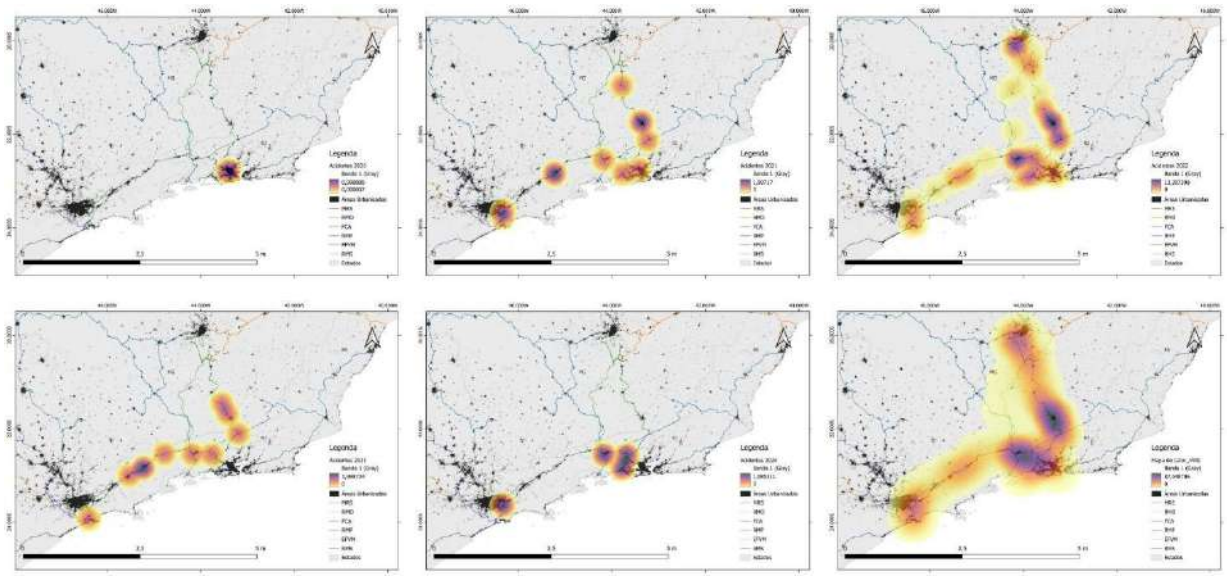


Figura 1: Mapas de calor anuais dos acidentes ferroviários registrados na MRS (2020 a 2024) e mapa consolidado dos 5 anos, respectivamente

Em 2020, o mapa espacial indicava alta concentração de acidentes na região metropolitana do Rio de Janeiro, com pouca dispersão em outras áreas. Essa configuração não decorre de menor mobilidade provocada pela pandemia, mas da limitação dos dados: a Resolução ANTT nº 5.902/2020 só exigiu o georreferenciamento a partir de dezembro, comprometendo a representatividade espacial desse ano. A série histórica, apresentada

acima, mostra que os acidentes na MRS se mantiveram estáveis, indicando que a baixa incidência cartográfica decorre da ausência de coordenadas, e não da redução de ocorrências. Ainda assim, o mapa ajuda a evidenciar a persistência de acidentes na região metropolitana do Rio de Janeiro.

A partir de 2021, os pontos de calor se reexpandem, formando clusters mais definidos. Em 2022, há dispersão ampla com conexões de calor entre MG, SP e RJ, indicando recuperação da mobilidade pós-pandemia. Já em 2023, os hotspots assumem padrão linear ao longo da malha da MRS, refletindo o retorno à dinâmica de risco pré-pandêmica, possivelmente ligado à retomada econômica, maior tráfego ferroviário e ocupação urbana irregular nas margens da ferrovia.

No mapa de 2024 observa-se um padrão mais concentrado, sugerindo eficácia parcial de intervenções locais ou variações anuais de menor escala. Ainda assim, o conjunto 2020–2024 evidencia que a distribuição dos acidentes permanece fortemente condicionada pela sobreposição da ferrovia com áreas urbanas densas.

A persistência dos hotspots em cinco anos mostra que os acidentes na MRS são fenômenos estruturais, relacionados à ocupação do solo e falhas na interface entre transporte e urbanismo. A pandemia de 2020 evidenciou que a redução temporária da mobilidade não elimina riscos estruturais, como demonstrado pela alta concentração de acidentes no Rio de Janeiro mesmo durante a crise sanitária.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Todas A análise realizada evidencia que a acidentalidade ferroviária no Brasil, embora tenha apresentado redução recente em números absolutos, ainda se configura como um problema estrutural, particularmente nas regiões de sobreposição entre malha ferroviária e tecido urbano denso. O caso da MRS, com menor número de acidentes que a RMS, mas com letalidade significativamente superior, ilustra como a gravidade dos eventos está mais relacionada à natureza da interação entre ferrovia e entorno do que apenas à frequência de ocorrências.

A preponderância de atropelamentos e abalroamentos em regiões metropolitanas, mesmo onde há presença de passagens em nível (PNs), sugere que apenas a existência física dessas travessias não é suficiente para garantir segurança. Torna-se fundamental investigar a condição técnica, visibilidade, sinalização e operação efetiva dessas PNs. Casos em que a infraestrutura aparenta estar adequada, mas os acidentes persistem, levantam hipóteses importantes sobre comportamento de risco, fatores culturais, zonas de conflito mal projetadas e deficiências de fiscalização.

Além disso, um aspecto que merece aprofundamento é a comparação entre ferrovias com diferentes padrões de acidentalidade, como a RMS e a MRS. Embora a RMS apresente maior número de eventos, sua taxa de letalidade é bastante inferior. Estudar mais detalhadamente as características físicas, operacionais e urbanas de ambas pode revelar elementos determinantes como: grau de segregação da via férrea, densidade populacional ao longo da malha, velocidade média dos trens, tipos de carga e estratégias de prevenção já implementadas. Essa comparação pode orientar a formulação de estratégias específicas de mitigação, adaptadas conforme o contexto da ferrovia – se majoritariamente urbana ou rural.

Outro vetor relevante, ainda pouco explorado, é a relação entre os acidentes e o tempo de interrupção da operação ferroviária, com seus respectivos impactos econômicos diretos e indiretos. Acidentes em regiões críticas da malha de carga, como no caso da MRS, têm potencial de desestabilizar cadeias logísticas inteiras, afetando não apenas o operador ferroviário, mas também a indústria, o comércio e os fluxos portuários. Investigações futuras podem buscar quantificar esse impacto a partir de métricas como tempo médio de retomada, tipo de carga afetada e custos logísticos associados a desvios e atrasos. Além disso, recomenda-se que estudos futuros também considerem as condições do tráfego rodoviário nas imediações dos pontos críticos e os impactos decorrentes dessa interação intermodal, especialmente em áreas urbanas densas, com alta sobreposição entre os modos de transporte.

Em síntese, este estudo reforça a importância do uso de dados georreferenciados para o diagnóstico da acidentalidade ferroviária, mas também evidencia a necessidade de aprofundar a análise de correlações entre variáveis operacionais, técnicas, sociais e territoriais. Somente com uma abordagem multifatorial e integrada será possível subsidiar políticas públicas e ações regulatórias mais eficazes para a segurança e eficiência do transporte ferroviário brasileiro.

Por fim, por se apoiarem em frequências históricas, os mapas KDE estão sujeitos à regressão à média e à suavização. Assim, os hotspots indicados têm caráter exploratório e demandam pesquisas futuras mais

aprofundadas com melhor caracterização de exposição e contexto operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT. (2019) *Análise de Impacto Regulatório SEI nº 1/2019*. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://participantt.antt.gov.br/Site/AudienciaPublica/VisualizarAvisoAudienciaPublica.aspx?CodigoAudiencia=383 (acesso em 07/07/2025).

ANTT. (2020) *Resolução nº 5.902, de 21 de julho de 2020*. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-5.902-de-21-de-julho-de-2020-268193971 (acesso em 07/07/2025).

Austin, R. D. e J. L. Carson (2002) An alternative accident prediction model for highway-rail interfaces. *Accident Analysis & Prevention*, v. 34, n. 1, p. 31–42.

Austin, R. e J. L. Carson (2002) Railroad accident injury severity: Transfer of analytical approaches from highway safety.

Transportation Research Record, v. 1784, p. 11–19.

Brasil. (2021) *Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021*. Institui o Marco Legal do Transporte Ferroviário. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, ano 160, n. 241, p. 13, 27 dez. 2021.

Carvalho, A. C. (2017) Diagnóstico de segurança nas ferrovias brasileiras. *Revista dos Transportes Públicos*, v. 39, n. 2,

p. 79–96.

Costa, J. H. (2021) Análise de falhas humanas em operações ferroviárias. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 3, n. 9.

Le, K. G.; P. Liu e L. T. Lin (2020) Determining the road traffic accident hotspots using GIS-based temporal-spatial statistical analytic techniques in Hanoi, Vietnam. *Geo-Spatial Information Science*, v. 23, n. 2, p. 153–164.

Miguel, D. A. A. (2020) Acidentes ferroviários no Brasil: análise comparativa com a União Europeia. In: *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, 34., 2020. *Anais...*, p. 210–221.

Oliveira, M. T. A. (2022) *Considerações sobre acidentalidade em ferrovias a partir de dados georreferenciados*. Trabalho de Projeto Final. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF.

Ribeiro, F. M. (2019) Acidentes ferroviários no Brasil: causas e medidas preventivas. *Caderno de Infraestrutura e Logística*, v. 5, n. 1, p. 12–22.

Shafabakhsh, G. A.; A. Famili e M. S. Bahadori (2017) GIS-based spatial analysis of urban traffic accidents: Case study in Mashhad, Iran. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 4, n. 3, p. 290–299.

Silva, P. R. e V. M. Lima (2022) Segurança ferroviária e geotecnologias: identificação de áreas críticas no estado de São Paulo. *Revista Transportes*, v. 30, n. 1, p. 55–64.

Marcela Fraga Nunes Pereira (marcela.pereira@antt.gov.br)
Agência Nacional de Transportes Terrestres, Superintendência de Transporte Ferroviário, Gerência de Regulação Ferroviária, SCES, trecho 3, lote 10, polo 8 do projeto orla, Brasília - DF, Brasil.
Fábio Zanchetta (fabio.zanchetta@unb.br)
Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – ENC, Bloco C, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF, Brasil
Paulo César Marques da Silva (pcmsilva@unb.br)
Universidade de Brasília (UnB), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – ENC, Bloco C, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília/DF, Brasil
Marco Aurélio Bezerra Diniz (marco.diniz@valec.gov.br)
Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., Gerência de Planejamento Orçamentário – SUPOF,
SAUS Quadra 1, Lotes 3 e 5, Bloco G, 10º andar, Asa Sul, Brasília/DF, Brasil
Mateus Tiago Andrade de Oliveira (mt.mateustiago@gmail.com)
Agência Nacional de Transportes Terrestres, Superintendência de Transporte Ferroviário, Gerência de Regulação Ferroviária, SCES, trecho 3, lote 10, polo 8 do projeto orla, Brasília - DF, Brasil.

¿CÓMO INFLUYEN LOS FACTORES SOCIALES EN EL RIESGO DE SINIESTRALIDAD VIAL URBANA? EVIDENCIAS EXPLORATORIAS DESDE MUNICIPIOS COLOMBIANOS

Ricardo José Peña Lindarte, Lenin Alexander Bulla Cruz, Aquiles Enrique Darghan Contreras, Andres Felipe Acosta Mora, Ivonne Daniela Carrasco Caro
Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN
La ocurrencia de siniestros viales está coligada a múltiples factores, por lo que este estudio tiene como objetivo identificar factores sociodemográficos que influyen en la siniestralidad vial en municipios colombianos. Se realizó un análisis de correlación de Spearman entre indicadores sociales y de siniestralidad, a partir de los resultados generados por un aplicativo técnico desarrollado durante un convenio interinstitucional. La matriz de correlación reveló asociaciones positivas entre el índice de feminidad, la proporción de población entre 16 y 59 años y el número de hurtos, con diferentes tipos de siniestros; especialmente, muertes en motocicleta, peatonales y siniestros viales totales. Asimismo, indicadores como pobreza multidimensional, presencia de grupos étnicos y proporción de menores de 15 años presentaron correlaciones negativas. Los resultados sugieren que el riesgo vial no se explica únicamente por condiciones económicas, sino por factores demográficos y territoriales que requieren enfoques diferenciados en la formulación de políticas de seguridad vial.

1. INTRODUCCIÓN

Las muertes y lesiones graves por siniestros viales no solo representan un problema de salud pública, sino también una cuestión de equidad y justicia social. Actualmente, los siniestros viales son la principal causa de muerte en niños y jóvenes a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023). En 2019, el 93 % de las muertes por traumatismos relacionados con el tránsito ocurrieron en países de ingresos bajos y medianos, alcanzando un total estimado de 1,3 millones de fallecimientos; esta tendencia continúa en aumento, ya que se estima que, para 2030, los traumatismos por tránsito se convertirán en la séptima causa principal de muerte en el mundo (Ahmed et al., 2023).

En el caso colombiano, esta problemática adquiere una dimensión crítica. La siniestralidad vial constituye una de las principales causas de muerte en el país, especialmente en municipios intermedios, donde confluyen condiciones de infraestructura deficiente, escaso control institucional y contextos sociales altamente vulnerables. Entre enero y octubre de 2024, se registraron 6.707 víctimas fatales por siniestros viales, siendo los motociclistas y peatones los grupos más afectados. Ante este panorama, el Plan Nacional de Seguridad Vial 2022–2031 se posiciona como una estrategia fundamental para enfrentar esta realidad, al convocar a todos los actores responsables a implementar acciones orientadas a la prevención, mitigación y superación de los efectos de la siniestralidad, mediante una gestión integral de los factores de riesgo (Agencia Nacional de Seguridad Vial [ANSV], 2024).

Las externalidades negativas del transporte en vías urbanas, como las lesiones y muertes en siniestros viales, afectan de manera desproporcionada a peatones, ciclistas y motociclistas de bajos ingresos. Mientras que las zonas de mayores ingresos, y en proceso de gentrificación, suelen contar con mejor infraestructura ciclista protegida, las comunidades vulnerables y racializadas presentan tasas más altas de lesiones graves y muertes en la vía (Fox y Shahum, 2022; Rebentisch et al., 2019). Diversos estudios han evidenciado que las personas que residen en zonas socialmente desfavorecidas enfrentan condiciones de tránsito más peligrosas, producto del deterioro de la infraestructura vial, el mayor riesgo para peatones y ciclistas, y el acceso limitado a recursos de seguridad vial (Christie et al., 2025). Estas desigualdades también se manifiestan en los patrones de siniestralidad según el perfil sociodemográfico. Por ejemplo, Tapp et al. (2013) encontraron que los hombres jóvenes que viven en áreas socioeconómicamente vulnerables presentan un mayor riesgo de estar involucrados en siniestros viales, en comparación con sus pares de zonas más favorecidas. En esta misma línea, Kimberlee (2008) analizó el proyecto S*treets Ahead on Safety* en Birmingham (Reino Unido), el cual se implementó en respuesta a las elevadas tasas de lesiones de peatones infantiles en una comunidad vulnerable, compuesta mayoritariamente por población negra, asiática y de otras minorías étnicas.

Otro factor relevante en el análisis de la siniestralidad vial es la desigualdad demográfica. Variables como la edad, el sexo y los roles de género influyen de forma significativa en los niveles de exposición y riesgo. Investigaciones realizadas en Europa han demostrado que las mujeres presentan patrones diferenciados de

movilidad y vulnerabilidad, lo que conlleva implicaciones específicas en materia de seguridad vial (Visby & Lundholt, 2018). Además, ante siniestros de igual o similar gravedad, las mujeres tienen una mayor probabilidad de sufrir lesiones graves o fallecer en comparación con los hombres (Yan & Job, 2021).

Estas evidencias, junto con la falta de análisis detallados a escala municipal en Colombia, refuerzan la necesidad de estudios que examinen cómo se manifiestan estos factores sociales en los territorios**.** A partir de esta problemática, el presente artículo tiene como objetivo identificar factores sociales asociados al riesgo de siniestralidad vial en municipios colombianos, mediante un análisis de correlación entre indicadores sociales e indicadores de siniestralidad vial. Los hallazgos buscan aportar evidencia empírica para orientar estrategias de seguridad vial más integrales y ajustadas a las realidades sociales y territoriales del país.

2. METODOLOGÍA

De acuerdo con la clasificación propuesta por Hernández, Fernández, y Baptista (2014), este estudio corresponde a una investigación de enfoque cuantitativo, de tipo no experimental, con un diseño de investigación transversal y correlacional. Se busca examinar el grado de relación entre variables sociales estructurales y los niveles de siniestralidad vial registrados en municipios colombianos. Dado que no se parte de hipótesis causales estrictas, sino que se pretende identificar asociaciones preliminares entre variables para orientar futuros estudios o decisiones de política pública, se adopta un enfoque exploratorio complementario.

La unidad de análisis es el municipio, como entidad territorial, con condiciones sociales, institucionales y de movilidad propias. El estudio incluye 259 municipios colombianos priorizados por el Ministerio de Transporte en el marco del convenio interinstitucional 969 de 2023 con la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Facultad de Ingeniería. Estos fueron seleccionados mediante muestreo intencional, dado que representan aproximadamente el 75,31 % de la población total del país, de acuerdo con estudios derivados del proyecto (Fresneda et al., 2024). La priorización se fundamenta, en el enfoque del Sistema de Ciudades de Colombia, el cual identifica núcleos urbanos relevantes por sus relaciones funcionales, tamaño poblacional, función político-administrativa e importancia estratégica. Esta perspectiva permite focalizar el análisis en territorios con alta dinámica urbana y movilidad, lo que resulta clave para comprender los factores sociales asociados al riesgo de siniestralidad vial (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2014).

Los datos analizados corresponden a fuentes secundarias. Las variables sociodemográficas provienen principalmente del Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2018), mientras que los indicadores de siniestralidad se tomaron de las estadísticas del Observatorio Nacional de Seguridad Vial (Agencia Nacional de Seguridad Vial [ANSV], 2022). Si bien existe una diferencia temporal entre ambos conjuntos de datos, esta se justifica porque las variables sociales son de carácter estructural y presentan una alta estabilidad en el corto plazo. Por tanto, su uso para evaluar asociaciones con fenómenos viales recientes resulta válido dentro del enfoque transversal y exploratorio de este estudio.

El análisis incluyó indicadores sociales y territoriales vinculados a composición demográfica, condiciones socioeconómicas, cobertura educativa y conflictividad urbana. Como variables dependientes se consideraron los principales indicadores de siniestralidad vial, diferenciados por tipo de actor involucrado y por presencia de víctimas. La descripción completa de las variables utilizadas se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Descripción de las variables analizadas para el caso de estudio

Código variable	Descripción	Año
SOC_TP_2018	Total de población	2018
SOC_IF_2018	Índice de feminidad (mujeres por cada 100 hombres)	2018
SOC_%<15_2018	% de personas menores de 15 años	2018
SOC_%16a59_2018	% de personas entre 16 y 59 años	2018
SOC_%>60_2018	% de personas mayores de 60 años	2018
SOC_NBI_TotalMunicipio_Prop-NBI_2018	% de personas en NBI	2018
SOC_NBI_TotalMunicipio_Prop-Miseria_2018	% de personas en miseria	2018
SOC_NBI_TotalMunicipio_Comp-Hacinamiento_2018	Total Municipio NBI % Hacinamiento	2018
SOC_NBI_TotalMunicipio_Comp-DepEconomica_2018	Total Municipio NBI % dependencia económica	2018
SOC_PM_TotalMunicipio_2018	Total medida de pobreza multidimensional (IPM)	2018

SOC_%TPetnia_2018	% de población perteneciente a grupos étnicos	2022
SOC_NroHurtos_2022	Número total de hurtos reportados por municipio	2022
SOC_CoberturaBrutaEdu_2022	Cobertura bruta de educación	2022
MOV_THERIDOS_2022	Número total de siniestros con heridos	2022
MOV_TMUERTOS_2022	Núm. total de siniestros con muertos	2022
MOV_MPEAT_2022	Núm.. total de peatones muertos en siniestros viales	2022
MOV_MBICI_2022	Núm. total de biciusuarios muertos en siniestros viales	2022
MOV_MMOTO_2022	Núm. total de usuarios de moto muertos en siniestros viales	2022
MOV_MVEH_2022	Núm. total de usuarios de vehículo muertos en siniestros viales	2022
MOV_MOTRO_2022	Núm. total de otros usuarios muertos en siniestros viales	2022
MOV_MTHOM_2022	Núm. total de hombres muertos en siniestros viales	2022
MOV_MTMUJ_2022	Núm. total de mujeres muertos en siniestros viales	2022

Para el análisis, se empleó un aplicativo desarrollado en lenguaje R mediante la librería Shiny, el cual permite visualizar y comparar indicadores, explorar relaciones bivariadas y generar automáticamente matrices de correlación. El coeficiente utilizado fue el de Spearman, una técnica estadística no paramétrica que permite evaluar la asociación monótona entre dos variables ordinales o continuas, sin asumir una distribución normal de los datos, y que es adecuada cuando las variables presentan asimetrías o no cumplen los supuestos de linealidad y homocedasticidad, como fue el caso en este estudio, evidenciado mediante la inspección visual de los histogramas de densidad generados por el aplicativo (Mukaka, 2012). Se consideraron de interés aquellas correlaciones cuyo coeficiente fuera igual o superior a ±0.40, interpretadas como asociaciones de magnitud moderada. Los resultados se presentan mediante una matriz de correlación codificada por color y complementada con el análisis interpretativo de las asociaciones más relevantes.

3. RESULTADOS

Con el objetivo de identificar asociaciones significativas entre los indicadores sociales y los diferentes tipos de siniestros viales, se realizó un análisis de correlación de Spearman. Este análisis se aplicó a datos municipales que integran indicadores sociodemográficos con registros de siniestralidad vial, correspondientes al año 2022. La figura 1 sintetiza las correlaciones obtenidas mediante el aplicativo, donde los valores más cercanos a 1 indican asociaciones positivas fuertes, mientras que los cercanos a -1 representan asociaciones negativas. El análisis se centró en aquellas correlaciones con coeficientes iguales o superiores a ±0.40, consideradas de magnitud moderada y, por lo tanto de perspectiva exploratoria.

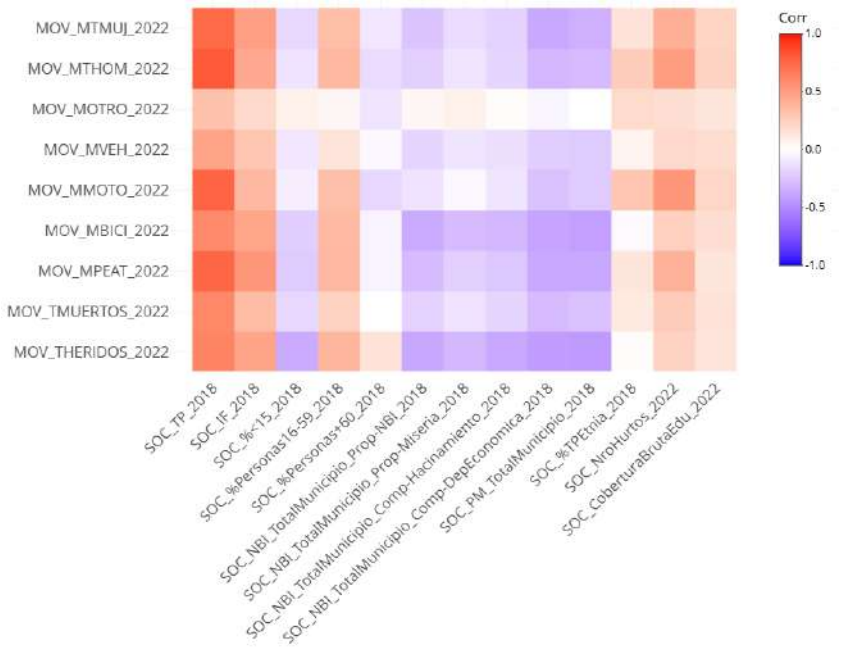


Figura 1: Matriz de correlación de Spearman para variables sociodemográficas y de siniestralidad vial

3.1. Factores sociales con correlación positiva

Las variables que se correlacionan positivamente con la siniestralidad vial son principalmente demográficas.

3.1.1. Índice de feminidad y siniestralidad (SOC_IF_2018)

El índice de feminidad muestra correlaciones positivas moderadas con la mayoría de los indicadores de siniestralidad, especialmente con las muertes en bicicleta (ρ = 0.46), peatonal (ρ = 0.53) y el total de siniestros con heridos (ρ = 0.47). Este hallazgo sugiere una posible relación entre la proporción de mujeres en el territorio y su exposición a entornos viales de alto riesgo; lo cual coincide con estudios que identifican una mayor vulnerabilidad en mujeres ante siniestros de igual gravedad (Yan & Job, 2021).

3.1.2. Estructura etaria activa (SOC_%16a59_2018)

La proporción de población en edad productiva (16 a 59 años) mostró correlaciones positivas débiles con todos los indicadores de siniestralidad analizados, en especial con el total de siniestros viales con heridos (ρ = 0.38), muerte de peatones (ρ = 0.37), biciusuarios (ρ = 0.36), y hombres (ρ = 0.37).

3.1.3. Hurtos como indicador de entornos inseguros (SOC_NroHurtos_2022)

El número de hurtos reportados en cada municipio durante el 2022 presentó correlaciones positivas moderadas con diversos indicadores de siniestralidad vial, en especial con las muertes de motociclistas (ρ = 0.53), muertes de hombres (ρ = 0.50) y muertes de peatones (ρ = 0.40). Estos resultados podrían reflejar una relación entre contextos urbanos con mayor conflictividad delictiva y niveles más altos de riesgo vial, posiblemente asociados a dinámicas de concentración poblacional, exposición modal o informalidad en la movilidad.

3.1.4. Tasa de población por municipio (SOC_TP_2018)

El total de población por municipio presentó correlaciones positivas fuertes con casi todos los indicadores de siniestralidad vial analizados, con coeficientes que oscilan entre 0.59 y 0.80. La única excepción fue la variable de muertes de otros actores viales en siniestros viales, con una correlación menor (ρ = 0.32). Este comportamiento era previsible, dado que una mayor población implica, una mayor exposición a los eventos de tránsito y, por tanto, una mayor probabilidad de ocurrencia de siniestros.

3.2. Factores sociales con correlación negativa

Los factores que se correlacionan negativamente con la siniestralidad vial son esencialmente sociales.

3.2.1. Índice de Pobreza multidimensional (SOC_PM_TotalMunicipio_2018)

El índice de pobreza multidimensional presentó correlaciones negativas moderadas con algunos indicadores de siniestralidad vial. Se observó una relación inversa con el número de siniestros viales con heridos (ρ = –0.43), muerte de peatones (ρ = –0.37) y biciusuarios (ρ = –0.41). Esto sugiere que, en los municipios con mayores niveles de pobreza multidimensional, la ocurrencia de siniestros graves tiende a ser menor, posiblemente por una menor exposición modal, nivel de motorización o intensidad del tránsito. Estos hallazgos refuerzan la idea de que el desarrollo económico puede estar asociado a una mayor exposición al riesgo vial, más que a la pobreza en sí.

3.2.2. NBI - Dependencia económica (SOC_NBI_TotalMunicipio_Comp-DepEconomica_2018)

La variable de dependencia económica, que forma parte del conjunto de necesidades básicas insatisfechas, también mostró asociaciones negativas moderadas con los indicadores de siniestralidad. Presentó correlaciones negativas con el número de siniestros con heridos (ρ = –0.42), muerte de peatones (ρ = –0.37), biciusuarios (ρ = –0.39) y de mujeres (ρ = –0.37). Estos resultados indican que, en municipios con mayores cargas económicas por dependencia poblacional, los niveles de exposición al tránsito son menores. Esto plantea que la vulnerabilidad estructural no necesariamente se traduce en mayor riesgo vial.

3.2.3. Proporción de población con NBI (SOC_NBI_TotalMunicipio_Prop-NBI_201)

La proporción total de población con al menos una necesidad básica insatisfecha mostró correlaciones negativas débiles pero consistentes con algunos indicadores de siniestralidad, como el número siniestros con heridos (ρ = –0.38) y muerte de biciusuarios (ρ = –0.36). Aunque en menor magnitud que las anteriores, estas asociaciones siguen el mismo patrón y aportan evidencia para cuestionar la idea de que los territorios más pobres presentan mayores niveles de siniestralidad vial. En cambio, los municipios más desarrollados, con mayor circulación vehicular y movilidad activa, podrían ser los que enfrentan un mayor riesgo.

4. CONCLUSIONES

Estos hallazgos cuestionan la noción tradicional de que el riesgo vial está determinado, principalmente, por condiciones de pobreza o carencias estructurales dado su coeficiente de correlación entre -0.37 y -0.43, y sugieren la necesidad de enfoques más integrales que consideren los patrones de exposición, las dinámicas territoriales, las brechas de género dada su correlación de aproximadamente 0.5 y edad en la movilidad de aproximadamente 0.36. Las políticas de seguridad vial deben, por tanto, incorporar estrategias diferenciadas según el perfil sociodemográfico de cada territorio, priorizando intervenciones en zonas con alta movilidad laboral informal y entornos urbanos con altos niveles de inseguridad ciudadana.

Los resultados indican que la siniestralidad vial en municipios colombianos se asocia más con factores demográficos y de contexto que con la pobreza estructural. Esto resalta la necesidad de enfoques de seguridad vial que consideren género, entorno urbano y dinámicas territoriales.

Futuras investigaciones podrían profundizar en el análisis mediante enfoques multivariados, espaciales y temporales que permitan comprender mejor la dinámica del riesgo vial. Además, se sugiere complementar los estudios cuantitativos con enfoques cualitativos que exploren las experiencias de grupos vulnerables y evaluar el impacto de políticas locales, integrando datos de movilidad.

Agradecimientos

Este artículo se deriva del trabajo realizado en el marco del convenio interadministrativo 969 de 2023, suscrito entre el Ministerio de Transporte y la Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Ingeniería. Agradecemos a las instituciones por el acceso a los datos, los insumos técnicos y el acompañamiento en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2024). *Seis de los diez meses transcurridos en 2024 registran reducción de fallecidos por siniestros viales en Colombia | ANSV*. https://ansv.gov.co/es/prensa-comunicados/11987

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2022). *Observatorio Nacional de Seguridad Vial: Informe anual 2022*. Bogotá: ANSV. Recuperado de https://ansv.gov.co/observatorio

Ahmed, S. K., Mohammed, M. G., Abdulqadir, S. O., El-Kader, R. G. A., El-Shall, N. A., Chandran, D., Rehman, M. E. U., & Dhama, K. (2023). Road traffic accidental injuries and deaths: A neglected global health issue. *Health Science Reports*, *6*(5), e1240. https://doi.org/10.1002/HSR2.1240;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Christie, N., Jones, S., & O'Toole, S. E. (2025). Systemic inequalities in road safety outcomes across high income countries and lessons from intervention approaches. *Journal of Transport & Health*, *41*, 102006. https://doi.org/10.1016/J.JTH.2025.102006

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Bogotá: DANE. Recuperado de https://www.dane.gov.co

Departamento Nacional de Planeación. (2014). Misión Sistema de Ciudades: Una política nacional para el sistema de ciudades colombiano con visión a largo plazo. Puntoaparte Bookvertising. ISBN 978-958-8575-64-3. https://osc.dnp.gov.co/administrator/components/com_publicaciones/uploads/Misin_Sistema_de_Ciudades.pdf

Fox, J., & Shahum, L. (2022). *Vision Zero: Equity Strategies for practitioners*. https://visionzeronetwork.org/wp-content/uploads/2022/07/Vision_Zero_Core_Elements_Summary.pdf

Fresneda, C., Vanegas, M., Mangones, A., & Peña, A. (2024). *Análisis multidimensional de municipios colombianos: Categorización y criterios territoriales*. Congreso Colombiano de Transporte y Tránsito (CCTT2024-2).

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. D. P. (2014). Metodología de la Investigación Hernandez Sampieri 6a Edición. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9).

Kimberlee, R. (2008). Streets ahead on safety: Young people's participation in decision-making to address the European road injury "epidemic." *Health and Social Care in the Community*, *16*(3), 322–328. https://doi.org/10.1111/j.1365-2524.2008.00762.x

Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal, 24*(3), 69–71. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3576830/

Rebentisch, H., Wasfi, R., Piatkowski, D. P., & Manaugh, K. (2019). Safe Streets for All? Analyzing Infrastructural Response to Pedestrian and Cyclist Crashes in New York City, 2009–2018. *Transportation Research Record*, *2673*(2), 672–685. https://doi.org/10.1177/0361198118821672;CTYPE:STRING:JOURNAL

Organización Mundial de la Salud. (2023). *Global status report on road safety 2023*.

Tapp, A., Pressley, A., Baugh, M., & White, P. (2013). Wheels, skills and thrills: A social marketing trial to reduce aggressive driving from young men in deprived areas. *Accident Analysis & Prevention*, *58*, 148–157. https://doi.org/10.1016/J.AAP.2013.04.023

Visby, R. H., & Lundholt, K. (2018). Gender Differences in Danish Road Accidents. *Transportation Research Record*, *2672*(3), 166–174. https://doi.org/10.1177/0361198118795005

Yan, W., & Job, S. (2021, March 7). *Road crashes affect women and men differently—here's why*. https://tinyurl.com/3z9j4hje

Ricardo José Peña Lindarte (rjpenal@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Lenin Alexander Bulla Cruz (labullac@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Aquiles Enrique Darghan Contreras (aqedarghanco@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Andrés Felipe Acosta Mora (afacostam@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Ivonne Daniela Carrasco Caro (icarrascoc@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

ANÁLISE DOS EFEITOS DA PRECIPITAÇÃO NO COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DE CONDUTORES: UM ESTUDO NATURALÍSTICO DE DIREÇÃO

Isabela Pereira Macedo Dutra[1], Mariana de Paiva[1], Jose Gustavo Venancio da Silva Ramos[1], Denis Biolkino de Sousa Pereira[1], Jorge Tiago Bastos[2]
[1]Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, [2]Universidade Federal do Paraná.

RESUMO
Este estudo investigou os efeitos da chuva no comportamento individual de condutores, com base em dados do NDS-BR de Curitiba (2019–2021). Foram analisadas variáveis de velocidade relativa, aceleração e frenagem de 12 condutores em condições com e sem chuva, associadas a dados pluviométricos do CEMADEN. Aplicaram-se testes de normalidade e o teste U de Mann-Whitney. Os resultados revelaram diferenças estatisticamente significativas, principalmente na velocidade, indicando que a chuva influencia o comportamento de parte dos condutores. Porém, os efeitos não foram homogêneos: alguns adotaram estratégias conservadoras, enquanto outros mantiveram padrões agressivos. Fatores como gênero, idade e tempo de CNH influenciaram na resposta à condição adversa, indicando a necessidade de abordagens personalizadas em políticas de segurança viária.

1. INTRODUÇÃO

A condução veicular é influenciada por aspectos internos ao condutor, como cognição, emoção e experiência, e por variáveis externas, incluindo as condições viárias e climáticas. Entre os fatores ambientais, destaca-se a precipitação como um elemento crítico, capaz de alterar a dinâmica da condução ao comprometer a aderência dos pneus ao pavimento, reduzir a visibilidade e gerar instabilidade no tráfego.

A literatura tem demonstrado que, em cenários de chuva, condutores tendem a adotar estratégias adaptativas, como a redução da velocidade e a ampliação da distância entre veículos (Ghasemzadeh e Ahmed, 2017; Rahman e Lownes, 2012). No entanto, essas respostas não são homogêneas entre os indivíduos, sendo moduladas por atributos pessoais como idade, gênero, tempo de experiência e percepção de risco (Guo e Fang, 2013; Bakhshi *et al.*, 2022). Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar o comportamento individualizado de condutores em condições com e sem chuva, buscando compreender como diferentes perfis respondem às mudanças climáticas adversas no ambiente de direção.

Sakhare *et al.* (2023) identificaram que a velocidade média dos veículos diminui conforme a intensidade da chuva, com variação individual na magnitude dessa adaptação. Ghasemzadeh e Ahmed (2017) observaram redução média de 4,8 km/h sob chuva intensa, mas com ampla variação entre condutores. Bakhshi *et al*. (2022) mostraram que motoristas experientes e mulheres tendem a adaptar melhor sua condução sob chuva, ao contrário de jovens. Guo e Fang (2013) classificaram condutores por nível de risco, associando maior risco a comportamentos agressivos e menor risco à condução estável.

Os Estudos Naturalísticos de Direção (*Naturalistic Driving Studies* – NDS) têm se consolidado como metodologia eficaz para investigar o comportamento em ambientes não controlados, observando decisões espontâneas e reações a estímulos ambientais e operacionais em tempo real (Van Schagen *et al.*, 2011). Os NDS também estão sendo utilizados para avaliar o comportamento, identificando perfis específicos de risco e avaliando como condutores de diferentes perfis sociodemográficos ajustam sua condução diante da chuva (Guo e Fang, 2013; Bakhshi *et al.*, 2022).

No Brasil, o Estudo Naturalístico de Direção (NDS-BR) busca mapear o comportamento dos condutores brasileiros e fornecer elementos para aprimorar políticas de segurança viária (Amancio, 2021), há estudos que investigam os efeitos do uso do celular (Bastos *et al.*, 2020) e da presença de radares e lombadas eletrônicas (Gadda *et al.*, 2021) sobre o comportamento do condutor.

2. MÉTODO

2.1. Obtenção de dados sobre comportamento de condutores e de Precipitação

Este estudo usou dados do NDS-BR, coletados por instrumentos instalados no veículo (notebook, inversor de voltagem, módulo GPS e três câmeras), que registraram, a cada segundo, variáveis como localização (latitude e longitude), data e hora, velocidade instantânea, aceleração, tempo de viagem, além de atributos da via e um código anonimizado para cada condutor. Apenas viagens que apresentaram simultaneidade de vídeo e sinal

GPS, com motor em funcionamento e freio de mão desativado, foram consideradas válidas.

A amostra foi composta por 12 condutores que trafegaram pela Região Metropolitana de Curitiba (PR) entre os anos de 2019 e 2021 e realizaram deslocamentos em condições com e sem chuva. A primeira viagem foi descartada, para permitir adaptação do condutor aos equipamentos.

Os dados de precipitação foram obtidos Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), que registram a posição da estação meteorológica, bem como a volume precipitado, atualizados a cada 10 min. (em chuva) e 60 min. (em tempo seco).

2.2. Análise dos Dados e Testes Estatísticos

Para integrar os dados de condução (registrados a cada segundo) com as informações pluviométricas (registradas a cada 10 min. sob chuva e 1h. em tempo seco), adotou-se como critério a atribuição do valor da precipitação da estação meteorológica (Butiatuvinha, Atuba, Boa Vista, Cachoeira, Pilarzinho, Santa Felicidade, São Braz, Umbará e Vista Alegre) mais próxima do veículo em cada segundo (distância euclidiana). Em 95% do tempo, os condutores estavam a menos de 10 km da estação.

Para a análise do comportamento dos condutores, foram definidas três variáveis: velocidade relativa (V), aceleração (A) e frenagem (F). A velocidade relativa foi calculada como a razão entre a diferença da velocidade instantânea do veículo e o limite da via, pelo próprio limite. Viagens com trechos com e sem chuva foram segmentadas em subviagens, e aquelas com duração inferior a 30 segundos foram descartadas.

As variáveis foram analisadas por condutor por meio de boxplots, que incluíram média, mediana e quartis para as condições com e sem chuva. A verificação da normalidade das distribuições foi realizada com o teste de *Shapiro-Wilk* ou *D'Agostino-Pearson*. A comparação entre os grupos (com e sem chuva) utilizou o teste *t de Studen*t quando as distribuições apresentaram normalidade, e o teste *U de Mann-Whitney* nos demais casos, ambos com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Tal procedimento foi conduzido utilizando o *Python*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados do NDS-BR permitiram avaliar individualmente o comportamento de 12 condutores em diferentes condições climáticas. A amostra incluiu: A (31 anos, mulher, 9 anos de CNH), B (38, homem, <1 ano), C (23, homem, 4 anos), D (38, mulher, 21 anos), E (31, mulher, 8 anos), F (28, mulher, 7 anos), G (60, homem, 35 anos), H (27, mulher, 5 anos), I (45, mulher, 25 anos), J (32, homem, 14 anos), K (47, mulher, 22 anos) e L (26, homem, 2 anos). A amostra apresenta diversidade etária (23 a 60 anos), de gênero (sete mulheres e cinco homens) e de tempo de habilitação (menos de 1 a 35 anos). A Figura 1 mostra boxplots da velocidade relativa em ambas as condições climáticas.

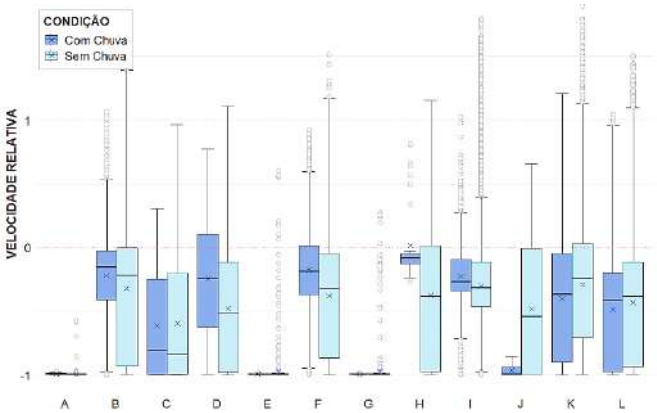


Figura 1: Boxplot: Velocidade Relativa de cada condutor (chuva e sem chuva)

A Figura 1 mostra boxplots da velocidade relativa (médias –0,9938 a 0,0172; desvios 0,0032 a 0,5324; medianas –0,9974 a –0,0818). A, E e G mantiveram estabilidade, com percentuais baixos acima do limite (A: 0%; E: 0,6% em seco e 0% em chuva; G: 0,5% em seco e 0% em chuva), possivelmente influenciados pelo tamanho amostral. B, C, D, F, H, I, K e L apresentaram maior variabilidade, com reduções em B (25,1% para

19,8%), C (15,7% para 13%), H (25,4% para 17,5%), K (27,4% para 21,9%) e L (15,3% para 9,3%), e aumentos em D (20% para 32,9%), F (21,4% para 25,3%) e I (16,2% para 18,3%). J destacou-se pela queda de 24,7% para 0%, possivelmente associada à limitação amostral.

A Figura 2 ilustra os *boxplots* com o comportamento das acelerações e das frenagens de cada condutor.

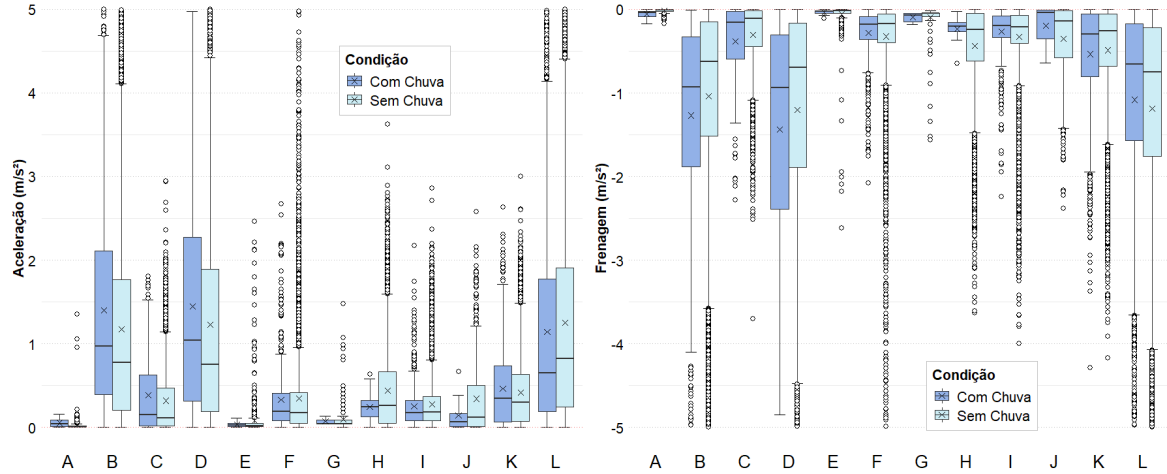


Figura 2: *Boxplot:* Aceleração e Frenagem de cada condutor (chuva e sem chuva)

A análise das acelerações (Figura 2) apresenta médias entre 0,0323 e 1,8547 m/s² e desvios padrão de 0,0293 a 1,9815 m/s². A, E e G apresentaram médias baixas, dispersão reduzida e percentuais próximos de zero em aceleração abrupta (E: 0,3% em seco; G e A: 0% sob chuva), sugerindo condução moderada, possivelmente influenciada pelo tamanho amostral em condição chuvosa. B, D e L registraram médias elevadas, maior dispersão e altas frequências de aceleração abrupta (B: 12,6% em seco e 15,7% em chuva; D: 14,2% e 18,5%; L: 13,7% e 11,7%), caracterizando padrões agressivos mesmo sob chuva. F, H, I e K apresentaram valores intermediários, com redução nos percentuais de aceleração abrupta em condição adversa (F: 1,7% para 0,6%; H: 0,5% para 0%; I: 0% para 0,1%; K: 0,1% para 0,2%), sinalizando adaptação parcial. C teve perfil atípico, com média superior sob chuva (0,3873 contra 0,3191 m/s²) e percentuais residuais de abruptas (0,2% em seco e 0%), sugerindo menor sensibilidade ao risco. J apresentou médias de 0,3434 m/s² em seco e 0,1457 m/s² em chuva, com queda nos percentuais de abruptas (0,3% para 0%), evidenciando resposta cautelosa sob chuva.

A frenagem apresentou médias entre –0,0184 e –2,1512 m/s² e desvios padrão de 0,0301 a 2,8017 m/s². A, E e G mantiveram estabilidade, com percentuais nulos ou residuais de frenagem abrupta (A: 0%; E: 0,3% em seco e 0% em chuva; G: 0% em ambas), sugerindo frenagens normais, ainda que possivelmente influenciadas pelo tamanho amostral. B, D e L apresentaram os maiores percentuais, refletindo padrões mais agressivos, com B oscilando de 11,5% em seco para 14,1% em chuva, D ampliando de 14,2% para 18,2% e L mantendo valores elevados em ambas as condições (13,3% e 10,6%). C apresentou aumento de variabilidade (–0,3050 ± 0,4212 para –0,3847 ± 0,5014) e de tempo de permanência em frenagens abruptas, passando de 0,3% sem chuva para 1,2% com chuva. F, H e I registraram baixas frequências de frenagem abrupta, com reduções sob chuva (F: 1,3% para 0,1%; H: 1% para 0%; I: 0,6% para 0,1%), sinalizando adaptação às condições adversas. J reduziu a magnitude (–0,3541 para –0,1943) e os registros abruptos (0,3% para 0%), embora condicionado pela pequena amostra. K, manteve percentuais semelhantes entre seco e chuva (1,5% e 1,6%), mas com maior dispersão em condição adversa, reforçando a tendência de maior variabilidade sob chuva.

Como as variáveis analisadas apresentaram não normalidade (seja em condição seca ou chuvosa), aplicou-se o teste U de Mann-Whitney. A Tabela 1 apresenta os valores de p encontrados.

Tabela 1: Resultados do Teste U Mann-Whitney - comparação entre condições com e sem chuva

Condutor	Amostra (s)			U Mann-Whitney (p-valor)		
	Velocidade Com - sem Chuva	Aceleração Com - sem Chuva	Frenagem Com - sem Chuva	Velocidade	Aceleração	Frenagem
A	94 | 488	45 | 251	47 | 234	0,0000[1]	0,00000[1]	0,00000[1]
B	1608 | 20868	847 | 10993	759 | 9830	0,0000[1]	0,00000[1]	0,00000[1]

C	432 | 6705	217 | 3287	215 | 3382	0,4447[2]	0,08465[2]	0,04444[1]
D	319 | 8850	160 | 4503	159 | 4339	0,0000[1]	0,01069[1]	0,00506[1]
E	31 | 1410	15 | 687	14 | 694	0,1993[2]	0,57206[2]	0,44004[2]
F	1468 | 20135	638 | 9695	827 | 10410	0,0000[1]	0,04429[1]	0,09592[2]
G	28 | 1191	11 | 388	8 | 393	0,3581[2]	0,92844[2]	0,41786[2]
H	40 | 19220	25 | 9635	15 | 9546	0,0000[1]	0,45203[2]	0,70003[2]
I	1394 | 39255	752 | 21310	641 | 17907	0,0000[1]	0,21135[2]	0,06101[2]
J	21 | 1153	11 | 568	10 | 579	0,0002[1]	0,23009[2]	0,35989[2]
K	3464 | 29013	1866 | 15470	1588 | 13461	0,0000[1]	0,00391[1]	0,02565[1]
L	3758 | 37394	1866 | 18820	1887 | 18529	0,0000[1]	0,00000[1]	0,00000[1]

[1]Diferença significativa; [2]Não há diferença significativa.

Em relação à velocidade, nove condutores (A, B, D, F, H, I, J, K e L) apresentaram redução das médias e aumento da dispersão sob chuva, acompanhados por mudanças nos percentuais de tempo acima do limite. B (<1 ano de CNH) reduziu de 25,1% para 19,8% em condição adversa, enquanto motoristas experientes como A, D e I apresentaram dispersão elevada, confirmando que a experiência, embora relevante, não elimina a influência de fatores individuais. D aumentou o tempo acima da velocidade (20,0% para 32,9%), indicando maior risco, enquanto F e H (experiência intermediária) mostraram maior sensibilidade ao ambiente, reduzindo os percentuais (F: 25,3% para 21,4%; H: 25,4% para 17,5%). J e K, ambos com mais de 10 anos de CNH, foram conservadores (J: 24,7% para 0%; K: 27,4% para 21,9%), possivelmente associadas à maturidade e experiência. L, embora com apenas 2 anos de habilitação, também apresentou adaptação (15,3% para 9,3%). C, E e G mantiveram percentuais reduzidos (≤15,7%), o que pode refletir estabilidade comportamental, insensibilidade ao risco ou excesso de confiança, conforme discutido por Sundström (2011).

Quanto à aceleração, diferenças estatisticamente significativas foram identificadas em seis condutores (A, B, D, F, K e L). Parte deles, com maior tempo de habilitação (A – 9 anos, D – 21 anos e K – 22 anos) e também o menos experiente (B – <1 ano), apresentou aumento sob chuva, comportamento possivelmente associado a estratégias em situações de menor aderência, como retomadas de velocidade, não devendo ser interpretado necessariamente como imprudência. B, D e L tiveram os maiores percentuais de aceleração abrupta (B: 12,6% em seco e 15,7% em chuva; D: 14,2% e 18,5%; L: 13,7% e 11,7%), configurando perfis mais agressivos, apesar das diferenças de experiência. F (7 anos) e L (2 anos) diminuíram suas acelerações sob chuva, acompanhadas de reduções nas abruptas (F: 1,7% para 0,6%; L: 13,7% para 11,7%), sugerindo posturas mais defensivas. Entre os que não apresentaram diferenças significativas, destacam-se E (8 anos) e G (35 anos), ambos com padrões baixos e estáveis, compatíveis com perfis de menor risco (Guo e Fang, 2013). H (5 anos) e I (25 anos) reduziram as médias de aceleração mesmo sem significância estatística, indicando adaptação parcial, enquanto C (4 anos) manteve acelerações elevadas em ambas as condições, mas sem acelerações abruptas (0,2% em seco e 0% em chuva), refletindo estilo de condução mais agressivo. J (14 anos) reduziu aceleração, dispersão e percentuais de abruptas (0,3% para 0%), comportamento compatível com perfil adaptativo, embora sem significância estatística.

Quanto à frenagem, seis condutores apresentaram diferenças significativas (A, B, C, D, K e L). Entre os mais experientes, A (9 anos), D (21 anos) e K (22 anos) intensificaram as frenagens sob chuva. D e K registraram percentuais estáveis de frenagens abruptas (D: 14,2% para 18,2%; K: 1,5% para 1,6%), enquanto A manteve 0%. Entre os menos experientes, B (<1 ano - 11,5% para 14,1%) e C (4 anos - 0,3% para 1,2%), aumentaram a magnitude média e os percentuais abruptos refletindo maior instabilidade. L (2 anos) reduziu a intensidade e os percentuais de frenagens abruptas (13,3% para 10,6%), sugerindo postura defensiva. Os demais não apresentaram alterações significativas: G manteve estabilidade, refletindo estilo de direção consolidado, enquanto jovens como F e H podem estar superestimando suas habilidades ou não percebendo os riscos de condução sob chuva, conforme abordado por Sundström (2011), reforçando que idade, tempo de habilitação e gênero influenciam nos padrões de resposta, e que as estratégias de adaptação à chuva são individualizadas.

Os resultados mostram que os condutores respondem de forma distinta à chuva, com variações influenciadas por idade, experiência, gênero e percepção de risco. Isso destaca a importância de abordagens individualizadas

em políticas e tecnologias de segurança viária, conforme apontado por Ghasemzadeh e Ahmed (2017), Sakhare *et al*. (2023), Bakhshi *et al*. (2022) e Guo e Fang (2013).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou os efeitos da chuva no comportamento individual de 12 condutores, sob condições com e sem chuva na Região Metropolitana de Curitiba, com base em dados do NDS-BR e do CEMADEN. Os testes estatísticos revelaram que a chuva impacta significativamente o comportamento de parte dos condutores. A redução de velocidade foi a principal resposta adaptativa (observada em 9 dos 12 participantes), seguida por mudanças em aceleração e frenagem (6 de 12). Os resultados também indicaram maior sensibilidade adaptativa entre condutoras e motoristas com experiência intermediária. A heterogeneidade nas respostas dos condutores diante da chuva reforça a necessidade de políticas de segurança viária individualizadas. Campanhas educativas, sinalizações adaptativas e treinamentos específicos podem promover condução mais segura, ao considerar o perfil individual do condutor. A abordagem naturalística mostrou-se eficaz para identificar perfis de risco e orientar intervenções. Recomenda-se, para estudos futuros, a coleta de precipitação diretamente nos veículos, reduzindo erros de correspondência entre condição climática e posição do condutor.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Paraná e ao Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV) pelo financiamento da pesquisa e ao Núcleo de Estudos e Pesquisas em Engenharia Civil e Meio Ambiente do Instituto Federal de Goiás - Câmpus Goiânia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amancio, E. C. (2021). Influência de dispositivos de fiscalização eletrônica de velocidade no comportamento do condutor em cenário urbano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

Bakhshi, V.; Aghabayk, K. e Parishad, N. (2022). Evaluating rainy weather effects on driving behaviour dimensions of driving behaviour questionnaire. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2022, p. 1–10.

Bastos, J. T., Santos, P. A. B. D., Amancio, E. C., Gadda, T. M. C., Ramalho, J. A., King, M. J., & Oviedo-Trespalacios, O. (2020). Naturalistic driving study in Brazil: an analysis of mobile phone use behavior while driving. *International journal of environmental research and public health*, 17(17), 6412.

Ghasemzadeh, A. e Ahmed, M. M. (2017). Drivers' lane-keeping ability in heavy rain: Preliminary investigation using SHRP 2 naturalistic driving study data**.** *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.*

Gadda, T. M. C.; Amancio, E. C. e Santos, P. A. B. d. (2021). Estudo Naturalístico de Direção no Brasil: metodologia e resultados preliminares**.** *Congresso Brasileiro de Trânsito e Mobilidade Urbana*. Anais eletrônicos. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br. Acesso em: 19 set. 2024.

Guo, F. e Fang, Y. (2013). Individual driver risk assessment using naturalistic driving data. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 195–203.

Rahman, A. e Lownes, N. E. (2012). Effect of rainfall on lane-keeping behavior: Modeling with SHRP 2 naturalistic driving data. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(5), 644–658.

Sakhare, R. S.; Zhang, Y.; Li, H. e Bullock, D. M. (2023). Impact of rain intensity on interstate traffic speeds using connected vehicle data**.** *Vehicles*, 5(1), p. 133-155.

Sundström, A. (2011). The validity of self-reported driver competence: Relations between measures of perceived driver competence and actual driving skill. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, v. 14, n.

Van Schagen, I.; Welsh, R.; Backer-Grondahl, A.; Hoedemaeker, M.; Lotan, T.; Morris, A.; ... e Winkelbauer, M. (2011). Towards a large-scale European Naturalistic Driving study: final report of PROLOGUE. *SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, Netherlands.*

Isabela Pereira Macedo Dutra (isabelapereiramacedo@outlook.com)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Mariana de Paiva (mariana.paiva@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
José Gustavo Venâncio da Silva Ramos (jose.ramos@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Denis Biolkino de Sousa Pereira (denis.pereira@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Jorge Tiago Bastos (jtbastos@ufpr.br)
Universidade Federal do Paraná Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 - Curitiba - PR, Brasil.

AVALIAÇÃO DAS ZONAS LIVRES DE OBSTÁCULOS EM RODOVIAS: SEGURANÇA VIÁRIA E DIRETRIZES NORMATIVAS

Amanda Oliveira Mathias, Rogério Lemos Ribeiro
Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO
Este estudo apresenta uma revisão sistemática sobre o papel das zonas livres de obstáculos (ZLO) na prevenção de sinistros por saída de pista, destacando sua importância para a segurança viária. As ZLO são faixas laterais desobstruídas que permitem a recuperação de veículos fora da pista, evitando colisões graves. Seu dimensionamento considera fatores como velocidade, geometria da via e topografia. A análise baseou-se em 17 artigos científicos internacionais (2015–2025) e em normas técnicas nacional e estrangeiras (ABNT, AASHTO, CEDR, AUSTROADS). Os resultados confirmam a eficácia das ZLO na redução de sinistros, evidenciando a necessidade de revisão normativa com foco nas especificidades locais. Também se destaca que a combinação entre ZLO e barreiras de proteção pode representar uma solução eficaz e custo-benefício positivo para a mitigação de sinistros, promovendo maior segurança nas rodovias.

1. INTRODUÇÃO

A segurança viária é um dos principais desafios da engenharia de transportes, especialmente diante da elevada incidência e gravidade dos sinistros do tipo saída de pista, também conhecidos como *run-off-road* (ROR). Nesse cenário, as zonas livres de obstáculos (ZLO), ou *roadside clear zones*, destacam-se como uma estratégia eficaz para mitigar a severidade desses sinistros. Trata-se de faixas laterais às pistas de rolamento projetadas para permanecer livres de elementos fixos, como árvores, postes e barreiras rígidas, oferecendo espaço para que veículos fora de controle possam desacelerar, desviar ou parar com segurança, reduzindo o risco de colisões graves (Roque *et al.*, 2021).

A relevância das ZLO nas margens das rodovias é amplamente destacada na literatura, especialmente diante da alta ocorrência de sinistros do tipo saída de pista nas estatísticas de mortalidade no trânsito. Nos Estados Unidos, mais de 50% das fatalidades em sinistros rodoviários estão relacionadas a esse tipo de ocorrência, conforme apontado por diversos estudos (Jalayer e Zhou, 2016; Roque e Jalayer, 2018; Roque *et al.*, 2021; Cheng *et al.*, 2021). Em complemento, Cheng *et al.* (2020) indicam que, na China, cerca de 40% das mortes no trânsito decorrem de saídas de pista. Já em outros contextos, como na Tailândia, esses sinistros também representam uma parcela significativa das mortes no trânsito — chegando a aproximadamente 45% (Albuquerque e Awadalla, 2019). Diante da importância do tema, este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre diferentes abordagens e o papel das zonas livres de obstáculos na mitigação de sinistros por saída de pista, buscando contribuir para o avanço técnico e estratégico das políticas de segurança viária.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Para a realização da revisão sistemática da literatura, após a definição do tema de pesquisa, foi escolhida a base de dados *Scopus* como fonte principal para a identificação dos estudos relevantes. Em seguida, foram elaboradas diferentes combinações de palavras-chave, todas contendo o termo *"clear zone"*, que foram utilizadas nas buscas. Optou-se por restringir a busca ao campo *Abstract*, visando recuperar artigos que apresentassem os termos pesquisados nos resumos, resultando em um total de 165 documentos (ver Tabela 1).

Tabela 1: Resultados das buscas por palavras-chaves

Base de dados	Pesquisar dentro	Palavras-chaves	Resultados
SCOPUS	Abstract	"clear zone" AND roadside	58
		"clear zone" AND roadside AND crash OR "traffic accidents"	40
		"clear zone" AND roadside AND "road safety" OR "highway safety" OR "traffic safety"	14
		"clear zone" AND" roadside AND crash OR "traffic accidents" AND "road safety" OR "highway safety" OR "traffic safety"	13
		"clear zone" AND "road safety" OR "highway safety" OR "traffic safety"	23
		"clear zone" AND crash OR "traffic accidents" AND "road safety" OR "highway safety" OR "traffic safety"	17
		TOTAL	**165**

Fonte: Autor (2025)

Na sequência, delimitou-se o recorte temporal da pesquisa, abrangendo os últimos dez anos. Com o período definido, foram aplicados os critérios de inclusão, onde foram restringidos documentos do tipo *artigo científico*, publicados em língua inglesa, e os critérios de exclusão, onde foram excluídos artigos duplicados ou que não abordassem diretamente o tema proposto. Posteriormente, procedeu-se à leitura dos artigos remanescentes, com o objetivo de selecionar apenas aqueles que tratassem de forma direta e relevante o papel das ZLO na mitigação de sinistros por saída de pista. Ao final da triagem, a seleção resultou em 17 artigos. Ainda, foram consultadas normas técnicas brasileira e internacionais que tratam do tema, visando complementar a análise e ampliar a compreensão sobre as diretrizes adotadas em diferentes países. Os documentos considerados foram: i) Norma brasileira: ABNT NBR 15486:2016 – *Segurança no tráfego – Dispositivos de contenção viária – Diretrizes de projeto e ensaios de impacto; ii)* Normas internacionais: AASHTO (2011) – *Roadside Design Guide* – Estados Unidos; CEDR (2013) – *Forgiving Roadsides Design Guide* – União Europeia; AUSTROADS (2024) – *Guide to Road Design* – Austrália e Nova Zelândia. Por fim, foi realizada uma leitura mais detalhada dos artigos e documentos normativos selecionados, com o intuito de identificar como o conceito de ZLO é tratado nos âmbitos nacional e internacional, contribuindo para uma análise comparativa e fundamentada da abordagem técnica sobre o tema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura técnica revelou uma base conceitual e empírica consistente sobre a implementação de ZLO como estratégia para o aumento da segurança viária. Os estudos revisados abordam o conceito de "rodovias que perdoam", dimensões recomendadas das ZLO, a classificação dos taludes adjacentes à pista, além de alternativas ao seu alargamento, como o uso de barreiras de proteção. Os resultados são apresentados por tópicos, destacando contribuições de múltiplos autores e diferentes contextos geográficos e operacionais.

3.1 Rodovias que perdoam e ZLO

O conceito de ZLO, inserido nas “rodovias que perdoam”, busca reduzir a gravidade de sinistros por saída de pista, oferecendo margens desobstruídas com largura adequada à velocidade operacional e taludes que facilitem a recuperação veicular (Roque *et al.*, 2021).

Estudos mostram que a presença de obstáculos fixos e a ausência de espaço suficiente para manobras de recuperação aumentam significativamente o risco e a severidade dos acidentes (Khan et al., 2023; Albuquerque e Awadalla, 2019). Dados da região de Ciamis, Indonésia, indicam que 47% dos sinistros ocorreram em curvas com raio inferior ao recomendado, 84% das vias apresentavam largura insuficiente e 82% não possuíam ZLO em conformidade com os padrões técnicos (Sari et al., 2024). A ausência de sinalização adequada e a presença de elementos como vegetação densa, taludes íngremes e objetos fixos nas margens também dificultam a retomada do controle do veículo, enquanto margens amplas e desobstruídas contribuem para evitar colisões com obstáculos (Khan *et al.,* 2023; Fitzpatrick *et al.,* 2016).

3.2 Recomendações quanto a largura ideal de ZLO

As recomendações sobre a largura ideal das ZLO variam conforme características do projeto viário, como velocidade operacional, volume de tráfego, veículo de projeto e geometria da via. Segundo o *Roadside Design Guide* (AASHTO, 2011), trechos com velocidade de 100 km/h e alto volume de tráfego devem ter zonas livres superiores a 9 m. Essa abordagem é reforçada por Cheng *et al.* (2021a) que correlacionam a largura da ZLO à velocidade de saída do veículo e ao raio de curvatura horizontal, sendo que curvas com raio inferior a 195 m demandam zonas livres mais amplas, tornando-se áreas críticas para a mitigação de sinistros do tipo ROR. No que se refere à forma de medição da zona livre, os estudos apresentam algumas variações conceituais. Cheng *et al.* (2021) definem que a largura da ZLO é medida a partir do bordo da faixa de rolamento, somando-se a largura do acostamento à da encosta adjacente, desde que esta possua inclinação segura. Por outro lado, Sari (2024) apresenta uma abordagem distinta, ao definir que a *clear zone* é o espaço adicional ao acostamento, sendo este último parte da largura total da via, mas não da zona livre propriamente dita. Vale destacar que a definição da largura ideal da ZLO não deve se limitar a critérios geométricos ou físicos. Estudos como o de Fitzpatrick *et al.* (2016) indicam que larguras superiores a 2 metros já oferecem benefícios mensuráveis em segurança viária; entretanto, larguras excessivamente grandes podem estimular comportamentos de risco, como o aumento da velocidade. Roque *et al.* (2019) reforçam essa ideia, destacando a importância de se considerar fatores operacionais, como o comportamento dos condutores e a presença de usuários vulneráveis.

3.3 Classificação de taludes em ZLO

A inclinação dos taludes que compõem as ZLO é determinante para a recuperação de veículos desgovernados, sendo também importante considerar a interação entre geometria da via e comportamento do condutor. Khan *et al*. (2023) demonstram que fadiga, distração, consumo de álcool e excesso de velocidade afetam diretamente a ocorrência e gravidade dos sinistros do tipo ROR. Adicionalmente, o *Roadside Hazard Rating* (RHR), desenvolvido por Jalayer e Zhou (2016), combina a largura da zona livre e a inclinação do talude em uma escala de risco de sete níveis, em que RHR 1 representa condições ideais (taludes < 1V:4H e largura > 9 m) e RHR 7 risco máximo (largura até 1,5 m e inclinação > 1V:2H). Segundo os autores, a inclinação de 1V:3H ou mais suave é considerada segura, enquanto taludes mais íngremes elevam o risco de sinistros graves. Cheng *et al*. (2020) adotam uma abordagem mais conservadora, classificando como seguros taludes ≤ 1V:6H e recomendando que apenas metade da largura de taludes entre 1V:3,5H e 1V:5,5H seja considerada área segura, e que taludes > 1V:3,5H não são adequados como áreas de recuperação.

3.4 Estratégias de ampliação das zonas livres *versus* uso de barreiras de proteção

Quando a ampliação da ZLO é inviável devido a restrições de espaço ou elevados custos, como em áreas urbanas densas, o uso de barreiras de contenção torna-se uma alternativa recorrente. No entanto, essas barreiras devem ser corretamente dimensionadas e posicionadas para evitar a introdução de novos riscos. Awadalla e Albuquerque (2021) alertam que barreiras instaladas a menos de 6 metros do bordo da pista apresentam menor eficácia na redução de fatalidades em comparação àquelas posicionadas em distâncias mais afastadas. Nessa mesma linha, Roque e Jalayer (2018) recomendam, para situações em que não seja possível remover ou recuar o obstáculo, a utilização de dispositivos de segurança como barreiras rompíveis ou atenuadores de impacto. Essas soluções são especialmente eficazes em espaços restritos, pois contribuem para a mitigação de danos. Já Cheng *et al.* (2021a) enfatizam que a decisão entre ampliar a ZLO ou implantar barreiras deve considerar análises de risco e custo-benefício, ponderando aspectos técnicos, operacionais e econômicos.

3.5 Comparação entre abordagens de normas nacionais e internacionais

Embora apresentem variações em seus critérios, todas as normas analisadas convergem quanto à relevância das zonas livres desobstruídas como componente fundamental da segurança viária.

3.5.1 AUSTROADS (Austrália)

Na Austrália, o *Guide to Road Safety Part 2 – Safe Roads* (Austroads, 2024) estabelece que as zonas livres devem ser dimensionadas com base em evidências de segurança viária. A largura da ZLO é definida considerando fatores como velocidade, volume médio diário de tráfego (VDM), composição do tráfego, condições ambientais e características do acostamento. O guia destaca que uma zona de aproximadamente 4 metros pode reduzir os sinistros em 49%, enquanto larguras próximas de 8 metros alcançam reduções de até 54%. Apesar disso, zonas mais amplas, como 9m ou 12 m, enfrentam limitações físicas e financeiras que dificultam sua implantação. Por esse motivo, o guia recomenda equilibrar os ganhos de segurança com a viabilidade técnica e econômica. O documento também ressalta que as ZLO, embora eficazes, não eliminam completamente os riscos, sendo necessário complementá-las com barreiras de contenção e outras medidas de proteção. Taludes suaves (como os com inclinação de 1V:6H) são classificados como recuperáveis, pois permitem desaceleração progressiva e maior chance de o condutor retomar o controle do veículo. Já taludes íngremes elevam o risco de capotamentos e impactos severos, sendo considerados não recuperáveis. O uso do *Trauma Index* é recomendado para avaliar o potencial de lesões e a manutenção constante dos taludes é essencial para garantir sua funcionalidade ao longo do tempo. Além disso, o *Guide to Road Safety Part 6 – Road Safety Audit* (Austroads, 2022) enfatiza a importância de eliminar ou proteger objetos fixos localizados próximos à via, como postes ou estruturas utilitárias. Também alerta que barreiras mal posicionadas ou com extensão insuficiente podem comprometer sua eficácia. A presença de vegetação densa ou obstáculos visuais nas margens da pista reduz a visibilidade e dificulta a tomada de decisões pelos condutores.

3.5.2 CEDR (Europa)

O *Forgiving Roadsides Design Guide* (CEDR, 2013), oferece diretrizes específicas para países europeus, utilizando como base o método da AASHTO (2011), porém com adaptações. O dimensionamento das zonas livres leva em conta a velocidade operacional, o volume de tráfego, a inclinação lateral do terreno e a geometria das curvas, aplicando fatores multiplicadores em trechos curvos. O guia propõe zonas de recuperação entre 0,25 e 4 metros, com uma "zona de severidade limitada" adicional de até 4 m. Para rodovias de alta velocidade (100 km/h), a largura total recomendada pode chegar a 9 m. Em relação aos taludes, embora o guia não

apresente uma classificação formal, recomenda a reconfiguração de taludes e o uso de barreiras de proteção em trechos críticos. O CEDR enfatiza que a escolha da solução deve considerar tanto a eficácia quanto os custos envolvidos, especialmente em áreas urbanas onde o uso do solo é limitado. Nesses casos, barreiras contínuas e flexíveis podem ser alternativas viáveis às ZLO amplas.

3.5.3 AASHTO (Estados Unidos)

Nos Estados Unidos, o RDG define a largura da ZLO conforme a velocidade, o VDM e a inclinação do talude. Para vias rurais com velocidade de 110 km/h e VDM acima de 6.000, recomenda-se uma largura de 9 m; já para vias com menor volume (VDM inferior a 750) e velocidades próximas a 90 km/h, a ZLO pode variar entre 3,5 e 4,5 m (AASHTO, 2011). Ainda, classifica os taludes em três tipos: recuperáveis, com inclinação até 1V:4H, que permitem recuperação segura do veículo; não recuperáveis, entre 1V:3H e 1V:4H, que exigem zonas livres maiores; e críticos, com inclinação mais íngreme que 1V:3H, que devem ser protegidos por barreiras. Em projetos com restrições físicas, a prioridade é proteger ou corrigir os trechos críticos, mesmo que a ZLO não atinja sua largura ideal. O guia adota uma abordagem pragmática, sugerindo o uso de barreiras certificadas (MASH/NCHRP 350) como solução equivalente ou até mais eficaz do que a ampliação da ZLO.

3.5.4 ABNT NBR 15486:2016 (Brasil)

A norma brasileira *ABNT NBR 15486:2016,* atualmente em revisão*,* define a ZLO como a área lateral desobstruída e traspassável ao lado da via, cuja largura deve ser calculada considerando a velocidade de projeto, a declividade lateral do terreno e o VDM. Para curvas, aplica-se um fator de correção denominado Kcz, que depende da velocidade e do raio da curva. Assim, raios superiores a 900 m não necessitam de correção. Taludes com declividade suave e áreas livres de obstáculos podem dispensar a instalação de barreiras de contenção. Para velocidades acima de 60 ou 70 km/h a aplicação da ZLO é ainda mais importante para garantir a segurança, permitindo a recuperação segura do veículo em caso de saída da pista ou reduzir a severidade, desde que o ambiente lateral seja estável e seguro.

Observa-se, portanto, que a principal referência internacional para o projeto de ZLO é o RDG, amplamente utilizado nos EUA e adotado como base em outros países, inclusive no Brasil. O guia relaciona a largura da ZLO à velocidade, volume de tráfego e inclinação de taludes. No entanto, Cheng *et al.* (2021a, 2021b) alertam que os dados que embasam o RDG são antigos, recomendando atualizações com dados e simulações locais.

4. CONCLUSÃO

O levantamento bibliográfico realizado evidencia que as zonas livres de obstáculos (ZLO) constituem medida essencial para a mitigação da gravidade e da frequência dos sinistros por saída de pista, destacando-se o consenso quanto à importância de margens desobstruídas e taludes com inclinações adequadas para permitir a recuperação veicular. Contudo, permanecem divergências em relação à largura ideal das ZLO, por exemplo, enquanto a AASHTO (2011) recomenda larguras de 9 m para rodovias de alta velocidade, Fitzpatrick *et al.* (2016) indicam que faixas superiores a 2 m já oferecem benefícios mensuráveis. Também não há consenso sobre a sua forma de medição, sendo que alguns estudos incluem o acostamento na largura total, enquanto outros consideram apenas a área desobstruída extra ao acostamento. Além disso, na classificação dos taludes, o RHR (Jalayer e Zhou, 2016) define como seguro inclinações até 1V:4H, enquanto Cheng *et al.* (2020) sugerem que taludes seguros são aqueles com inclinação de 1V:6H ou mais suaves. Observa-se ainda que parte das diretrizes normativas internacionais se baseia em dados desatualizados, reforçando a necessidade de pesquisas mais recentes e contextualizadas. Nesse sentido, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos que integrem análises comportamentais, comparações de custo-benefício entre ZLO e barreiras de contenção, bem como simulações capazes de subsidiar revisões normativas mais adequadas às realidades locais, especialmente no Brasil, país de grande extensão territorial e diversidade regional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, F. D. B.; AWADALLA, D. M. (2019) Roadside design assessment in an urban, low-density environment in the Gulf Cooperation Council region. Traffic Injury Prevention, v. 20, n. 4, p. 436-441. DOI: 10.1080/15389588.2019.1602770.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2011) Roadside Design Guide. 4th ed. Washington, D.C. Disponível em: https://austroads.gov.au/publications/road-design/agrd06.

Acesso em: 14 maio 2025.

ABNT (2016) NBR 15486 - Segurança no tráfego – Dispositivos de contenção viária – Diretrizes de projeto e ensaios de impacto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

AUSTROADS (2024) Guide to Road Safety Part 2: Safe Roads. 2. ed. Sydney. 139 p. Disponível em: https://austroads.gov.au/publications/road-safety/agrs02/media/AGRS02-24_Guide_to_Road_Safety_Part_2-Safe_Roads.pdf Acesso em: 13 junho 2025.

AUSTROADS (2022) Guide to Road Safety Part 6: Road Safety Audit. Sydney. 165 p. Disponível em: https://austroads.gov.au/publications/road-safety/agrs06/media/AGRS06-22_Guide_to_Road_Safety_Part-6_Road_Safety_Audit.pdf. Acesso em: 13 junho 2025.

AWADALLA, D. M.; ALBUQUERQUE, F. D. B. (2021) Impact of roadside design compliance and hazard offset on the risk of single-vehicle, run-off-road crash fatalities. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, v. 28, n. 4, p. 468–478. DOI: https://doi.org/10.1080/17457300.2021.1942923.

CHENG, G.; LIU, X.; XU, L.; WANG, L. (2020) Empirical Estimation of the Width of Highway Roadside Clear Zone. International Journal of Safety and Security Engineering, v. 10, n. 2, p. 247-253. DOI: https://doi.org/10.18280/ijsse.100212. Disponível em: http://iieta.org/journals/ijsse. Acesso em: 13/05/2025.

CHENG, R.; CHENG, G.; PEI, Y.; XU, L. Calculation of the Roadside Clear Zone Width along Highways Based on the Safe Slope. Journal of Advanced Transportation, v. 2021, p. 1-12, 8 jun. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2021/9998503. Acesso em: 13 maio 2025. (a)

CHENG, R.; PAN, Y.; WANG, T. A design method for the roadside clear zone based on accident simulation analysis. Mathematical Problems in Engineering, Hindawi, v. 2021, p. 1-16, 25 nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/2605095. Acesso em: 18 maio 2025. (b)

CONFERENCE OF EUROPEAN DIRECTORS OF ROADS. Forgiving Roadsides Design Guide. CEDR Report 2013/09. Brussels: CEDR, 2013. Disponível em: https://www.cedr.eu/download/Publications/2013/T10_Forgiving_roadsides.pdf. Acesso em: 14/05/2025.

FITZPATRICK, C. D.; SAMUEL, S.; KNODLER Jr., M. A. (2016) Evaluating the effect of vegetation and clear zone width on driver behavior using a driving simulator. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 42, p. 80–89. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.07.002. Acesso em: 13/05/2025.

JALAYER, M.; ZHOU, H. Evaluating the safety risk of roadside features for rural two-lane roads using reliability analysis. Accident Analysis and Prevention, v. 93, p. 101–112, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.013. Acesso em: 13 maio 2025.

KHAN, S. A. et al. Effects of design consistency on run-off-road crashes along rural two-lane highways. Accident Analysis and Prevention, v. 186, p. 107042, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107042. Acesso em: 13 maio 2025. (a)

KHAN, S. A.; YASMIN, S.; HAQUE, M. M. (2023b) Effects of design consistency measures and roadside hazard types on run-off-road crash severity outcomes: a hybrid modelling approach. Analytic Methods in Accident Research, v. 40, p. 100300. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.amar.2023.100300. Acesso em: 13 maio 2025.

ROQUE, C.; CARDOSO, J. L.; CONNELL, T.; SCHERMERS, G.; WEBER, R. (2019) Topic analysis of Road safety inspections using latent dirichlet allocation: A case study of roadside safety in Irish main roads. Accident Analysis and Prevention, v. 131, p. 336–349, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.07.021. Acesso em: 13 maio 2025.

ROQUE, C.; JALAYER, M.; HASAN, A. S. (2021) Investigation of injury severities in single-vehicle crashes. Journal of Safety Research, v. 77, p. 161–169. DOI: 10.1016/j.jsr.2021.02.013.

ROQUE, C.; JALAYER, M. (2018) Improving roadside design policies for safety enhancement using hazard-based duration modeling. Accident Analysis and Prevention, v. 120, p. 165–173. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.08.008. Acesso em: 13 maio 2025.

SARI, N.; MALKHAMAH, S.; SUPARMA, L. B. (2024) Road traffic accidents factor on rural arterial roads. Journal of Applied Engineering Science. v22, n2, p. 470-482. Disponível em: www.engineeringscience.rs. Acesso: 13/05/25

Amanda Oliveira Mathias (aomathias@ufu.br); *Rogério Lemos Ribeiro* (rogerio.ribeiro@ufu.br)

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Avenida João Naves de Ávila, nº 2121, bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, Brasil.

AVALIAÇÃO DE RISCOS ASSOCIADOS ÀS OCUPAÇÕES NO ENTORNO FERROVIÁRIO: ESTUDO DE CASO EM SANTA MARIA (RS)

Paula Sandri Rhoden[1], **Magnos Baroni**[2], **Alejandro Ruiz Padillo**[1,2]
[1]Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, [2]Departamento de Transportes, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
O transporte ferroviário é uma alternativa eficiente e sustentável para a movimentação de mercadorias, mas o Brasil enfrenta desafios como a deterioração da infraestrutura e a ocupação irregular das faixas de domínio, que impõe complexas condições de operação, exigindo uma abordagem integrada para a gestão de riscos associados. Assim, o presente estudo de caso analisa estes riscos em pontos da Ferrovia Malha Sul na cidade de Santa Maria (RS), utilizando um método de análise multicritério simples e eficiente. Os resultados evidenciaram que a presença de moradias próximas aos trilhos potencializa os riscos, especialmente em relação ao perigo de atropelamento. Verificou-se ainda que esses riscos variam significativamente conforme as características locais, como o relevo e o entorno. A metodologia mostrou-se sensível à presença das ocupações e eficaz na comparação entre os pontos, auxiliando na tomada de decisão sobre prioridades de atuação sobre os locais e problemas mais urgentes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O modo ferroviário apresenta vantagens significativas para o transporte de mercadorias e matérias-primas, como alta capacidade de carga e menor impacto ambiental quando comparado ao transporte rodoviário, além de ser economicamente viável (Rosa e Ribeiro, 2020; Ruiz-Padillo *et al.*, 2025). No entanto, no Brasil, a infraestrutura ferroviária enfrenta desafios críticos, incluindo a deterioração da malha ferroviária e o crescimento de ocupações irregulares próximas aos trilhos (CNI, 2018). Essas ocupações representam riscos tanto para os moradores, usualmente de baixa renda e em situação de vulnerabilidade social, quanto para a operação ferroviária, tornando-se uma problemática técnica, social e jurídica de grande complexidade.

A relação entre ferrovias e ocupações irregulares é complexa, exigindo uma abordagem integrada para a gestão de riscos e operação do modo. A urbanização desordenada e o uso inadequado do solo aumentam significativamente os perigos, tornando essencial o planejamento estratégico, o controle do uso do solo e o monitoramento das características do entorno (Bubeck *et al.*, 2019; Campos *et al.*, 2024). Para mitigar impactos socioeconômicos, proteger vidas e reduzir danos materiais, é fundamental identificar, prevenir e mitigar os riscos derivados da interação entre as infraestruturas e operação dos transportes ferroviários e o meio ambiente natural e urbano, sobretudo nesses casos de proximidade de construções. Entre esses riscos destacam os de atropelamento, tombamento/descarrilamento, drenagem ineficiente e o geotécnico (Ruiz-Padillo *et al.*, 2025).

Portanto, avaliar os riscos que atuam na operação ferroviária é uma tarefa multidimensional. Além de medir esses riscos de forma individual, é necessário avaliá-los de forma integrada, pois esses riscos atuam simultaneamente. A presença de ocupações próximas às ferrovias se configura como uma realidade muito específica do Brasil e outros países em desenvolvimento, o que resulta na limitada disponibilidade, em âmbito internacional, de estratégias consolidadas ou manuais específicos para avaliação desses riscos. No Brasil, embora o tema já tenha sido abordado, ainda carece de maior atenção por parte de pesquisadores e planejadores, devido, possivelmente, à situação atual da malha ferroviária e o escasso interesse dedicado às comunidades próximas às linhas férreas (Rhoden *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar os riscos relacionados às ocupações no entorno das ferrovias, realizando um estudo de caso em vários pontos da Ferrovia Malha Sul na cidade de Santa Maria, RS. O estudo foi realizado utilizando um método de análise multicritério que propõe um índice de risco global a partir da agregação ponderada dos níveis de risco parciais. O estudo contribui ao apresentar uma técnica estruturada que preenche uma importante lacuna da literatura sobre segurança ferroviária. Além da contribuição científica, o estudo pode auxiliar gestores no planejamento de ações para mitigar os riscos derivados das ocupações.

2. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em 4 pontos da ferrovia que atravessa a cidade de Santa Maria, RS, escolhidos com e sem existência de ocupações no entorno, além de apresentar diferentes níveis dos 4 riscos anteriormente indicados (atropelamento, tombamento/descarrilamento dos trens, funcionamento deficiente da drenagem e

problemas geotécnicos), tornando complexa a escolha do local com maior urgência de atuação (Figura 1).

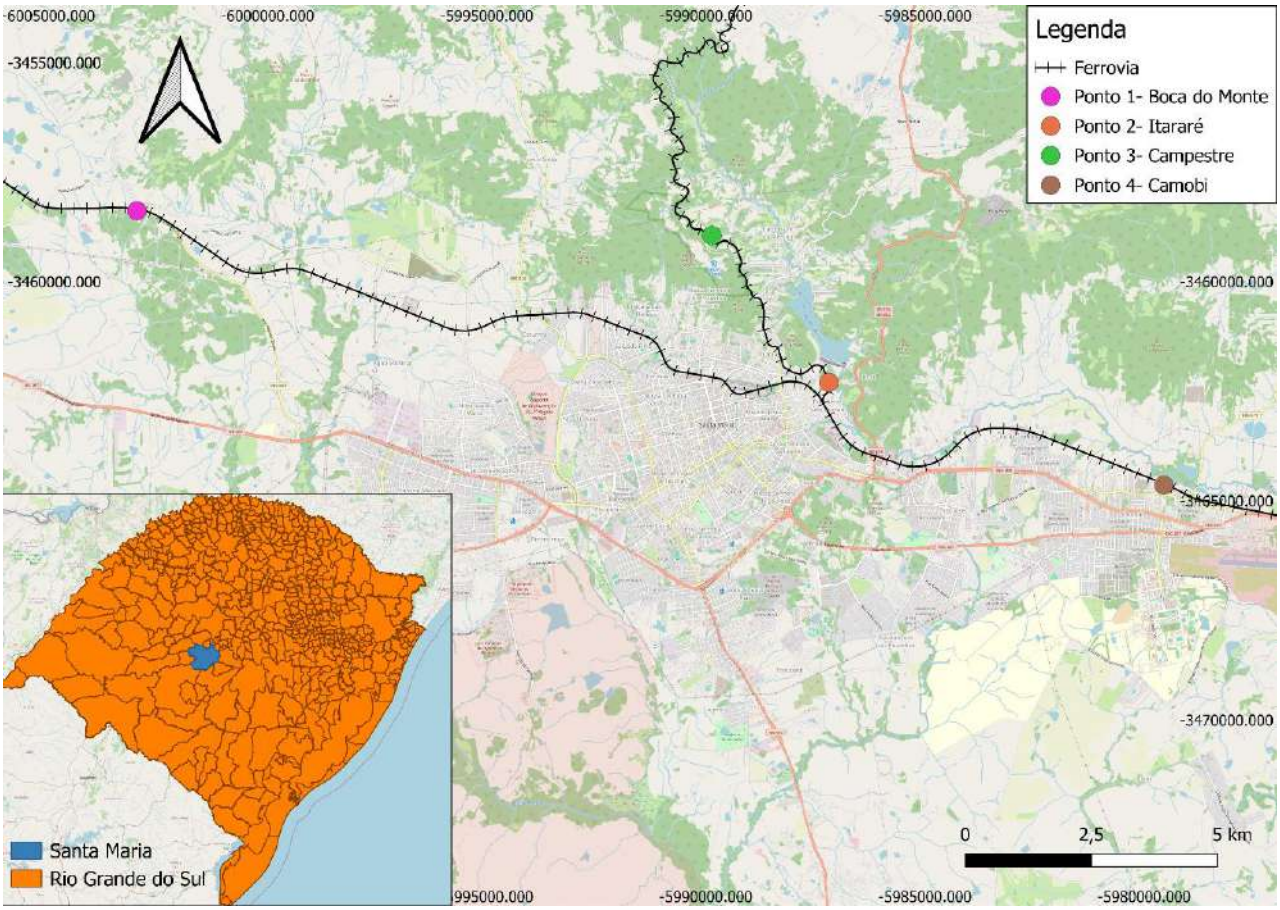


Figura 1: Localização da área de estudo e pontos analisados. Fonte dos dados: OpenStreetMap (2025).

O primeiro ponto é localizado na linha Santa Maria – Cacequi, na região oeste da cidade, pertencendo ao distrito chamado Boca do Monte. O segundo ponto fica localizado no bairro Itararé, no início da linha entre Santa Maria e Cruz Alta, próximo ao pátio de manobras e antiga estação da cidade. O terceiro ponto está localizado no bairro Campestre, continuando na mesma linha anterior e, finalmente, o quarto ponto está localizado próximo ao bairro Camobi, na linha Santa Maria – Porto Alegre. Cabe destacar que os três primeiros pontos apresentam ocupações dentro das faixas de domínio da ferrovia, enquanto o ponto 4 não. Sobre estes pontos, a análise foi realizada em 4 etapas, apresentadas a seguir.

2.1 Avaliação dos riscos

A avaliação dos riscos foi construída a partir de uma adaptação da combinação da contribuição de indicadores identificados para cada tipo de risco até obter o nível de risco específico para cada caso, como proposto em Ruiz-Padillo *et al.* (2025), associado a uma escala pré-estabelecida de valores: 1 (baixíssimo), 2 (baixo), 3 (médio), 4 (alto) e 5 (altíssimo). Para isso, foram utilizados fluxogramas, que buscaram entender o comportamento dos riscos e seus indicadores, como se dava essa interação, se os indicadores potencializavam ou minimizavam o impacto ao interagirem em cada caso específico, até obter o nível de risco final e, portanto, seu valor.

Em relação à adaptação realizada, destacam-se algumas alterações principais. Em primeiro lugar, o risco de poluição sonora foi desconsiderado, por não estar diretamente associado à presença das ocupações. Em segundo lugar, a avaliação do risco geotécnico foi simplificada, substituindo os ensaios recomendados na metodologia pela avaliação observacional realizada por um profissional da área. Finalmente, os riscos relacionados ao descarte de resíduos domiciliares e esgoto foram agrupados ao risco de drenagem ineficiente, considerando-se que apresentam relação entre si.

2.2 Ponderação dos riscos

Para ponderar os riscos avaliados na etapa anterior, utilizaram-se os pesos propostos por Rhoden *et al.* (2024) decorrentes da estimação de modelos de escolha discreta, diferenciados entre as situações com e sem ocupações no entorno. Esta ponderação foi realizada para considerar a importância relativa de cada risco parcial sobre o global, dentre o conjunto de pontos ferroviários avaliados.

2.3 Agregação dos riscos

Com as avaliações parciais e os pesos correspondentes, definidos nas etapas anteriores, os riscos foram agregados, encontrando um índice de risco global que facilita a comparação entre pontos avaliados. Para isso, foi utilizado o método da soma ponderada. Este método é a técnica de análise multicritério discreta mais clássica e amplamente utilizada devido à sua aplicação fácil e intuitiva (Barba-Romero e Pomerol, 2000). É caracterizado por somar os diferentes critérios (com seus possíveis pesos) em uma função de utilidade global única, como apresentada na equação 1:

$$v = \lambda_1 * v_1 + \lambda_2 * v_2 + \cdots + \lambda_n * v_n \quad (1)$$

onde v é o resultado da soma ponderada, λ_i é o peso de cada variável e v_i é o valor atribuído a ela (i=1,...,n). A ordenação das alternativas (trechos ou pontos) pelos valores de v permite estabelecer uma classificação de prioridade para todas elas. Para isso, os valores dos critérios (v_i) e pesos (λ_i) devem ser padronizados. Assim, os valores resultantes do risco global foram classificados na escala seguinte: baixíssimo (1,00-1,50), baixo (1,51-2,50), médio (2,51-3,50), alto (3,51-4,50) ou altíssimo (4,51-5,00).

3. RESULTADOS

Os dados dos pontos foram coletados presencialmente, aplicando os fluxogramas de avaliação de riscos indicados anteriormente. Cabe ressaltar que a avaliação do risco geotécnico foi simplificada ao emprego de uma metodologia observacional conduzida em campo por um profissional geotécnico sênior, que classificou esse risco de acordo com sua experiência prévia da região. A Tabela 1 mostra os resultados dos 4 pontos, que revelaram diferenças significativas nos níveis de risco, evidenciando as particularidades de cada local em relação à operação ferroviária e ao entorno. Em relação aos pesos, foram utilizadas as ponderações definidas por Rhoden *et al.* (2024) de acordo se os pontos apresentavam (1, 2 e 3) ou não (4) ocupações no entorno.

Tabela 1: Avaliações e pesos de riscos parciais e risco global agregado do estudo de caso.

Riscos / Pontos	Geotécnico		Atropelamento		Tombamento/ descarrilamento		Drenagem ineficiente		Risco Global	
	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso		
1 Boca do Monte	1	0,11	3	0,53	1	0,25	1	0,11	2,06	Baixo
2 Itararé	3	0,11	3	0,53	2	0,25	3	0,11	2,75	Médio
3 Campestre	1	0,11	5	0,53	2	0,25	1	0,11	3,37	Médio
4 Camobi	1	0,30	2	0,30	1	0,29	1	0,11	1,30	Baixíssimo

Assim, para o ponto 1 (Boca do Monte), o risco geotécnico foi avaliado como baixíssimo, devido ao relevo plano à jusante e montante da malha férrea. O risco de atropelamento foi considerado médio, em função da ausência de passagens sinalizadas e da inclinação inferior a 2%. Já o risco relacionado à drenagem foi também classificado como baixíssimo, pois não há obras que impeçam o fluxo natural dos córregos. O risco de tombamento foi considerado baixo, dado que não há curvas verticais ou horizontais no ponto. Após a análise dos riscos parciais, aplicou-se uma soma ponderada, resultando em um risco global classificado como baixo (2,06). Esse resultado é compatível com a realidade local, onde não há situações graves identificadas, exceto a possibilidade de atropelamentos, especialmente em áreas com moradias muito próximas à ferrovia, sem passagem em nível sinalizada, o que justifica a elevação do risco global ao segundo nível.

No segundo ponto (Itararé), a metodologia observacional indicou risco geotécnico médio, devido à presença de taludes com elevadas inclinações, contudo, sem histórico ou sinais de movimentações ou rupturas. O risco de atropelamento também foi classificado como médio, pois há necessidade de travessia fora da passagem em nível sinalizada. O risco de drenagem foi considerado médio, pela ausência de obras específicas e pelo impedimento parcial do fluxo de córregos, ainda que a área não apresente histórico de inundações. Já o risco de tombamento foi avaliado como baixo, pois, apesar de existir curvas horizontais no traçado, a velocidade dos trens é compatível com a geometria. O risco global resultante foi classificado como médio (2,75), refletindo a predominância de riscos nesse nível, com destaque para a necessidade de atenção à drenagem, à estabilidade

dos taludes e à proximidade com áreas ocupadas.

A avaliação do ponto 3 (Campestre) resultou em risco geotécnico baixíssimo, uma vez que o relevo é plano. O risco de atropelamento foi considerado altíssimo, uma vez que atravessar a linha férrea é uma necessidade, não há uma passagem em nível sinalizada e a linha férrea apresenta uma geometria que prejudica a visibilidade. O risco de drenagem ineficiente foi considerado baixíssimo, devido à inexistência de obras de drenagem no entorno, além de não existir impedimento de fluxo de córregos ao longo do ponto. Finalmente, o risco de tombamento foi considerado baixo, pois nesse ponto a ferrovia possui curvas horizontais, porém a velocidade desenvolvida pelo trem é adequada considerando o raio da curva. Após a avaliação e ponderação dos riscos, realizou-se a soma ponderada, resultando em um risco global médio (3,37).

Por fim, no quarto ponto (Camobi), o risco geotécnico foi considerado baixíssimo, pois, novamente, o relevo local é plano. O risco de atropelamento foi considerado baixo, uma vez que atravessar a linha férrea e/ou circular pela faixa de domínio não é uma necessidade, já que nesse ponto a ferrovia não atravessa uma área específica com moradias a cada lado dela, mas a existência de atividades humanas próximas e a ausência de elementos de proteção da ferrovia nem de separação aos caminhos e áreas adjacentes implica que é frequente o deslocamento de pessoas junto à faixa de domínio. O risco de drenagem ineficiente foi avaliado como baixíssimo, devido à inexistência de obras de drenagem no entorno, além de não existir impedimento de fluxo de córregos no trecho onde o ponto se localiza. O risco de tombamento foi considerado baixíssimo, pois nesse ponto a ferrovia não possui curvas verticais nem horizontais. A partir desses valores parciais dos riscos, realizou-se a soma ponderada utilizando os pesos para o cenário onde não existem ocupações nas proximidades, resultando em um risco global baixíssimo (1,30).

Dessa forma, os resultados obtidos revelam uma consistência na comparação dos riscos entre os locais analisados. No que se refere ao risco geotécnico, verifica-se que o ponto 2 apresenta o índice mais elevado, o que se justifica pela presença de taludes com elevadas declividades próximas à malha ferroviária, enquanto os demais pontos possuem relevo predominantemente plano e sem problemas específicos nesse sentido. Em relação ao risco de atropelamento, observa-se que o ponto localizado em Camobi apresenta o menor índice, uma vez que não há edificações a ambos os lados da ferrovia, evitando a necessidade de atravessá-la, mas sim com a possibilidade de circulação pela faixa de domínio. Por outro lado, o ponto de Campestre registra o maior risco nessa variável, devido à ausência de passagem em nível sinalizada e à geometria da via, que compromete a visibilidade para os frequentes moradores que precisam cruzar a ferrovia para se deslocar de umas edificações ou pontos de interesse na localidade para outros.

Quanto ao risco de tombamento, sua classificação variou entre baixíssimo e baixo em todos os locais, o que é condizente com as características dos pontos: em Camobi e Boca do Monte, a ferrovia não apresenta curvas, enquanto nos pontos de Itararé e Campestre há curvas, porém com deslocamento dos trens em velocidade compatível. Finalmente, o risco de drenagem ineficiente também demonstrou coerência com as características observadas nos pontos analisados. Nos três locais onde a variável foi classificada como baixíssima, não há infraestrutura de drenagem nem a presença de córregos nas proximidades que possam comprometer a estabilidade da infraestrutura ou edificações próximas. No ponto avaliado com risco médio, verificou-se a obstrução do fluxo de córregos ao longo da ferrovia, embora o histórico da região não indique recorrência de inundações durante períodos chuvosos.

Ao comparar o risco global dos locais, observa-se que o ponto com maior risco apresenta um índice altíssimo para o risco de atropelamento, variável que possui maior peso na metodologia proposta. Em contrapartida, o ponto com menor risco global obteve classificações baixíssimas para quase todas as variáveis analisadas, além de uma ponderação de riscos diferente dos demais, evidenciando a influência direta das ocupações na elevação dos níveis de risco neles. De fato, a análise comparativa reforça que o risco de atropelamento é o mais crítico nos pontos com ocupações próximas, especialmente no ponto 3. No entanto, os riscos associados à drenagem e à estabilidade geotécnica mostraram-se devidamente gerenciados em todos os locais. Por outro lado, no ponto localizado próximo ao bairro Camobi, no qual as atuações resultaram menos prioritárias, foi realizada a simulação de cálculo do risco global utilizando os pesos correspondentes à situação com ocupações. Nesse caso, o valor do risco global se elevaria a médio (1,53), o que revela a sensibilidade do modelo ao agravamento da situação caso tivesse moradias na faixa de domínio, mas as demais características do entorno se manteriam

mesmo que tivesse ocupações na faixa de domínio.

Portanto, a metodologia aplicada demonstrou-se eficaz na identificação e classificação dos riscos, fornecendo subsídios para a priorização de medidas de mitigação nestes cenários específicos em que existem ocupações do entorno das ferrovias. Embora nenhum dos pontos analisados apresente riscos que exijam intervenções imediatas, as áreas com risco global médio ou superior, como Itararé e Campestre, devem ser priorizadas no planejamento de ações de monitoramento e, no seu caso, de mitigação dos riscos identificados. Nesse sentido, vale a pena ressaltar que a obtenção de um índice de risco global numérico, com relação direta aos níveis de risco pré-estabelecidos e em comparação relativa entre os pontos avaliados, facilita a classificação objetiva deles, para estabelecer uma prioridade de atenção ou de tomada de decisão, além de que a conferência dos riscos mais relevantes em cada caso permite definir um plano de ação específico de mitigação de riscos.

Dessa forma, nos pontos analisados no estudo de caso pode-se promover a implementação de medidas corretivas: sendo o risco de atropelamento considerado o mais preocupante, deve-se focar em instalações de passagens em nível devidamente sinalizadas, reforçando a sinalização em trechos nas proximidades das ocupações, limitar os acessos dos moradores aos trilhos, direcionando-os para os locais de passagens mais seguras, além de conscientizá-los da importância de realizar uma travessia segura e os cuidados que devem ser tomados. Porém, os demais riscos não devem ser negligenciados e ações como melhorar a drenagem longitudinal, retirar os resíduos vertidos, monitorar os taludes e realizar a manutenção periódica da infraestrutura ferroviária precisam ser realizadas para uma operação segura.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou a análise de riscos relacionados às ocupações no entorno das ferrovias em um estudo de caso conduzido em 4 pontos da malha férrea que atravessa a cidade de Santa Maria, RS, mediante um método de análise multicritério que propôs um índice de risco global a partir da agregação ponderada dos níveis de risco parciais sobre potencialidade de atropelamento, tombamento/descarrilamento dos trens, funcionamento deficiente da drenagem e problemas geotécnicos.

Os resultados confirmaram que os riscos associados às ocupações próximas às ferrovias variam de acordo com as características locais, como relevo, infraestrutura e presença de moradias. Entre os riscos mais significativos, destaca o risco de atropelamento e o risco de tombamento, sobretudo nos pontos com proximidade direta às ocupações. Embora os riscos de drenagem ineficiente e geotécnico tenham sido considerados geralmente baixos, o estudo reforça que esses fatores não devem ser descuidados, especialmente frente a cenários de mudanças climáticas e intensificação do uso ferroviário.

Além disso, os resultados evidenciaram que nenhuma área apresentou risco nulo, o que destaca a necessidade de uma gestão contínua e integrada. Áreas com risco global mais elevado, como os pontos com maior presença de moradores próximos a ferrovia, demandam intervenções prioritárias, incluindo a instalação de passagens em nível seguras, melhorias na infraestrutura de drenagem e medidas de fiscalização. Em contrapartida, pontos sem ocupações próximas, apresentaram menores níveis de risco, ressaltando a importância de restringir futuras ocupações nessas áreas para preservar a segurança e a eficiência operacional das ferrovias. Dessa forma, este trabalho contribui especialmente para a literatura especializada, auxiliando na tomada de decisão dos responsáveis pela operação e manutenção ferroviária nestes casos pouco explorados das construções próximas aos trilhos, para cuja análise não existe regulamentação específica nem metodologias que indiquem a prioridade de atuação frente a situações de ocupação generalizada e/ou historicamente consolidadas.

Como principal limitação do trabalho, tem-se a simplificação da avaliação do risco geotécnico, motivada pela indisponibilidade de recursos para a realização dos ensaios sugeridos na metodologia de referência. Por fim, como futuros estudos, recomenda-se a aplicação da metodologia proposta em diferentes contextos geográficos e operacionais, confirmando a aplicabilidade dos resultados obtidos, bem como a utilização de uma escala de risco com valores diferentes de acordo com a percepção de risco. Além disso, seria interessante aprimorar a metodologia mediante a representação dos resultados obtidos no espaço para facilitar a análise geoestatística de cada risco e do risco global, tanto na faixa de domínio ferroviária como na área não edificável.

Agradecimentos
Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processos 305384/2025-2 e 141239/2025-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barba-Romero, S. e J. C. Pomerol (2000) *Multicriterion Decision in Management: principles and practice*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Bubeck, P.; L. Dillenardt; L. Alfieri; L. Feyen; A. H. Thieken e P. Kellermann (2019) Global warming to increase flood risk on European railways. *Climatic change*, v. 155, n. 1, p. 19–36.

Campos, P. C. D.; D. L. Rosa; M. E. Soares Marques e I. Paz (2024) Predisposition to Mass Movements on Railway Slopes: Insights from Field Data on Geotechnical and Pluviometric Influences. *Infrastructures*, v. 9, n. 10.

CNI (2018) Transporte Ferroviário: colocando a competitividade nos trilhos, Confederação Nacional da Indústria, Brasília. ISBN 978-85-7957-212-8.

OpenStreetMap (2025) *OpenStreetMap (base cartográfica)*. Disponível em: https://www.openstreetmap.org

Rhoden, P. S.; L. E. Campos; M.; M. Baroni; A. M. Larranaga e A. Ruiz-Padillo (2024) Ponderação dos riscos relacionados às ocupações no entorno das ferrovias no brasil usando a técnica best-worst scaling. In: Anais do 38º congresso de pesquisa e ensino em transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/ponderacao-dos-riscos-relacionados-as-ocupacoes-no-entorno-das-ferrovias-no-bras?lang=pt-br>.

Rosa, R. A e R. C. H. Ribeiro (2020) *Estradas de ferro | Projeto, Especificação e Construção*. 2ª edição. Vitória, ES: EDUFES. Disponível em: https://edufes.ufes.br/items/show/562

Ruiz-Padillo, A; L. E. Campos; M. Heinrich; S. V. Goetz; P. S. Rhoden e M. Baroni (2025) *Guia educacional sobre riscos relacionados às ocupações no entorno das ferrovias*. 1ª edição. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Pró-Reitoria de Extensão. Disponível em: http://repositorio.ufsm.br/handle/1/33703

Paula Sandri Rhoden (paula.sandri@acad.ufsm.br)
Magnos Baroni (magnos.baroni@ufsm.br)
Alejandro Ruiz Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

COLETA DE DADOS SOBRE SINISTROS DE TRÂNSITO NO BRASIL: IMPLICAÇÕES DA AUSÊNCIA DE PADRÕES PARA A CONSOLIDAÇÃO DO RENAEST

Arlan Junior[1], Diogo Nascimento[1], Carolina Noleto[2], Michelle Andrade[2]
[1]Polícia Rodoviária Federal, [2]Universidade de Brasília

RESUMO
Este estudo tem como objetivo analisar criticamente o padrão de uniformização na coleta de dados de sinistros de trânsito no Brasil. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a importância de padronizar os registros e, em seguida, uma comparação entre os procedimentos adotados por duas agências brasileiras responsáveis pelo registro de sinistros em campo. A análise comparativa permitiu identificar desafios na integração de dados oriundos de metodologias de coleta distintas e sem critérios uniformes. Os resultados evidenciam a necessidade de avanços na padronização da coleta de dados, como forma de fortalecer a consolidação do Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (RENAEST) e contribuir para o desenvolvimento de uma estrutura estratégica de gestão da segurança viária no país.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sinistros de trânsito são reconhecidos como uma questão de saúde pública em todo o mundo (Alonso *et al*., 2015; Rowe *et al.*, 2016; Garrisson *et al*., 2021). Cientes dessa realidade, as Nações Unidas (ONU) incluíram a segurança viária no conjunto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), um plano de ação global que estabelece metas voltadas à promoção da dignidade humana e da qualidade de vida. Entre essas metas, destaca-se o ODS 3.6, que prevê a redução, pela metade, do número global de mortes e lesões decorrentes de sinistros de trânsito (OMS, 2018). Em consonância com essa diretriz, a segurança viária deve ser orientada pela Abordagem do Sistema Seguro (*Safe System Approach*), cujos pilares fundamentais são a responsabilidade compartilhada e o reconhecimento da falibilidade humana (OMS, 2021). Dado que os seres humanos estão sujeitos a erros, cabe aos diversos atores do trânsito, projetistas da infraestrutura viária, legisladores, autoridades de fiscalização, gestores públicos e a própria população, desenvolver sistemas de transporte nos quais as consequências desses erros sejam minimizadas.

Nesse mesmo direcionamento, o Brasil promulgou a Lei nº 13.614/2018 (Brasil, 2018), regulamentada pela Resolução nº 1.004/2023 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2023a), que revisou o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS). As especificações desse plano estão detalhadas em seu Anexo (CONTRAN, 2023b), que ressalta a necessidade de padronização nacional na coleta de dados sobre sinistros de trânsito. O documento enfatiza a importância da uniformidade dos procedimentos adotados pelas diferentes agências responsáveis pelo atendimento e registro dos eventos. Isso envolve a adoção de conceitos comuns e a definição de um conjunto mínimo de elementos a serem incluídos nos formulários padronizados de coleta de dados — medida essencial para a consolidação e eficácia do Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (RENAEST).

A coleta de dados representa uma etapa fundamental para a gestão da segurança viária. As informações obtidas no local do sinistro são cruciais não apenas para a elucidação do evento específico, mas também para subsidiar ações preventivas de policiamento e fiscalização, políticas públicas voltadas à redução da violência no trânsito, programas de educação para o trânsito, intervenções na infraestrutura viária, bem como iniciativas nas áreas da saúde e da seguridade social. Para que essas informações possam embasar análises comparativas em diferentes recortes espaciais e temporais, é imprescindível que sejam coletadas e armazenadas por meio de procedimentos padronizados. A padronização contribui para o aumento da qualidade dos bancos de dados, garantindo maior confiabilidade e segurança nos resultados das análises, os quais fundamentam a tomada de decisões e o planejamento de ações (Rabbani *et al*., 2022).

Diante desse contexto, o objetivo geral deste artigo é apresentar uma análise crítica sobre o padrão da coleta de dados de sinistros no Brasil por meio de um estudo de caráter qualitativo, com abordagem descritiva e analítica.

2. METODOLOGIA

Este estudo partiu do levantamento e análise de publicações nacionais e internacionais que tratam da importância da padronização na coleta de dados de sinistro de trânsito, incluindo diretrizes técnicas e literatura científica recente. Esse levantamento objetiva embasar teoricamente a relevância de um padrão mínimo para registros de sinistros.

Deste, seguiu-se para o levantamento dos formulários e manuais utilizados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF) e pela Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG) para o registro de sinistros de trânsito. A escolha da PRF justifica-se por ser a instituição responsável pelo policiamento ostensivo das rodovias federais brasileiras e por manter a principal base nacional de dados de sinistros de trânsito. Já a PMMG foi selecionada por atuar no estado que detém a maior malha rodoviária do país e por destacar-se, de acordo com Ministério dos Transportes (2025), como um dos estados mais pontuais no envio de dados ao Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (RENAEST).

Esse material subsidiou a análise comparativa de padronização terminológica e conceitual dos dados, por exemplo, tipo de sinistro, manobras dos veículos, estado da vítima e estrutura da via; identificando convergências, divergências e lacunas nos dados registrados. Por fim, foi realizada a análise dos achados frente à literatura e uma reflexão sobre as implicações práticas da ausência de padronização para a consolidação do RENAEST e para a formulação de políticas públicas eficazes.

3. RESULTADOS

De forma a exemplificar a realidade brasileira quanto à padronização do registro de sinistros de trânsito, foi realizada uma análise comparativa de parte dos elementos que compõem os Boletim de Ocorrência de Acidente de Trânsito (BAT) da Polícia Rodoviária Federal (PRF, 2022) e da Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG, 2025). Os BATs analisados seguem o disposto pelo Artigo 4º da Resolução 808/2020 (CONTRAN, 2020) contendo dados das pessoas (vítimas e/ou condutores), dos veículos, da via e do sinistro propriamente dito.

Foram analisados os dados de um elemento de cada grupo, sendo: grau de lesão (para pessoas), manobra (para veículos), estrutura da via (para via) e tipo de sinistro (sinistro propriamente dito). Esse conjunto é composto de 50 itens de coleta no formulário da PRF e 46 no da PMMG. A análise comparativa está sumarizada na Tabela 1, e o detalhamento dos elementos de cada grupo encontra-se no Apêndice.

Tabela 1: Síntese da análise comparativa PRF x PMMG

Elemento	Convergência	Divergência / Lacuna	Implicação principal
Pessoas: Grau de lesão	Classificações principais comuns	PMMG mais abrangente	Limita integração com dados de saúde
Veículos: Manobra	14% coincidente 50% descrições semelhantes	Variação léxica e detalhamento distintos	Dificulta a análise de comportamento e causalidade
Via: estrutura	Concordância parcial	Ênfases distintas (estrutural x topográfica)	Prejudica a análise de fatores ambientais do sinistro
Sinistro: tipo	39% dos termos coincidem	Variação léxica e semântica, ausência de categorias	Compromete padronização nacional

Para os quatro elementos analisados foram identificados dados coincidentes, semânticas semelhantes, mesma informação com terminologia diferente (variações léxicas), informações exclusivas para um ou para outro órgão, e análises com ênfases diferentes, como ocorreu para o elemento "via: estrutura", por exemplo. As variações léxicas, ainda que não alterem necessariamente o significado dos termos, podem comprometer a interoperabilidade dos sistemas, especialmente em bases integradas em âmbito nacional, como o RENAEST. Essas variações exigem esforços adicionais de padronização, por meio de dicionários de equivalência terminológica ou codificações unificadas, sob risco de erros que afetam a qualidade dos dados. Tratamento similar deve ser aplicado à ausência de categorias específicas em alguns casos, evidenciada pela inexistência

de variáveis correspondentes entre os registros da PRF e da PMMG. Essa inconsistência compromete a capacidade da base de dados representar com fidelidade as características dos sinistros de trânsito (NHTSA, 2024). Aspectos de divergências nos padrões de registro de sinistros observadas entre PRF e PMMG refletem problemas já apontados em relatórios técnicos sobre o RENAEST, como a baixa completude de variáveis fundamentais e a alta variabilidade entre os registros estaduais (ONSV e UFPR, 2023).

Nos Estados Unidos, a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA, 2024) alerta que a falta de uniformidade entre os relatórios policiais de sinistros elaborados por cada estado pode dificultar significativamente a análise oportuna de dados críticos. A comparação entre localidades torna-se complexa quando os elementos de dados utilizados para descrever características semelhantes dos sinistros possuem definições distintas ou abrangem informações diferentes. Além disso, na ausência de diretrizes ou capacitação padronizada, as interpretações podem variar consideravelmente em todo o país.

Para mitigar essas limitações, a NHTSA (2024) desenvolveu o *Model Minimum Uniform Crash Criteria* (MMUCC), um guia com padrões mínimos e uniformes para a coleta de dados sobre sinistros de trânsito nos Estados Unidos. Considerando a autonomia dos estados norte-americanos, o MMUCC pode ser uma referência de modelo para o Brasil, que também conta com múltiplos órgãos atuando na coleta de dados. Seu foco está alinhado à necessidade de padronização e consolidação de uma base nacional, como a proposta pelo RENAEST (CONTRAN, 2020).

A literatura científica também discute os desafios relacionados à falta de uniformidade na coleta de dados sobre sinistros de trânsito. Rabbani *et al*. (2022), por exemplo, destacam que a coleta de dados desempenha um papel fundamental na formulação de legislações mais seguras para os usuários da via, orientando políticas futuras. Os dados recolhidos permitem a identificação dos problemas e seus impactos econômicos, subsidiando a concepção de estratégias eficazes para viabilizar os investimentos nos programas de prevenção dos sinistros. A importância também se estende à compreensão da tendência de lesões e fatalidades, identificando os locais com a maioria dos sinistros e características de maior gravidade das lesões, avaliando e monitorando o uso dos planos estratégicos elaborados para a redução de sinistros.

Conforme Ozianyi e Kenga (2014), é papel do governo estabelecer um banco de dados nacional de sinistros, integrando-o a outros subsistemas relevantes, como os registros de motoristas, veículos e penalidades. No mesmo sentido, Rabbani *et al.* (2022) destacam que a gravidade dos sinistros foi reduzida em países desenvolvidos que adotaram sistemas avançados de segurança viária e mecanismos eficientes de coleta de dados. As informações coletadas podem ser utilizadas para definir metas de redução de sinistros, avaliar o impacto das intervenções, monitorar as condições de segurança rodoviária e promover a conscientização da população sobre os efeitos dos sinistros.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou que a ausência de padronização na coleta de dados de sinistros de trânsito no Brasil compromete a qualidade, a comparabilidade e a utilidade das informações para a formulação de políticas públicas. A análise dos formulários da PRF e da PMMG revelou divergências terminológicas, ausência de categorias específicas e enfoques distintos, dificultando a consolidação de uma base nacional de dados confiável.

Modelos internacionais, como o MMUCC (NHTSA, 2024) adotado nos Estados Unidos, demonstram a importância de critérios mínimos padronizados para garantir interoperabilidade entre sistemas. No Brasil, a efetiva consolidação do RENAEST, prevista na Resolução CONTRAN nº 808/2020 e alinhada ao PNATRANS (CONTRAN, 2023a), depende da harmonização dos procedimentos entre os órgãos envolvidos.

Uma limitação deste estudo foi a indisponibilidade da metodologia atualmente utilizada pela SENATRAN no RENAEST, o que impediu uma análise mais completa da aderência dos registros estaduais ao sistema. Recomenda-se, como estudo futuro, a realização de um estudo nacional envolvendo todos os órgãos que coletam dados de sinistros, com o objetivo de construir um modelo unificado de Padrões Mínimos para Banco Nacional de Dados de Sinistro de Trânsito. Com base nesse modelo e mediante a cooperação entre os órgãos

responsáveis pela coleta de dados de sinistro e a SENATRAN, será possível considerar um sistema unificado para o registro de dados de sinistro, contribuindo para a consolidação do RENAEST e para o efetivo aprimoramento da qualidade de dados, conforme apontado pelo *World Bank* (2021) e pela NHTSA (2024).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, F.; J. C. Pastor; L. Montoro e C. Esteban (2015) Driving under the influence of alcohol: frequency, reasons, perceived risk and punishment. *Substance Abuse Treatment, Prevention, and Policy*, v. 10, n. 11. DOI: 10.1186/s13011-015-0007-4.

Brasil (2018) *Lei nº 13.614, de 11 de janeiro de 2018*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 12 jan. 2018. p. 1.

CONTRAN (2020) *Resolução nº 808, de 15 de dezembro de 2020. Dispõe sobre o Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (Renaest) e dá outras providências*. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 24 dez. 2020.

CONTRAN (2023a) *Resolução nº 1.004, de 21 de dezembro de 2023. Referenda a Deliberação CONTRAN nº 271, de 28 de novembro de 2023 [...]* . Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao10042023.pdf (Acesso em 11 jun. 2025).

CONTRAN (2023b) Anexo. In: *Resolução nº 1.004, de 21 de dezembro de 2023*. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao10042023_Anexo_v2.pdf (Acesso em 11 jun. 2025).

Garrisson, H.; A. Scholey; E. Ogden e S. Benson (2021) The effects of alcohol intoxication on cognitive functions critical for driving: A systematic review. *Accident Analysis and Prevention*, v. 154, p. 106052. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106052.

Ministério dos Transportes (2025) Com versão digital, mais estados mantêm RENAEST atualizado. Governo Federal. 20 de fevereiro de 2025. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2025/02/com-versao-digital-mais-estados-mantem-renaest-atualizado (Acesso em: 12/07/2025).

NHTSA (2024) *MMUCC Guideline: Model Minimum Uniform Crash Criteria* (6. ed.). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration (Report No. DOT HS 813 525). Disponível em: https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/813525 (acesso em 11 jun. 2025).

ONSV e UFPR (2023) Análise da completude dos dados do Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito (RENAEST). Observatório Nacional de Segurança Viária e Universidade Federal do Paraná. Disponível em: https://www.onsv.org.br/estudos-pesquisas/estudos-e-pesquisas

Ozianyi, V. e D. Kenga (2014) A Mobile Solution for Road Accident Data Collection. In: *Proceedings of the 2nd Pan African International Conference on Science, Computing and Telecommunications (PACT)*, Arusha. DOI: 10.1109/SCAT.2014.7055140.

PMMG (2025) *Sistema Integrado de Segurança Pública (SISP): Registro de Eventos de Defesa Social (REDS) - Ambiente de Treinamento*. Disponível em: https://api-sso-treinamento.sids.mg.gov.br/authenticationendpoint/[...] (acesso em 11 jun. 2025).

PRF (2022) *M-015: Manual de atendimento e perícia de acidentes de trânsito*. Brasília, DF: Polícia Rodoviária Federal

Rabbani, M. B. A.; M. A. Musarat; W. S. Alaloul; S. Ayub; H. Bukhari e M. Altaf (2022) Road accident data collection systems in developing and developed countries: a review. *International Journal of Integrated Engineering*, v. 14, n. 1, p. 336-352. DOI: 10.30880/ijie.2022.14.01.031.

Rowe, R.; E. Andrews; P. R. Harris; C. J. Armitage; F. P. McKenna e P. Norman (2016) Identifying beliefs underlying pre-drivers' intentions to take risks: An application of the Theory of Planned Behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, v. 89, p. 49-56. DOI: 10.1016/j.aap.2015.12.024.

OMS (2018) *Global status report on road safety 2018*. Geneva: World Health Organization. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684 (Acesso em 11 jun. 2025).

OMS (2021) *Global plan for the decade of action for road safety 2021-2030*. Geneva: World Health Organization. Disponível em: https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-roadsafety-2021-2030 (Acesso em 11 jun. 2025).

World Bank (2021) Global road safety facility: Guidance note on road crash data collection and management (No. P172179). Disponível em: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099140001132222667/pdf/P172179048895f706d0a3d50134491fe8699.pdf (Acesso em: 12/07/2025).

Arlan Pinheiro de Oliveira Júnior (arlan.pinheiro@prf.gov.br)
Diogo de Oliveira Nascimento (diogo.nascimento@prf.gov.br)
Polícia Rodoviária Federal, SPO, Quadra 03, Lt.05, Complexo Sede da PRF. CEP 70610-909 – Brasília/DF.
Carolina Noleto Perna (carolina.nperna@gmail.com)
Michelle Andrade (michelleandrade@unb.br)
Universidade de Brasília (UNB), Programa de Pós-graduação em Transportes, Anexo SG-12, 1º andar. *Campus* Darcy Ribeiro. CEP 70910-900 – Brasília/DF.

APÊNDICE

Elementos dos grupos para coleta de dados	PRF	PMMG
Dados do sinistro: tipo de sinistro	Atropelamento de Animal Atropelamento de Pedestre Capotamento Colisão com objeto ------- Colisão frontal Colisão lateral mesmo sentido e Colisão lateral sentido oposto Colisão traseira Colisão transversal Derramamento de carga Engavetamento Incêndio Eventos atípicos Queda de ocupante de veículo ------- Saída de leito carroçável ------- ------- Sinistro pessoal de trânsito Tombamento	Atropelamento de animal Atropelamento de pessoa Capotamento ------- Choque Colisão frontal Colisão lateral ------- Colisão traseira Colisão transversal Queda / Vazamento de carga Engavetamento Incêndio em veículo Tipo de acidente - outros Queda de pessoa de veículo Queda de veículo Saída de pista Soterramento de veículo Submersão de veículo ------- Tombamento
Dados do veículo: manobra do veículo no sinistro	Entrando na via ------- Cruzando a pista Estacionado/parado na faixa de rolamento Estacionado/parado no acostamento ------- ------- Realizando retorno regular Realizando retorno irregular ------- Transitando em marcha a ré Mudando de faixa Saindo da via Seguindo o fluxo, na faixa de rolamento Transitando na contramão de direção Transitando no acostamento Ultrapassando ------- ------- Outras (informações complementares)	Entrando na Via Partindo de Estacionado Cruzando o Fluxo de Trânsito Estacionado ------- Estacionando Diminuindo a Marcha Ou Parado Realizando Manobra de Retorno ------- Evitando Obstáculo Recuando (ré) Mudando de Faixa de Trânsito Saindo da Via Seguindo em Frente ------- ------- Ultrapassando Convergindo Deslocando-se sem Condutor -------
Dados da vítima: grau de lesão dos envolvidos	Ileso, lesões leves, lesões graves, morto	Fatal, leves, graves ou inconsciente, sem lesões aparentes, grau de lesão – ignorado
Dados da via: estrutura da via	Reta, curva, aclive, declive, interseção de vias, rotatória, desvio temporário, em obras, ponte, viaduto, retorno regulamentado, túnel	Traçado: Reta, Curva, Sinuosa. Relevo da pista: plano, inclinado, depressão, lombada, outros (no histórico)

DIFERENÇAS NA PERCEPÇÃO DE RISCO EM PASSAGENS RODOFERROVIÁRIAS: IMPLICAÇÕES PARA A SEGURANÇA E GESTÃO DE RISCO

Matheus Nobia Alves, Julia Bibiana Zschitschick Souza, Vanessa Teresinha Alves, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

RESUMO
Este estudo tem como objetivo investigar a percepção de risco em passagens em nível rodoferroviárias no Brasil, com foco nas diferenças entre motoristas, maquinistas e profissionais do setor ferroviário. Utilizando um questionário estruturado, a pesquisa coletou dados sobre a percepção de risco de painéis de especialistas destes três grupos em diferentes tipos de passagens, sendo analisada por meio de modelagem *fuzzy* e testes estatísticos (ANOVA e Tukey). Os resultados demonstraram divergências significativas entre os grupos, especialmente no que diz respeito à percepção dos motoristas, que tenderam a subestimar os riscos, especialmente nas passagens passivas, enquanto houve consenso no maior risco percebido em passagens clandestinas. Por outro lado, as passagens com tecnologias avançadas, mesmo com diferenças entre os grupos, tiveram o menor risco percebido. O estudo enfatiza a importância de integrar aspectos técnicos e comportamentais nos modelos de gestão de risco, sugerindo a implementação de estratégias de conscientização e treinamento contínuo.

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário exerce papel decisivo na logística global e no desenvolvimento econômico, especialmente em países de grande extensão territorial e para o escoamento de produtos de grande volume (China, 2023; AAR, 2023). Comparado a outros modos de transporte, o ferroviário apresenta menores custos operacionais e consumo energético, além de reduzir as emissões de carbono, o que reforça seu potencial como solução logística sustentável (Rong *et al*., 2025; Li *et al.*, 2024).

Todavia, no âmbito da infraestrutura ferroviária, persistem desafios que demandam atenção. De fato, investimentos contínuos em modernização de trilhos, sistemas de sinalização e material circulante têm sido fundamentais para ampliar essa eficiência e mitigar impactos ambientais (Gholamizadeh *et al.*, 2022). Nesse sentido, cabe destacar as passagens em nível como um dos principais pontos críticos para a segurança da operação ferroviária. Definidas como cruzamentos onde a via férrea e a rodovia estão no mesmo plano, essas interseções concentram elevado potencial de acidentes e exigem avaliação detalhada de seu traçado geométrico, dispositivos de controle e sinalização (Read *et al*., 2021). Na Europa, a *European Railway Agency* estimou em média 300 sinistros anuais em passagens de nível, correspondendo a um terço de todas as mortes ferroviárias no continente (ERA, 2020). Na América do Norte, o *Canadian National Railway* registrou aumento de 10% nas fatalidades nesse tipo de cruzamento entre 2015 e 2020 (CN, 2020).

Os riscos inerentes às passagens em nível são multifacetados e de difícil caracterização por uma única métrica. Aspectos técnicos interagem com fatores físicos ampliando a variabilidade dos cenários de perigo (Beanland *et al.*, 2018). Adicionalmente, o componente comportamental assume papel central na segurança das passagens em nível, pois envolve a percepção subjetiva de risco pelos usuários. Estudos indicam que motoristas frequentemente subestimam alertas sonoros e visuais, ignorando a iminência de um trem e aumentando a probabilidade de colisões (Larue *et al*., 2020). Da mesma forma, pedestres costumam invadir áreas restritas mesmo com sinais de perigo ativados (Zhang *et al*., 2022). A dimensão subjetiva dessa percepção de risco é considerada tão relevante quanto os fatores mensuráveis, pois suas variações influenciam diretamente o comportamento e, consequentemente, a probabilidade de acidentes (Larue *et al*., 2020). A dificuldade de avaliar essas percepções reforça a necessidade de abordagens integradas e robustas, visando reduzir comportamentos de risco em cruzamentos ferroviários.

Com base na dimensão subjetiva que caracteriza a percepção de risco em passagens em nível, este estudo tem como objetivo principal investigar, de forma comparativa, como os usuários cotidianos desses cruzamentos e os profissionais especialistas em transporte ferroviário avaliam os perigos inerentes às interseções rodovia–ferrovia no Brasil. Para tanto, foram coletados dados relativos a motoristas, maquinistas, pesquisadores, gestores e técnicos ferroviários com o intuito de analisar as diferenças e convergências nas percepções de risco entre esses grupos. A partir dessa abordagem, pretende-se fornecer subsídios científicos que contribuam para aprimorar estratégias de engenharia e programas educativos, alinhando medidas técnicas e comportamentais à

realidade vivenciada em pontos críticos da malha ferroviária brasileira.

2. METODOLOGIA

A coleta de dados foi realizada por meio de um questionário *on-line* estruturado, desenvolvido para captar a percepção de risco de usuários qualificados sobre as passagens de nível em que atuam. O questionário abordou questões relacionadas a seis tipos diferentes de passagens de nível na malha ferroviária brasileira: ativa, passiva, controlada manualmente, com tecnologias avançadas, especializada e clandestina, além de uma avaliação geral do risco. As perguntas do questionário foram elaboradas a partir de cada um dos temas propostos. Inicialmente, solicitou-se que o participante atribuísse um nível de risco, dentre 5 opções variando de "extremamente perigosa" a "nada perigosa", às passagens que costuma utilizar ou onde costuma trabalhar. Em seguida, aplicou-se a mesma lógica para cada tipo de passagem presente no sistema ferroviário, desta vez em uma análise comparativa entre as seis categorias apresentadas, sempre utilizando a mesma escala de avaliação. As respostas foram coletadas de forma anônima e voluntária. Para a análise comparativa, os respondentes foram organizados em três grupos, a modo de painéis de especialistas na área (Turoff, 1970): maquinistas, com experiência direta na operação das locomotivas; motoristas, que utilizam as passagens em seus trajetos diários; e profissionais do setor ferroviário, incluindo gestores, técnicos e pesquisadores, com uma visão mais técnica e estratégica sobre o sistema.

Para lidar com a subjetividade presente nas respostas, os dados foram analisados mediante uma modelagem *fuzzy*, que permite considerar as imprecisões e incertezas das respostas. A partir de etiquetas linguísticas pré estabelecidas sobre a escala de 5 opções, foram utilizados números *fuzzy* do tipo triangular (Oestreich *et al*., 2021; Ruiz-Padillo *et al.*, 2016), como mostrado na Figura 1.

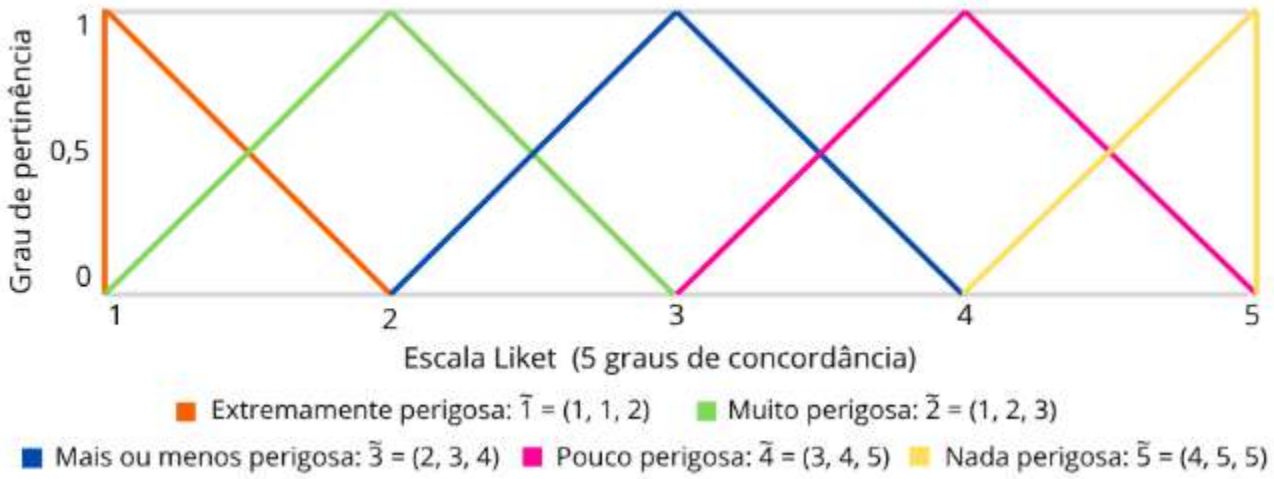


Figura 1: Números *fuzzy* aplicados às etiquetas linguísticas das respostas dos painéis de especialistas. Fonte: os autores.

As respostas *fuzzy* dos participantes foram agregadas a partir da média geométrica para obter valores médios *fuzzy* representativos de grupo de estudo e, na sequência, foram comparados mediante o teste paramétrico de análise de variância unidirecional *fuzzy* (FANOVA) para cada tipo de passagem em nível com o intuito de verificar se existem diferenças estatisticamente significativas na percepção de risco entre os três grupos analisados. O teste adotou a hipótese nula a partir da distribuição F entre os grupos com um nível de significância de 5% (valor F tabelado de 3,13), considerando o número de graus de liberdade dentro de cada grupo e entre eles. Para os casos em que o FANOVA indicou diferenças significativas, ou seja, rejeitou a hipótese nula, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Tukey, que permite identificar entre quais pares de grupos existem tais diferenças. Finalmente, com o intuito de fornecer um parâmetro que representa a percepção geral do grupo para cada tipo de risco, levando em conta a percepção de todos os usuários, e de facilitar a comparação e a discussão desses resultados, os valores médios finais foram *defuzzificados* a partir do método do centróide difuso (Oestreich *et al*., 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O questionário aplicado obteve 83 respostas em total: 13 de motoristas, 29 de maquinistas e 41 de profissionais

do setor, superando os valores mínimos estabelecidos pela literatura para formação dos painéis de especialistas (Turoff, 1970) e contando com representação de várias regiões geográficas do Brasil. Através das respostas coletadas, foram obtidos valores *fuzzy* para cada resposta analisada, conforme a Tabela 1, e assim resultando em média *fuzzy* e *defuzzificada* para cada grupo, de acordo com os riscos observados.

Tabela 1: Análise das percepções dos motoristas, técnicos e profissionais sobre os riscos nas passagens em nível

	Média *fuzzy*			Média *defuzzificada*		
Passagens em nível	**Motoristas**	**Maquinistas**	**Profissionais**	**Motoristas**	**Maquinistas**	**Profissionais**
Em geral	(1,97, 2,88, 3,89)	(1,30, 1,88, 2,95)	(1,30, 1,90, 2,98)	2,91	2,04	2,06
Ativas	(1,87, 2,53, 3,55)	(1,86, 2,64, 3,70)	(2,28, 3,32, 4,29)	2,65	2,73	3,30
Passivas	(1,56, 2,50, 3,56)	(1,23, 1,63, 2,70)	(1,28, 2,00, 3,06)	2,54	1,85	2,11
Controladas manualmente	(1,97, 3,06, 3,99)	(2,01, 3,00, 4,01)	(1,93, 2,94, 3,90)	3,01	3,01	2,92
Tecnologias avançadas	(2,32, 3,42, 4,22)	(2,47, 3,45, 4,38)	(3,14, 4,17, 4,77)	3,32	3,43	4,03
Especializadas	(1,77, 2,75, 3,68)	(2,04, 3,11, 4,11)	(2,13, 3,08, 4,00)	2,73	3,09	3,07
Clandestinas	(1,05, 1,15, 2,18)	(1,17, 1,46, 2,53)	(1,08, 1,19, 2,22)	1,46	1,72	1,50

Fonte: os autores.

Para a aplicação do teste FANOVA, a amostra demonstrou-se adequada através dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, que identificaram que os dados seguem uma distribuição normal e que as variâncias dos grupos são iguais, mesmo com tamanhos diferentes. Os resultados dos testes estatísticos se mostram esquematicamente na Figura 2. Dessa forma, é possível verificar que as percepções de risco sobre as passagens ativas, controladas manualmente, especializadas e clandestinas não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, ou seja, pode se concluir que os três grupos avaliaram o risco dessas passagens de forma semelhante. Mesmo assim, ao analisar os valores médios *defuzzificados* das percepções de risco (Tabela 1), motoristas e maquinistas classificaram os riscos nas passagens ativas de forma mais intensa, com médias de 2,65 e 2,73, respectivamente, enquanto os profissionais perceberam um risco mediano (3,30). Nas passagens controladas manualmente e nas especializadas, todos os grupos apresentaram percepções de risco intermediário, com médias próximas de 3,00. As passagens clandestinas, por sua vez, foram unanimemente reconhecidas como de alto risco, destacando a gravidade delas devido à falta de infraestrutura adequada e controle dentro da malha.

Para as passagens passivas e com tecnologias avançadas, o FANOVA identificou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Os resultados do teste de Tukey no caso das passagens passivas mostraram diferenças significativas em todas as comparações entre os grupos, ou seja, cada grupo percebe o risco de forma diferente, com os maquinistas e profissionais atribuindo um risco elevado (1,85 e 2,11), enquanto os motoristas deram uma avaliação mais moderada (2,54). Já para as passagens com tecnologias avançadas, as de menor risco percebido, as percepções de risco dos motoristas e maquinistas são estatisticamente iguais, mas o mesmo não acontece entre os motoristas (3,32) e profissionais (4,03), e ainda, entre maquinistas (3,43) e profissionais, onde os grupos têm diferença estatística significativa. Isso indica alinhamento entre motoristas e maquinistas, enquanto os profissionais do setor têm uma percepção distinta, com menor risco.

Em relação à percepção de risco geral nas passagens em nível, os resultados também mostraram diferenças estatisticamente significativas entre motoristas (2,91), indicando "pouco perigoso", mas ainda próximo de "mais ou menos perigoso", e os outros dois grupos, pois maquinistas e profissionais atribuíram um risco maior, com médias de 2,04 e 2,06, respectivamente, sugerindo uma percepção de perigo mais elevada nessas passagens. Esse contraste sugere que os motoristas, que têm maior liberdade de manobra, subestimam os riscos em passagens em geral e, sobretudo, nas mais perigosas, como as passivas, o que pode resultar em comportamentos inadequados e maior risco de acidentes em áreas críticas, onde a atenção é fundamental (Larue *et al*., 2020).

Portanto, os resultados revelam uma diferença significativa na percepção de risco entre os diferentes grupos avaliados, e evidenciam a importância de incorporar a variável percepção de risco na avaliação das passagens em nível, especialmente ao se considerar a diversidade de perfis envolvidos na operação ferroviária. A diferença nas avaliações entre motoristas, maquinistas e profissionais reforça que a percepção de risco não é uniforme e, portanto, não pode ser desconsiderada nos modelos tradicionais de gestão de risco ferroviário. Ainda, cabe destacar a menor percepção de risco dos motoristas, que pode ser atribuída à falta de conscientização ou negligência quanto à periculosidade nas travessias (Beanland *et al.*, 2018; Zhang *et al*.,

2022). Já os maquinistas e profissionais, com mais experiência operacional, reconhecem as passagens de nível como pontos críticos, o que reforça a necessidade de melhorar a comunicação e a conscientização sobre os riscos, especialmente nas passagens passivas e clandestinas, que apresentam maior potencial de risco.

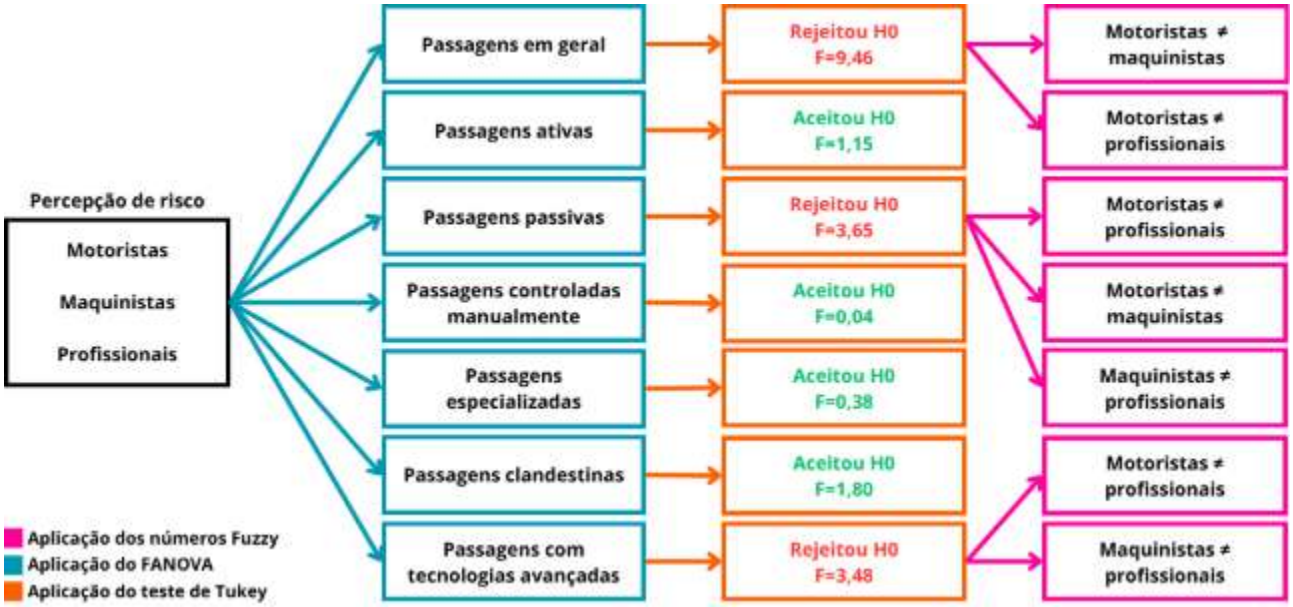


Figura 2: Resultados da aplicação dos testes FANOVA e Tukey. Fonte: os autores.

As passagens passivas (que representam grande parte da malha brasileira), revelaram o maior descompasso entre os grupos, com motoristas atribuindo menor risco a essas estruturas. Isso levanta um sinal de alerta, pois os dados sugerem que os usuários rodoviários não reconhecem adequadamente o grau de perigo associado à travessia, especialmente na ausência de dispositivos de controle. Tal percepção pode gerar comportamentos inseguros ou automatizados, como o avanço sem redução de velocidade, o desrespeito à sinalização ou a tomada de decisão com base em heurísticas falhas (Larue *et al*., 2020).

No entanto, para os demais tipos de passagens em nível, que incorporam sistemas de segurança específicos, o comportamento humano também não pode ser desconsiderado, pois, como apontado por Zhang *et al*. (2022), ele é altamente imprevisível, e essa variabilidade reduz a eficácia de sistemas de controle convencionais. Ou seja, mesmo com tecnologias de mitigação e barreiras físicas, o risco persiste se os usuários não internalizam cognitivamente o perigo. Isso ressalta o papel do fator humano como um elo vulnerável da segurança ferroviária, sendo imprescindível que os modelos de avaliação de risco integrem essa dimensão comportamental de maneira estruturada.

Por outro lado, ainda que o risco comportamental venha sendo discutido em literatura especializada, ele raramente é formalmente incorporado aos sistemas de avaliação. Segundo Read *et al*. (2021), apenas a Austrália inclui explicitamente o risco comportamental em suas matrizes de risco ferroviário, o que evidencia uma lacuna metodológica relevante em nível internacional. Isso se traduz em modelos de risco que subestimam variáveis críticas associadas à percepção, tomada de decisão e resposta humana, dificultando uma abordagem preditiva eficaz. No contexto brasileiro, essa questão torna-se ainda mais crítica. A predominância de passagens passivas na malha ferroviária nacional exige uma atenção especial, pois, como demonstrado pelos dados, essas passagens são aquelas em que a percepção de risco pelos motoristas é menos alinhada com o risco real da operação. Tal desalinhamento é perigoso, pois transfere uma carga decisória excessiva para o usuário rodoviário, tornando o comportamento individual um fator determinante para a segurança da travessia. Em outras palavras, o risco nessas estruturas passa a depender mais da atitude dos usuários do que da robustez do sistema, e foi verificado que a percepção de risco varia segundo os usuários, o que destaca a necessidade de estudos nesse sentido.

A análise sugere que as estratégias de mitigação devem ir além da engenharia tradicional e incorporar abordagens que promovam a conscientização ativa e o engajamento perceptivo dos usuários. Isso inclui o uso

de intervenções comportamentais fundamentadas na neurociência e na psicologia do trânsito, campanhas de comunicação de risco que utilizem elementos visuais e auditivos com alto impacto emocional, bem como o desenvolvimento de simuladores e experiências imersivas capazes de recalibrar a percepção de risco, direcionados sobretudo aos motoristas que fazem uso dos cruzamentos, uma vez que possuem maior liberdade de movimento ao atravessá-los. Além disso, é recomendável a adoção de sistemas adaptativos de sinalização, que ajustem os estímulos emitidos conforme o comportamento observado dos usuários, como a velocidade de aproximação ou o tempo de exposição à travessia (Zhang *et al*. 2022; Larue *et al*., 2020; Beanland *et al.*, 2018).

4. CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar a percepção de risco em passagens em nível rodoferroviárias, foram elaborados questionários com base numa escala de 5 opções de periculosidade, e aplicados a especialistas e usuários qualificados do sistema, abordando tanto a percepção geral quanto a percepção por tipo de passagem. Esses instrumentos foram aplicados a três grupos distintos: profissionais (gestores, técnicos e pesquisadores), que representam os especialistas e, motoristas e maquinistas que representam os qualificados. Após a coleta dos dados, eles foram analisados mediante uma modelagem *fuzzy* e foram aplicados os testes estatísticos FANOVA e de Tukey, para identificar e interpretar as diferenças estatisticamente significativas entre as percepções dos grupos participantes.

Os resultados indicam divergências significativas entre os grupos avaliados, especialmente no que se refere à percepção de risco dos motoristas, que apresentaram menor preocupação tanto em relação ao risco geral quanto, de forma mais crítica, às passagens passivas, justamente as mais presentes na malha ferroviária brasileira e possivelmente mais perigosas. Essa discrepância aponta para um comportamento potencialmente inseguro por parte desse grupo, o que reforça a importância de considerar o fator humano nas avaliações de risco. Por outro lado, em passagens com tecnologias avançadas e em outras tipologias, observou-se maior alinhamento entre os grupos, sugerindo que a presença de elementos de controle contribui para a harmonização das percepções.

Diante desses achados, torna-se evidente a necessidade de ações integradas entre os setores ferroviário e rodoviário, com foco na capacitação contínua dos motoristas e no desenvolvimento de estratégias de comunicação de risco mais eficazes, baseadas em princípios de segurança comportamental. Além disso, os resultados reforçam a importância de se incluir, nos modelos de gestão de risco, tanto variáveis objetivas (infraestrutura e tecnologia) quanto subjetivas (percepção e comportamento), e levar em conta que todas elas podem ser avaliadas de forma diferente segundo o tipo de usuário. Assim, como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se aprofundar a investigação sobre os fatores que levam motoristas a subestimar os riscos em passagens em nível, a fim de desenvolver abordagens específicas que promovam uma melhor compreensão do risco real e, consequentemente, uma mudança comportamental que contribua para a segurança da operação ferroviária.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processos 305384/2025-2 e 138253/2025-0) e da CAPES (Processo 23081.063330/2024-34).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Association of American Railroads – AAR (2023) *AAR-Investments-Fact-Sheet*. Washington, D.C.: AAR.

Ruiz-Padillo, A.; A. J. Torija; A. Ramos-Ridao e D. P. Ruiz (2016) *Application of the fuzzy analytic hierarchy process in multi-criteria decision in noise action plans: Prioritizing road stretches.* Environmental Modelling & Software, v. 81, p. 45–55. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.03.009

Beanland, V.; E. Grant; G.J.M. Read; N. Stevens; M. Thomas; M.G. Lenné; N.A. Stanton e P.M. Salmon (2018) Challenging conventional rural rail level crossing design: Evaluating three new systems thinking-based designs in a driving simulator. *Safety Science*, v. 110, p. 100–114. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.03.002

China (2023) China's rail freight volume up 4.4% in 2022. The State Council Information Office of the People's Republic of China. Disponível em: https://english.www.gov.cn

CN (2020) *Rail Safety Report 2020*. Canadian National Railway. Disponível em: https://www.cn.ca

ERA (2020) *Rail Safety in the European Union 2020*. Valenciennes: European Railway Agency. Disponível em: https://www.era.europa.eu

Gholamizadeh, K.; E. Zarei e M. Yazdi (2022) Railway Transport and Its Role in the Supply Chains: Overview, Concerns,

and Future Direction. In Sarkis, J. (ed.) *The Palgrave Handbook of Supply Chain Management*. Cham: Springer International Publishing, p. 1–28. DOI: 10.1007/978-3-030-89822-9_95-1

Larue, G.S.; R.A. Blackman e J. Freeman (2020) Frustration at congested railway level crossings: How long before extended closures result in risky behaviours? *Applied Ergonomics*, v. 82. DOI: 10.1016/j.apergo.2019.102943

Li, S.; J. Wu; Y. Jiang e X. Yang (2024) Impacts of the sea-rail intermodal transport policy on carbon emission reduction: The China case study. *Transport Policy*, v. 158, p. 211–223. DOI: 10.1016/j.tranpol.2024.09.019

Oestreich, L., Torres, T.B. e Ruiz-Padillo, A. (2021) Fuzzy analysis of students' perception of traffic safety in school environments: the case of a small Brazilian city. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 28:2, 255-265. DOI: 10.1080/17457300.2021.1909625

Read, G.J.M.; J.A. Cox; A. Hulme; A. Naweed e P.M. Salmon (2021) What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking. *Safety Science*, v. 138, p. 105207. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105207

Rong, C.; X. Li; G. Zhang e X. Wang (2025) Analysis on the adjustment of transportation structure and the logistics transformation of railway freight. *Railway Sciences*, v. 4, p. 82–96. DOI: 10.1108/RS-09-2024-0040

Turoff, M. (1970). The design of a policy Delphi. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 2, n. 2, p. 149–171. DOI: 10.1016/0040-1625(70)90161-7

Zhang, Z.; A. Zaman; J. Xu e X. Liu (2022) Artificial intelligence-aided railroad trespassing detection and data analytics: Methodology and a case study. *Accident Analysis and Prevention*, v. 168. DOI: 10.1016/j.aap.2022.106594

Matheus Nobia Alves (matheus.nobia@acad.ufsm.br)
Julia Bibiana Zschitschick Souza (julia.zschitschick@acad.ufsm.br)
Vanessa Teresinha Alves (vanessa.alves@ufsm.br)
Alejandro Ruiz Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

DISPOSITIVOS DE DRENAGEM RODOVIÁRIA COMO FATORES DE RISCO EM SAÍDA DE PISTA: TRANSPONIBILIDADE E SEGURANÇA LATERAL

Filipe Tosta de Sene, Rogério Lemos Ribeiro
Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Civil

RESUMO
A drenagem rodoviária desempenha papel fundamental na preservação do pavimento e na garantia da trafegabilidade. No entanto, dispositivos como valetas, sarjetas, bueiros e canaletas, quando projetados exclusivamente com foco na eficiência hidráulica, sem considerar aspectos de segurança viária, podem representar obstáculos perigosos em casos de saída de pista. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre a relação entre sistemas de drenagem e a recuperação segura de veículos fora da pista, baseada na análise de 34 documentos, entre artigos científicos, normas técnicas e relatórios institucionais. Os resultados indicam que o desempenho funcional desses dispositivos influencia a severidade dos sinistros, sendo a transponibilidade um fator determinante. Constatou-se a ausência de critérios de transponiblidade e zonas livres de obstáculos nos principais manuais brasileiros, em contraste com boas práticas internacionais. Como contribuição prática, o estudo fornece subsídios para atualizar manuais técnicos, conciliando desempenho hidráulico e segurança viária na redução de sinistros graves.

1. INTRODUÇÃO

A drenagem rodoviária é crucial para a durabilidade do pavimento e para a garantia da trafegabilidade sob diferentes condições climáticas. No entanto, quando seus elementos – como valetas, sarjetas, canaletas e bueiros - não seguem critérios de segurança viária no seu projeto e na sua implantação, podem se tornar obstáculos rígidos que agravam sinistros, especialmente por saída de pista (BARAL e SHAHANDASHTI, 2022; CNT, 2023; FERNANDO et al., 2019; LEMOS, 2024).

A transposição segura desses dispositivos depende de aspectos como profundidade, largura, revestimento e ângulo de taludes, sendo essencial revisar seus critérios geométricos e funcionais para alinhar desempenho hidráulico e segurança (BARAL e SHAHANDASHTI, 2022; DOMENICHINI et al., 2013a; RODOVIÁRIO DE PASSAGEIROS et al., 2015). Normas internacionais, como o *Roadside Design Guide* (AASHTO, 2011), introduzem os conceitos de "*forgiving roads*" e "*clear zones*", que buscam afastar ou redesenhar elementos potencialmente perigosos localizados nas margens da pista (AASHTO, 2011; JALAYER; ZHOU, 2016).

Embora a ABNT NBR 15486:2016 já reconheça a importância da transponibilidade dos dispositivos de drenagem e apresente seções geométricas preferenciais, observa-se que os principais manuais de drenagem brasileiros ainda não incorporaram de forma sistemática esses conceitos em consonância com os aspectos de segurança viária em saídas de pista. A evolução dos manuais de drenagem no Brasil pode se beneficiar de uma maior integração entre desempenho hidráulico e critérios de segurança lateral. Este artigo revisa a literatura sobre o impacto da drenagem na severidade de sinistros por saída de pista, destacando diretrizes para dispositivos mais seguros e eficientes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar lacunas e a relação entre a geometria dos dispositivos de drenagem e a gravidade de acidentes por saída de pista, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), permitindo compilar, organizar e analisar criticamente o conhecimento disponível a partir de critérios rigorosos de busca, seleção e categorização.

2.1. Estratégia de Busca

Para a realização da revisão sistemática da literatura, após a definição do tema de pesquisa, foi escolhida a base de dados Scopus como fonte principal para a identificação dos estudos relevantes. Utilizaram-se descritores como "*roadside drainage*" *and* "*run-off-road crashes*"; "*clear zone*" *AND* "*transversable ditch*"; e "*road safety*" *AND* "*hydraulic design*", combinados com operadores booleanos "*AND*"e *OR*. Posteriormente, procedeu-se à leitura dos artigos remanescentes, com o objetivo de selecionar apenas aqueles que tratassem de forma direta e relevante o papel das caracteristicas da geometria dos dispositivos de drenagem e sua transponibilidade no caso saída de pista. Ao final da triagem, a seleção resultou em 228 artigos. Ainda, foram consultadas normas técnicas brasileira e internacionais que tratam do tema, visando complementar a análise e ampliar a compreensão sobre as diretrizes adotadas em diferentes países.

Tabela 1: Resultados das buscas por palavras-chaves dentro d*e bancos de dados.*

Base de dados	Pesquisar dentro	Palavras-chaves	Resultados

		"roadside drainage" and "run-off-road crashes"	16
Scopus	*abstract*	*" roadside drainage" OR "drainage ditch" OR "transversable ditch" OR "traversable ditch") AND "road safety" OR "traffic safety"*	6
		"roadside drainage"	206
		TOTAL	228

2.2. Critérios de Inclusão e Exclusão

A Tabela 2 traz uma síntese dos critérios de inclusão e exclusão. Após aplicar o critério de inclusao e exclusão foram selecionados 34 artigos relevantes.

Tabela 2: Síntese dos Critérios de Inclusão e Exclusão para seleção dos artigos

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
Trabalhos com abordagem direta ou indireta da relação entre dispositivos de drenagem e segurança viária	Trabalhos que tratassem exclusivamente da capacidade hidráulica dos dispositivos
Trabalhos que houvesse discussão sobre critérios geométricos ou funcionais de drenagem rodoviária	Trabalhos sem conexão com segurança viária
Trabalhos que trouxesse avaliação da influência da drenagem em sinistros por saída de pista	Trabalhos que não apresentassem fundamentação técnica ou científica clara (ex.: artigos opinativos)
Trabalhos com propostas ou análises de soluções de engenharia integradas (hidráulica e segurança)	Trabalhos duplicados em mais de uma base
Diretrizes normativas (nacionais ou internacionais) relevantes para o tema	Trabalhos voltados exclusivamente a drenagem urbana ou áreas não rodoviárias

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A segurança viária é um tema global relevante, com sinistros de trânsito permanecendo entre as principais causas de mortes e lesões graves (WHO, 2023; OECD/ITF, 2022). Além do comportamento dos usuários, as condições da infraestrutura, como a drenagem rodoviária, influenciam diretamente a severidade dos sinistros, especialmente em casos de saída de pista (PIARC, 2021; EUROPEAN COMMISSION, 2020). Elementos como valetas profundas ou sarjetas rígidas aumentam os riscos de lesões, exigindo soluções mais seguras (NHTSA, 2022; ITF, 2023).

Técnicas avançadas, como mineração de dados e análises geoespaciais, têm ajudado a identificar falhas na infraestrutura, como má drenagem e falta de dispositivos de contenção seguros (WEGMAN et al., 2022; FHWA, 2021). A abordagem do *sistema seguro* e as diretrizes técnicas da *Roadside Design Guide* (AASHTO, 2011), tem orientado zonas livres e estruturas transponíveis para reduzir impactos em sinistros. No entanto, normas brasileiras ainda priorizam a funcionalidade hidráulica, sem incorporar critérios de segurança viária (ANTT, 2022; DNIT, 2021).

Soluções como valetas gramadas e canaletas amortecidas têm se mostrado eficazes em outros países (IRTAD, 2023; SWOV, 2022), mas sua aplicação em contextos tropicais, como o Brasil, carece de validação. A falta de dados detalhados e normas integradas dificulta avanços (WORLD BANK, 2023). Portanto, é essencial desenvolver pesquisas e regulamentações que tratem a drenagem como fator de segurança, adotando princípios de transponibilidade e geometria segura para reduzir a gravidade dos sinistros (OECD, 2023; PIARC, 2022).

3.1. Dispositivos de Drenagem: Função e Riscos Potenciais

Os dispositivos de drenagem rodoviária, como valetas, sarjetas, canaletas e bueiros, são essenciais para o escoamento das águas pluviais e preservação do pavimento (BARAL; SHAHANDASHTI, 2022). No entanto, a literatura internacional ressalta que esses elementos, embora cumpram função hidráulica, podem se tornar obstáculos perigosos nas margens da pista. Segundo a FHWA (2010) e a AASHTO (2011), dispositivos não transponíveis próximos ao bordo aumentam significativamente a gravidade dos sinistros por saída de pista, que representam 31% dos sinistros fatais nos EUA, apesar de corresponderem a apenas 16% do total. Colisões com objetos fixos — como árvores ou postes — tendem a ser especialmente graves. Estudos também relacionam valetas profundas, canaletas com bordas elevadas e bueiros mal localizados a capotamentos e lesões severas (VARHELYI, 2016). A falta de padronização e o foco apenas na eficiência hidráulica aumentam os riscos, levando estudos a investigar o impacto da geometria e do posicionamento da drenagem na gravidade dos acidentes

3.2. Impactos na Severidade dos Sinistros por Saída de Pista

Estudos mostram que o perfil geométrico dos dispositivos de drenagem afeta diretamente a segurança na recuperação de veículos que saem da pista. Declividades acentuadas, profundidade excessiva ou superfícies rígidas prejudicam a transição do veículo de volta à pista, podendo causar colisões secundárias, capotamentos ou imobilização em locais perigosos (CRIMMINS et al., 2021; JALAYER; ZHOU, 2016).

Pesquisas baseadas em modelagem estatística, como as dos EUA e Austrália, indicam que a falta de zonas livres, ou no inglês, "*clear zones",* bem definidas está associada ao aumento de fatalidades em saídas de pista (FHWA, 2019; AUSTROADS, 2017). A transponibilidade—capacidade do veículo atravessar a área lateral sem danos graves—é crucial para reduzir a gravidade dos sinistros (JALAYER; ZHOU, 2016).

Além disso, Harwood et al. (2017) destacam que dispositivos de drenagem mal dimensionados ou mal posicionados limitam a recuperação do veículo, elevando o risco de colisões secundárias e mortes.

3.3. Critérios Geométricos e Funcionais para Transponibilidade

A revisão mostrou que critérios geométricos para sistemas de drenagem transponíveis estão bem definidos em diretrizes internacionais. O *Roadside Design Guide* (AASHTO, 2011) recomenda parâmetros como: largura mínima de canaletas, inclinação transversal menor que 4:1 (H:V), profundidade reduzida, bordas arredondadas e uso de materiais absorventes.

Soluções como canaletas chanfradas, valetas com superfícies gramadas ou amortecedoras e sarjetas com grelhas metálicas são consideradas boas práticas nos EUA, Austrália, Reino Unido e Alemanha. No entanto, há poucos estudos brasileiros que sistematizam esses critérios, indicando a necessidade de maior aprofundamento técnico no contexto local (BRASIL, 2006; DNIT, 2010; PONTUAL; ALMEIDA, 2020).

3.4. Diretrizes Normativas: Avanços e Lacunas

A análise comparativa mostrou diferenças significativas entre normas nacionais e internacionais. Enquanto documentos como os da AASHTO (2018) e FHWA (2011) abordam de forma integrada a segurança viária e a funcionalidade hidráulica, as normas brasileiras (DNIT, 2006; DNIT, 2010) focam principalmente em aspectos hidráulicos e geotécnicos. A exceção é a ABNT NBR 15.486:2016, que incorpora considerações relacionadas à segurança viária, ao reconhecer o potencial desses dispositivos como fatores agravantes em casos de saída de pista. Ainda assim, foi identificada a ausência de diretrizes no Brasil sobre transponibilidade e *clear zones* nos principais manuais de drenagem rodoviárias, elementos essenciais para segurança veicular em normas internacionais (Turner et al., 2018; Harwood et al., 2017). Estudos destacam que *clear zones* bem dimensionadas e dispositivos de drenagem amortecidos reduzem sinistros graves em saídas de pista (Smith & Burns, 2016; Jalayer & Zhou, 2016). Além disso, manuais brasileiros não detalham suficientemente questões como localização segura de bueiros, rebaixamento de valetas e uso de canaletas amortecidas, ao contrário das recomendações da AASHTO e FHWA, que as consideram eficazes na redução da gravidade de sinistros (FHWA, 2011; AASHTO, 2018).

3.5. Soluções de Engenharia e Boas Práticas

A literatura apresenta diversas soluções de engenharia que viabilizam a coexistência entre eficiência hidráulica e segurança viária. Entre elas, destacam-se: canaletas revestidas com materiais geossintéticos e bases amortecidas, que mantêm a drenagem eficaz sem oferecer risco de impacto (KHAN; DAS, 2024; TU, 2017); sarjetas cobertas por grelhas metálicas transponíveis, permitindo passagem de veículos em casos de emergência ou perda de controle (ZHANG et al., 2019); valetas ajardinadas ou gramadas com inclinação suave que absorvem parte da energia cinética do veículo e reduzem a possibilidade de lesões (LI; WANG; CHEN, 2020); bueiros rebaixados e recuados da pista, evitando contato direto em caso de saída (JALAYER; ZHOU, 2016). Tais soluções têm sido incorporadas em projetos-piloto em países europeus e nos EUA, com bons resultados em termos de redução de lesões graves e mortais. A Tabela 3 mostra a síntese dos artigos encontrados e as respectivas contribuições para o estado da arte.

Tabela 3: Síntese dos Artigos Científicos Utilizados na Revisão sobre Drenagem Rodoviária e Segurança Viária
públicas de infraestrutura

Autor(es)	Título do Artigo e Ano	Método Utilizado	Principais Resultados	Contribuição Relevante
José Ángel Aranda et al.	*Efficient Design of Road Drainage Systems (2021)*	Revisão e simulações	Melhoria da eficiência do escoamento	Aprimora diretrizes de projeto de drenagem

		hidrológicas		rodoviária
A. Baral & S. M. Shahandashti	*Identifying critical combination of roadside slopes susceptible to rainfall-induced failures (2022)*	Modelagem estatística de falhas geotécnicas	Identificação de combinações críticas de taludes	Apoia ações preventivas em áreas de risco
CEDR	*Forgiving Roadsides Design Guide (2013)*	Revisão técnica normativa	Propostas de infraestrutura mais segura	Fundamenta o conceito de 'margens que perdoam'
CNT	*Pesquisa CNT de Rodovias (2023)*	Levantamento nacional de campo	Avaliação do estado da malha viária	Base para políticas públicas de infraestrutura
Michael Crimmins et al.	*A spatial assessment of high-resolution drainage characteristics and roadway safety during wet conditions (2021)*	Estudo geoespacial	Correlação entre drenagem e sinistros	Incentiva melhorias locais de drenagem
D. De Bartolomeo et al.	*The Italian Risk-Based Approach (2023)*	Análise normativa e estudos de caso	Integração entre segurança e gestão de risco	Inovações em avaliação de segurança estrutural
Abhary Eleyedath et al.	*Development of a framework porous asphalt (2025)*	Proposta de framework técnico	Melhor desempenho de pavimentos porosos	Contribui para pavimentação durável
Celso Fernando et al.	*Analysis of the Safety Performance of Drainage Pavement (2019)*	Estudo observacional longitudinal	Efeito da idade do pavimento na segurança	Relaciona manutenção ao desempenho de segurança
Rubén Gutiérrez-Rodríguez et al.	*Identifying relevant patterns (2025)*	Análise de padrões com inspeções	Padrões entre falhas e sinistros	Refina processos de inspeção de segurança
Mohammad Jalayer & Huaguo Zhou	*Overview of Safety Countermeasures (2016)*	Revisão sistemática	Classificação de contramedidas de saída de pista	Base conceitual para melhorias viárias
Md Nasim Khan & Subasish Das	*Advancing traffic safety through the safe system approach (2024)*	Revisão sistemática	Efetividade do Sistema Seguro	Fortalece abordagens integradas de segurança
Cristiane Lemos A.	*Aplicação de modelo preditivo de sinistros... (2024)*	Estudo de caso com predição	Identificação de pontos críticos	Contribui com modelo replicável em rodovias simples
Ali A. Mohammed et al.	*A Review of Traffic Accidents... (2019)*	Revisão internacional	Práticas e estatísticas globais	Comparações e sugestões para contextos locais
The World Bank	*Guide to Integrating Safety into Road Design (2022)*	Guia técnico aplicado	Integração de segurança desde a concepção	Instrumento prático de boas práticas
Tony Bliss; Jeanne Breen	*Implementing the recommendations of the World Report... (2009)*	Análise institucional e recomendações	Desdobramentos do Relatório Mundial	Alinhamento global em políticas de segurança
Xuchun S. Tu	*Application of RISC for Road Safety Program Development (2017)*	Desenvolvimento metodológico	Avaliação de segurança com RISC	Ferramenta para gestores de segurança rodoviária
Andras Varhelyi	*Road Safety Management – The Need for a Systematic Approach (2016)*	Discussão teórica e aplicada	Necessidade de abordagem sistêmica	Proposta de gestão integrada da segurança

4. DISCUSSÕES

A literatura demonstra que os dispositivos de drenagem rodoviária, embora essenciais para a infraestrutura, podem representar riscos à segurança viária quando não projetados considerando a recuperação de veículos em saídas de pista. Enquanto países como EUA, Reino Unido e Austrália adotam diretrizes integradas, como por exemplo, o guia *Roadside Design Guide da* AASHTO (2011), que priorizam a transponibilidade segura por meio de valetas chanfradas, sarjetas rebaixadas e materiais amortecedores. Porém, o Brasil carece de manuais que abordem a segurança lateral, focando apenas em aspectos hidráulicos e geotécnicos. Essa lacuna é crítica em rodovias de alta velocidade, onde sinistros fora da pista tendem a ser mais graves.

Além disso, a ausência de dados nacionais sobre a relação entre sinistros e drenagem limita a formulação de políticas baseadas em evidências. São necessários estudos futuros com simulações de sinistros, análises em trechos críticos e adaptação de soluções internacionais ao contexto brasileiro.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a relação entre dispositivos de drenagem rodoviária e a gravidade de sinistros por saída de

pista, focando em transponibilidade, geometria funcional e segurança viária. A revisão de normas técnicas e literatura científica mostrou que valetas, sarjetas, canaletas e bueiros mal projetados podem se tornar obstáculos perigosos, principalmente em rodovias de alta velocidade. Os resultados alcançaram os objetivos da pesquisa: (1) identificaram os dispositivos de maior risco; (2) compararam abordagens normativas internacionais (como EUA, Reino Unido e Austrália, que já adotam critérios de segurança) com as brasileiras (manuais focam apenas em aspectos hidráulicos); e (3) levantaram soluções técnicas eficazes, como canaletas chanfradas e materiais amortecedores, ainda pouco aplicadas no Brasil. A escassez de dados nacionais que relacionem sinistros à presença de dispositivos de drenagem inadequados limita a formulação de políticas públicas baseadas em evidências. São necessários estudos futuros, como modelos de simulação de sinistros e análises em trechos críticos, além da adaptação de soluções internacionais à realidade brasileira. Avançar nesse campo requer que órgãos como DNIT, ANTT e ABNT integrem critérios de segurança viária lateral aos projetos de drenagem, atualizando e harmonizando manuais e normas, de modo a priorizar a redução da gravidade de acidentes e fatalidades nas rodovias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO; AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (2011) Roadside Design Guide. 4ª ed. Washington: [s.n.]. Disponível em: www.transportation.org

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Relatório anual de gestão 2022. Brasília, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2012) NBR 15486: Drenagem superficial de rodovias — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT.

AUSTRALAS. Guide to road design. Sydney, 2017.

BARAL, A.; SHAHANDASHTI, S. M. (2022) Identifying critical combination of roadside slopes susceptible to rainfall-induced failures. Natural Hazards, v. 113, n. 2, p. 1177–1198. DOI: https://doi.org/10.1007/s11069-022-05352-4

BAST. (2016) BASt Topics – Road Safety, Issue 1/2016. Federal Highway Research Institute (BASt), [s.l.], p. 1–36.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de drenagem de rodovias. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

BURNS, K.; BELL, K. (2016) Performance evaluation of a cable median barrier system on an Oregon highway with a narrow median. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2588, n. 1, p. 26-35. DOI: https://doi.org/10.3141/2588-15

CNT. (2023) Pesquisa CNT de Rodovias 2023. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2023/11/pesquisa-cnt-rodovia-2023.pdf

CRIMMINS, M.; PARK, S.; SMITH, V.; KREMER, P. (2021) A spatial assessment of high-resolution drainage characteristics and roadway safety during wet conditions. Applied Geography, v. 133, p. 102477. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102477

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de drenagem de rodovias. Brasília, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de drenagem urbana. Rio de Janeiro, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. EU road safety policy framework 2021–2030. Brussels, 2020.

FERNANDO, C.; YOSHII, T.; TSUBOTA, T.; SHIRAYANAGI, H. (2019) Analysis of the safety performance of drainage pavement focusing on pavement age. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. [s.l.: s.n.]

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Roadside safety research program. Washington, 2019.

HARWOOD, D. W.; GILMORE, D. R.; DONNELL, E. T.; SOMMER III, H. J.; GARVEY, P.; PERSAUD, B.; LYON, C. (2017) Safety evaluation of cable median barriers in combination with rumble strips on divided roads. Federal Highway Administration, Washington, D.C., setembro 2017. Disponível em: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37806/dot_37806_DS3.pdf

INTERNATIONAL TRAFFIC SAFETY DATA AND ANALYSIS GROUP. Annual report 2023. Paris: OECD/ITF, 2023.

INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. Road safety annual report 2023. Paris: OECD/ITF, 2023.

JALAYER, M.; ZHOU, H. (2016) Overview of safety countermeasures for roadway departure crashes. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/293333732

KHAN, M. N.; DAS, S. (2024) Advancing traffic safety through the safe system approach: a systematic review. Accident Analysis & Prevention, v. 199, p. 107518. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107518

LEMOS A, C. (2024) Aplicação de modelo preditivo de sinistros em pontos críticos: estudo de caso em rodovia de pista simples. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/255804

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. Traffic safety facts 2022. Washington, 2022.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Road safety outlook 2023. Paris, 2023.

SWOV. (2019) Coaches and road safety in Europe. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://swov.nl/system/files/publication-downloads/r-2019-11.pdf

SWOV. Road safety in the Netherlands: annual report 2022. Haia, 2022.

THE WORLD BANK. (2022) Guide to integrating safety into road design. [s.l.: s.n.]. Disponível em: http://www.worldbank.org/transport

TURNER, B.; JOB, S.; MITRA, S. (2018) Guide for Road Safety Interventions: Evidence of What Works and What Does Not Work. Washington, D.C.: World Bank. Disponível em: https://documents1.worldbank.org/curated/en/206691614060311799/pdf/Guide-for-Road-Safety-Interventions-Evidence-of-What-Works-and-What-Does-Not-Work.pdf

TU, X. S. (2017) Application of RISC for Road Safety Program Development. Transportation Research Procedia, 25, 1920–1930. doi:10.1016/J.TRPRO.2017.05.185

VARHELYI, A. (2016) Road Safety Management – The Need for a Systematic Approach. The Open Transportation Journal, 10(1), 137–155. doi:10.2174/1874447801610010137

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global status report on road safety 2023. Geneva, 2023.

WORLD ROAD ASSOCIATION (PIARC). Road safety manual. Paris, 2022.

WORLD ROAD ASSOCIATION (PIARC). Road safety report 2021. Paris, 2021.

ZHANG, Yingyu; JING, Linlin; SUN, Chang; FANG, Jianlei; FENG, Yan. (2019) Human factors related to major road traffic accidents in China. Traffic Injury Prevention, v. 20, n. 8, p. 796-800. DOI: 10.1080/15389588.2019.1670817

Filipe Tosta de Sene (filipe.sene@ufu.br) e *Rogério Lemos Ribeiro* (rogerio.ribeiro@ufu.br)
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

EFEITOS DA IMPLANTAÇÃO DE FAIXA DEDICADA NA VELOCIDADE DE MOTOCICLISTAS EM VIA URBANA

Thiago Passos Oliveira[1], Alessandro Macêdo de Araújo[1], Manoel Mendonça de Castro Neto[1], Flávio Cunto[1], Mateus Humberto[2]
[1]Universidade Federal do Ceará (UFC), [2]Universidade de São Paulo (USP)

RESUMO
Este artigo busca realizar uma avaliação antes-e-depois da implantação de uma motofaixa no Município de São Paulo (Faixa Azul), com ênfase nas velocidades máximas dos motociclistas no corredor localizado entre as faixas de tráfego esquerda e adjacente. A análise foi baseada em filmagens de drone e algoritmos de visão computacional. Os resultados indicam aumento nas velocidades máximas dos motociclistas e na proporção de condutores acima do limite regulamentar após a sinalização. Para tráfego não congestionado, a média da velocidade máxima aumentou de 42 para 45 km/h; em situações congestionadas, de 35 para 40 km/h. O estudo se insere como subsídio inicial para uma avaliação com o objetivo de orientar a formulação de hipóteses e o desenvolvimento de instrumentos para avaliação de sinalizações viárias experimentais. A abordagem metodológica integra o uso de dados inovadores e observação direta para subsidiar futuras análises sobre segurança viária envolvendo motociclistas.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos impactos de intervenções no sistema viário deve ser baseada em evidências, sobretudo quando tais medidas podem afetar a segurança viária. Na cidade de São Paulo, a proporção de motocicletas na frota era de 9% em 2014 e passou a ser 13% em 2024, quando o número de motocicletas registradas na cidade era de 1,3 milhão, valor 55% maior do que em 2014 (SENATRAN, 2025). Porém, a proporção de óbito de motociclistas frente aos demais usuários é desproporcional à frota: 32% em 2015 e 47% em 2024 (DETRAN-SP, 2025). Com o objetivo de diminuir a quantidade de mortes, algumas cidades brasileiras, como São Paulo, Salvador e Rio de Janeiro, têm implementado faixas prioritárias para motos — conhecidas como motofaixas ou faixas azuis, devido à cor da sua sinalização horizontal. Essas faixas criam corredores exclusivos para motocicletas, localizados entre a faixa da esquerda e a faixa adjacente.

Os efeitos da implantação de motofaixas ainda são pouco compreendidos. Na Malásia, Manan e Noordin (2023) avaliaram o impacto de motofaixas exclusivas (segregadas fisicamente) para motociclistas na ocorrência de sinistros fatais e reportaram uma redução geral de 74% nas fatalidades. Já Sarani *et al*. (2022), também na Malásia, empregaram regressão logística para estimar a probabilidade da gravidade dos sinistros em função da presença de faixas preferenciais para motociclistas e de outras características da infraestrutura viária. Os resultados indicam que sinistros em vias sem esse tipo de instalação apresentam 1,45 vezes mais chances de serem fatais. Na Malásia, em pistas experimentais, Hussain et al. (2011) modelaram o comportamento dos motociclistas sob diferentes padrões de condução a partir de motofaixas com diferentes larguras.

Ahmed et al. (2023) também realizaram experimentos com simulações para faixas exclusivas, obtendo como resultado a redução do fluxo de veículos nas faixas de tráfego misto e o aumento no fluxo de motocicletas na motofaixa, além de obterem melhores indicadores de segurança viária como *time-to-collision* (TTC) e menor frequência de troca de faixa. Em outro estudo de microssimulação, Paul *et al.* (2021) analisaram os efeitos associados a diferentes regras de circulação e de posicionamentos de motofaixas na Índia. Os resultados indicaram que a configuração mais segura foi aquela em que as motofaixas estavam localizadas próximas ao meio-fio, combinada com a proibição da circulação de motociclistas nas demais faixas de tráfego. Esse cenário resultou nas menores quantidades de trocas de faixa e de conflitos veiculares.

Esses estudos, contudo, foram conduzidos em contextos diferentes daquele em que as motofaixas vêm sendo implantadas no Brasil, onde tais faixas localizam-se entre a faixa esquerda e a adjacente, demarcadas por sinalização horizontal no pavimento. Essa diferença reduz a capacidade de generalização dos resultados internacionais para o contexto brasileiro. Acredita-se que fatores locais podem influenciar os resultados, tais como a largura e o posicionamento da motofaixa, as regras de circulação e o comportamento de condução.

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é realizar uma avaliação antes-e-depois da implantação de uma motofaixa na cidade de São Paulo, com ênfase nas velocidades máximas dos motociclistas. A questão que

motivou esta pesquisa foi: a segregação dos motociclistas trazida pela motofaixa aumentou suas velocidades? A velocidade (máxima) dos motociclistas foi escolhida como indicador por ser considerada o principal fator de risco comportamental associado à insegurança viária, segundo a *World Health Organization* (2023).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Coleta de dados

O trecho analisado localiza-se na Avenida Dr. Ricardo Jafet, no sentido sul, nas proximidades da interseção com a Rua Pero Correia, no Município de São Paulo. A via possui proibição de estacionamento em ambos os lados e velocidade máxima regulamentada de 50 km/h. Antes da implantação da motofaixa, a seção transversal era composta por: 3 faixas de tráfego misto, com larguras de 3,0 m (faixa esquerda), 2,8 m (faixa central) e 3,6 m (faixa direita); 1 faixa exclusiva para retorno, com largura variável (média de 2,8 m); 1 ciclofaixa, com largura média de 1,5 m; e 1 área de espera para motociclistas (*motobox*), com dimensões de 5,0 m × 9,4 m.

Após a implantação da motofaixa, com largura de 1,1 m, a seção transversal manteve três faixas de tráfego misto, porém com larguras de 2,7 m (faixa esquerda), 2,7 m (faixa central) e 3,0 m (faixa direita). As demais infraestruturas (faixa exclusiva para retorno, ciclofaixa e área de espera para motociclistas) permaneceram inalteradas.

Os dados foram coletados a partir de filmagens realizadas com drones, operados por empresa especializada. A primeira coleta, de 31,2 minutos, ocorreu às 7:00 horas do dia 11/09/2024, antes da implantação da motofaixa, efetivada em 03/10/2024. A segunda coleta, de 48 minutos, foi realizada no mesmo horário do dia 21 de novembro de 2024, 49 dias após a implantação. As gravações foram feitas com resolução 1920 × 1080 *pixels* a 30 *frames* por segundo (*fps*), a uma altura entre 33 e 35 metros, atendendo aos requisitos da ferramenta de visão computacional usada para a extração automatizada das trajetórias veiculares.

O uso de drone oferece a vantagem de minimizar a interferência na condução dos veículos, uma vez que os condutores não percebem o piloto, posicionado dentro de um posto de combustíveis, nem o próprio equipamento, devido à sua altura de operação e às suas pequenas dimensões. Para viabilizar a conversão de distâncias entre *pixels* e metros, elementos da sinalização horizontal foram medidos *in loco* com trena durante as filmagens, bem como diretamente numa imagem de referência (um dos *frames* do vídeo) em *pixels*.

2.2. Processamento dos vídeos

O processamento dos vídeos iniciou-se com a aplicação de uma correção automatizada das imagens, com o objetivo de reduzir os efeitos de instabilidade do drone devido aos ventos. Essa etapa consiste na rotação, translação e escalonamento de todos os *frames*, de forma a alinhá-los ao *frame* de referência capturado em condições ideais, isto é, com a via orientada horizontalmente e enquadrada conforme o planejamento da coleta, conforme a metodologia adotada por Araújo *et al*. (2023). Para a identificação de pontos fixos entre o *frame* de referência (ideal) e os demais, adotou-se o algoritmo *Binary Robust Invariant Scalable Keypoints* (BRISK) (Leutenegger *et al*., 2011). A aplicação da transformação linear necessária ao alinhamento foi realizada por meio da função *estimateAffinePartial2D*, da biblioteca OpenCV, implementada em Python.

A segunda etapa do processamento consistiu na detecção dos veículos e obtenção das suas coordenadas ao longo do vídeo. Para isso, foram empregados os algoritmos *YOLOv10* (Wang et al., 2024), para a detecção e classificação de objetos, e *StrongSORT* (Du *et al*., 2023), para o rastreamento dos veículos ao longo do vídeo, permitindo a identificação contínua de cada objeto e, consequentemente, a construção de suas trajetórias. O algoritmo *YOLOv10* foi aprimorado neste trabalho por meio do treinamento realizado, utilizando um conjunto de 1.769 imagens (incluindo registros da Av. Dr. Ricardo Jafet) dividido nas proporções de 70% para treino, 15% para validação e 15% para teste. As coordenadas dos veículos, obtidas em *pixels*, foram convertidas para metros com base na escala definida anteriormente.

2.3. Obtenção das trajetórias

As trajetórias resultantes do rastreamento dos veículos por meio da visão computacional frequentemente apresentam ruídos, os quais geralmente precisam ser suavizados, principalmente quando se pretende calcular variáveis como velocidade e aceleração ao longo do percurso (Punzo *et al.*, 2011). Pequenas variações

aleatórias introduzidas nas etapas de processamento não comprometem significativamente a qualidade das posições dos veículos, mas podem afetar de forma expressiva variáveis mais sensíveis ao ruído, como a velocidade e, em maior grau, a aceleração, por corresponderem, respectivamente, à primeira e à segunda derivadas da posição. Para avaliar a eficácia de métodos de suavização, Punzo *et al.* (2011) propuseram a análise da consistência das trajetórias (*internal and platoon consistency*), conceito que se refere à coerência entre os valores de posição, velocidade e aceleração, bem como às suas inter-relações dinâmicas.

A verificação inicial das trajetórias, sem aplicação de suavização, apresentou erros significativos, especialmente na variável de velocidade longitudinal, com um *mean absolute error* (MAE) de 1,7 km/h e uma amplitude de 42,8 km/h na distribuição dos erros. Foram testadas três técnicas de suavização: média móvel, filtro Gaussiano e o filtro de interpolação polinomial Savitzky-Golay (Savitzky e Golay, 1964), com polinômio de primeira ordem e janela de suavização de 15 *frames* (equivalente a 0,5 s) para todas as técnicas avaliadas. Inicialmente, aplicou-se a suavização às posições veiculares. A partir dessas posições suavizadas, novas velocidades foram calculadas e, posteriormente, também suavizadas. Como resultado, o MAE foi reduzido para 0,25 km/h e a amplitude dos erros para 4,5 km/h (redução de 89,4% na amplitude dos erros), indicando significativa melhoria na consistência interna das trajetórias estimadas.

2.4. Análise das velocidades dos motociclistas

Parte-se de uma análise descritiva da utilização do espaço viário pelos motociclistas, para melhor compreender o comportamento dos motociclistas em relação a escolha de corredor/faixa. Para isso, o espaço viário foi segmentado em quatro regiões, como mostra a Figura 1: corredor esquerdo, corredor direito, corredores externos e as faixas de tráfego misto.



Figura 1: Segmentação do espaço viário para as análises.

Em seguida, foram avaliadas as velocidades máximas dos motociclistas em cada região, pois o foco do trabalho é em segurança viária. Porém, este trabalho focou no corredor esquerdo, que é fortemente utilizado pelos motociclistas de São Paulo, com ou sem a presença de motofaixa. As comparações dos cenários antes e depois foram feitas por nível de congestionamento nas faixas de tráfego misto adjacentes ao corredor esquerdo, pois, quando estão congestionadas, o motociclista tende a reduzir a velocidade, devido à maior velocidade relativa aos carros, pois estão com a velocidade próxima de zero. A propósito, a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET, 2025) recomenda o limite de 30 km/h para motociclistas em condições de tráfego congestionado nas faixas de uso misto. Foram considerados dois níveis de congestionamento: congestionado, quando a média das velocidades dos veículos de quatro ou mais rodas foi menor que 5 km/h, quando os veículos estão praticamente parados, e não congestionado, para os demais casos. Essa classificação foi realizada no instante em que o motociclista atingiu sua velocidade máxima. Para as comparações serão usados histogramas e intervalos de confiança de 95%.

3. RESULTADOS

A composição veicular dos cenários antes e depois foi bastante similar entre os cenários: 77% de automóveis, 12% de motocicletas, 5% de vans, 0,3% de ônibus e 6% de caminhões. O fluxo total de motocicletas, somadas todas as faixas, foi de 279 motos/h antes e de 300 motos/h depois. Quanto ao uso do espaço viário, a Figura 2 mostra que uma parcela expressiva migrou para o corredor esquerdo após a implantação da motofaixa, passando de 63% para 94%. Na Figura 2, um motociclista será contabilizado na região se trafegar por pelo

menos 1,5 segundos nela. Nos casos em que ele trafega em mais de uma região, por mais de 1,5s em cada, os usos são proporcionais aos tempos em que ele passou nas regiões. Os demais corredores (direito e externos) não foram analisados devido ao pequeno uso por motociclistas (Figura 2).

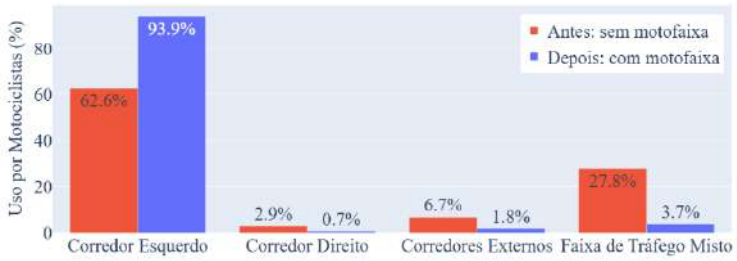


Figura 2: Uso das regiões vias pelos motociclistas, por cenário.

No corredor esquerdo, para o tráfego não congestionado (Figura 3), a velocidade máxima dos motociclistas passou de 42,0 (IC 39,7 a 44,2) km/h para 45,4 (IC 43,9 a 46,8) km/h após a implantação da motofaixa, uma diferença de 3,4 (IC 0,7 a 6,1) km/h. A proporção de motociclistas que excedeu o limite de velocidade (50 km/h) aumentou de 14% para 26% (IC -2% a 26%).

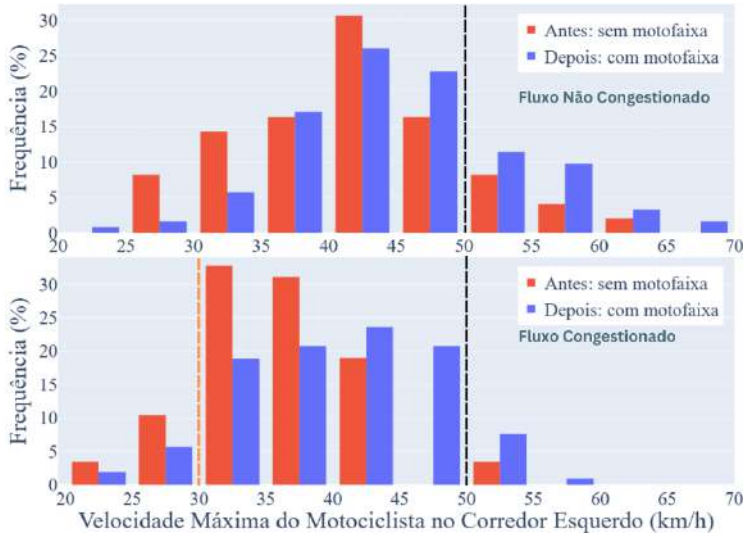


Figura 3: Distribuição da velocidade máxima dos motociclistas no corredor esquerdo

Para o tráfego congestionado (Figura 3), a velocidade máxima dos motociclistas no corredor esquerdo aumentou de 35,1 (IC 33,2 a 36,9) para 40,1 (IC 38,7 a 41,6) km/h após a implantação da motofaixa, uma diferença de 5,1 (IC 2,7 a 7,4 km/h). A proporção de motociclistas que excedeu o limite de velocidade (50 km/h) aumentou de 3% para 8% (IC -3% a 13%). Sobre a velocidade máxima 30km/h recomendada pela CET, grande parte dos motociclistas trafegou acima desse valor em ambos os cenários: 85% antes e 92% depois.

4. CONCLUSÕES

No corredor esquerdo, localizado entre a faixa de tráfego à esquerda e a faixa adjacente (tráfego misto), onde tradicionalmente circulam motociclistas mesmo sem regulamentação específica, a implantação da motofaixa aumentou a média das velocidades máximas dos motociclistas de 42 para 45 km/h, com IC95% da diferença de 1 a 6 km/h para o tráfego não congestionado. Para o tráfego congestionado, em que a velocidade média dos veículos de quatro ou mais rodas é menor que 5 km/h, a média das velocidades máximas dos motociclistas passou de 35 para 40 km/h, com IC95% da diferença de 3 a 7 km/h. A proporção de motociclistas que excederam o limite regulamentar da via (50km/h) passou de 14 para 26% (IC -2% a 26%) no tráfego não congestionado e de 3% para 8% (IC95 -3% a 13%) no tráfego congestionado, portanto não significativas estatisticamente, possivelmente devido ao tamanho da amostragem. Aumentos de velocidade dos motociclistas em motofaixas se alinha com estudos anteriores citados na revisão da literatura.

Sobre as limitações do estudo, não se pode atribuir as diferenças encontradas entres os cenários como consequências exclusivas da intervenção em estudo, como em qualquer estudo observacional. Apesar deste estudo ter a vantagem de analisar os cenários antes e depois no mesmo local, o que minimiza a influência de outros fatores, ele se limitou a apenas um trecho viário, o que restringe a generalização dos resultados. Portanto, recomenda-se que trabalhos futuros incorporem mais localidades, com características variadas, para uma compreensão mais profunda e abrangente dos efeitos das motofaixas nas velocidades. Além disso, outros indicadores importantes para segurança viária devem ser considerados, como os indicadores *proxy* de conflitos e a ocorrência de sinistros, principalmente os que vitimizam motociclistas.

Agradecimentos
Esta pesquisa foi financiada com recursos da *Bloomberg Philanthropies Initiative for Global Road Safety* e aprovada pela *Biomedical Research Alliance of New York* (Protocol 24-410-522) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, T.; L. F. Chowdhury; M. G. Sobhani; A. M. Islam; S. Al Shafian e M. Majumder (2023) Enhancing urban mobility: Exploring the potential of exclusive motorcycle lane using VISSIM. *Journal of Transportation Technologies*, v. 13, n. 4, p.644-656. DOI: 10.4236/jtts.2023.134029

Araújo, A. M. de; T. P. Oliveira; M. M. de C. Neto; D. F. de Oliveira e J. P. P. Gomes (2023) Ferramenta de coleta automatizada de trajetórias veiculares utilizando imagens de drone e técnicas de visão computacional. *Transportes*, v. 31, n. 3. DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2886

CET (2025) *Faixa Azul - Perguntas e Respostas*. Disponível em: https://www.cetsp.com.br/consultas/faixa-azul/perguntas-e-respostas.aspx (acesso em 13/07/2025).

DETRAN-SP (2025) INFOSIGA – Estatísticas de acidentes de trânsito. Disponível em: https://infosiga.detran.sp.gov.br/#referencia (cesso em: 13 jul. 2025).

Du, Y.; Z. Zhao; Y. Song; Y. Zhao; F. Su; T. Gong e H. Meng (2023) Strongsort: Make deepsort great again. *IEEE Transactions on Multimedia*, v. 25, p. 8725-8737. DOI: 10.1109/TMM.2023.3240881

Hussain, H.; R. S. Radin Umar e M. S. Ahmad Farhan (2011) Establishing speed–flow–density relationships for exclusive motorcycle lanes. *Transportation Planning and Technology*, v. 34, n. 3, p.245-257. DOI: 10.1080/03081060.2011.565175

Leutenegger, S.; M. Chli e R. Y. Siegwart (2011) BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints. *International Conference on Computer Vision*, p. 2548-2555. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126542

Manan, M. M. A. e N. M. Noordin (2023) The Performance of the Exclusive Motorcycle Lane (EMCL) in Reducing Fatal Crashes Among Motorcyclists after 20 Years of Operation. *Construction*, v. 3, n. 2, p.285-292. DOI: 10.15282/construction.v3i2.9838

Paul, G.; N. Raju; S. Arkatkar e S. Easa (2021). Can segregating vehicles in mixed-traffic stream improve safety and throughput? Implications using simulation. *Transportmetrica A: transport science*, v. 17, n. 4, p.1002-1026. DOI: 10.1080/23249935.2020.1826595

Punzo, V.; M. T. Borzacchiello e B. Ciuffo (2011) On the assessment of vehicle trajectory data accuracy and application to the Next Generation SIMulation (NGSIM) program data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. v. 19, n. 6, p. 1243-1262. DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.007

Sarani, R., Hoong, A.P.W., Roslan, A., Khaidir, N.M., Fazzillah, N., Noordin, M. e M. M. A. Manan (2022) The Non-Exclusive Motorcycle Lane: Should We Have It?. *TECHNOLOGY*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358459420_The_Non-Exclusive_Motorcycle_Lane_Should_We_Have_It (acesso em 13/07/2025).

Savitzky, A. e M. J. Golay (1964) Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, v. 36, n. 8, p. 1627-1639. DOI: 10.1021/ac60214a047

SENATRAN (2025) *Estatísticas - Frota de Veículos*. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran (acesso em 13/07/2025).

Wang, A.; H. Chen; L. Liu; K. Chen; Z. Lin; J. Han e G. Ding (2024) YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection. *Advances in Neural Information Processing Systems*, v. 37, p. 107984-108011. DOI: 10.48550/arXiv.2405.14458

Thiago Passos Oliveira (thiago.passos@det.ufc.br)
Alessandro Macêdo de Araújo (alessandro.araujo@det.ufc.br)
Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)
Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br)
Univ. Federal do Ceará, Dept. de Eng. de Transportes, Campus do Pici, Bloco 703 – Fortaleza, Brasil
Mateus Humberto Andrade (mateushumberto@usp.br)
Univ. de São Paulo, Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 nº. 83. Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil) – São Paulo, Brasil

FADIGA OCUPACIONAL E SEGURANÇA OPERACIONAL NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO URBANO: UMA REVISÃO APLICADA*

Ariane Cristina Alvim Araujo[1], Lisleandra Machado[1], Camila Martins Saporetti[2]
[1]IF Sudeste MG, [2]Instituto Politécnico,

RESUMO
Este artigo analisa os impactos da fadiga ocupacional sobre a segurança operacional e a produtividade de maquinistas e controladores de tráfego no transporte ferroviário urbano, com base em uma revisão crítica de literatura. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e aplicada, fundamentada em publicações científicas revisadas por pares entre 2020 e 2025. A seleção resultou em 19 artigos, analisados a partir de categorias temáticas relacionadas aos fatores de risco organizacionais, efeitos da fadiga sobre o desempenho, estratégias de mitigação e implicações para a segurança operacional. Os achados reforçam que a fadiga é um fator sistêmico e multifatorial, com impactos significativos sobre a vigilância, a produtividade e o risco de falhas humanas. Conclui-se que a gestão integrada da fadiga, ancorada em evidências científicas, é fundamental para promover ambientes ferroviários mais seguros e eficientes.

Palavras-chave: fadiga ocupacional; transporte ferroviário urbano; segurança operacional; produtividade; gestão de riscos.

1. INTRODUÇÃO

A fadiga ocupacional é amplamente reconhecida como um fator crítico de risco em sistemas complexos, como o transporte ferroviário urbano, onde a vigilância contínua e a tomada de decisão rápida são indispensáveis à segurança operacional. Evidências demonstram que estados prolongados de fadiga comprometem significativamente funções cognitivas, afetando atenção, tempo de reação e julgamento situacional (Fan & Smith, 2020; Roets & Folkard, 2022; Chen et al., 2024). A recorrência de turnos irregulares e jornadas extensas, associada a condições ambientais adversas, favorece o acúmulo de fadiga fisiológica e mental, o que compromete diretamente a produtividade e eleva o risco de falhas humanas. (Sieber et al., 2022; Xu & Hall, 2021).

Neste estudo, o termo “transporte ferroviário urbano” é utilizado em sentido ampliado, abrangendo tanto sistemas metroferroviários de passageiros quanto operações de carga em áreas urbanizadas, dadas as similaridades nas condições operacionais e nos fatores de risco associados à fadiga. Apesar do avanço recente no interesse acadêmico, ainda são escassas as abordagens que integrem de forma crítica os determinantes da fadiga e suas possíveis soluções operacionais. Grande parte dos estudos permanece fragmentada, dissociada de proposições aplicáveis à gestão de riscos no cotidiano ferroviário.

Diante desse contexto, busca-se compreender, a partir da literatura científica recente, de que maneira a fadiga ocupacional repercute sobre a segurança operacional e a produtividade de maquinistas e controladores de tráfego no transporte ferroviário urbano, além de discutir estratégias de mitigação com potencial de aplicação no setor. Para isso, realizou-se uma revisão crítica de publicações indexadas entre 2020 e 2025, priorizando estudos revisados por pares que abordam a interseção entre fadiga, desempenho humano e segurança operacional. Os artigos selecionados foram analisados com base em categorias temáticas relativas a fatores de risco organizacionais, efeitos cognitivos, estratégias mitigadoras e implicações operacionais.

2. METODOLOGIA

2.1. Tipo e abordagem da pesquisa

Este estudo é de natureza qualitativa, exploratória e aplicada, fundamentado em revisão crítica de literatura científica. A abordagem visa identificar, interpretar e sistematizar evidências sobre os impactos da fadiga na segurança e produtividade no setor ferroviário urbano, abrangendo tanto sistemas de transporte de passageiros quanto operações de carga em regiões urbanizadas.

* Este artigo é dedicado à memória do Professor Luid Pereira de Oliveira, cuja orientação foi decisiva desde a definição da área temática até a estrutura metodológica. Sua rara capacidade de reconhecer potencial onde antes havia dúvida, e de estimular com rigor e entusiasmo o nosso crescimento como pesquisadores e indivíduos, permanece como marca viva neste trabalho.

2.2. Coleta de dados

A busca bibliográfica foi conduzida entre maio e junho de 2025 nas bases Scopus, Web of Science, PubMed e IEEE Xplore, utilizando uma combinação de operadores booleanos com alguns descritores como: “occupational fatigue”, “railway transportation”, “rail workers”, “safety”, “productivity”. O recorte temporal privilegiou estudos revisados por pares publicados entre 2020 e 2025, garantindo a atualidade das evidências em relação aos desafios contemporâneos do setor ferroviário.

Critérios de inclusão: artigos com abordagem direta sobre fadiga e desempenho em contextos ferroviários, com base empírica ou revisão sistemática.

Critérios de exclusão: estudos de natureza exclusivamente clínica ou sem aplicabilidade à operação ferroviária urbana.

A seleção resultou em 19 artigos, considerados representativos dos desafios contemporâneos relacionados à fadiga ocupacional no setor ferroviário. Alguns estudos, embora não citados nominalmente na seção de Resultados e Discussão, foram essenciais para estruturar o referencial teórico e definir as categorias analíticas. Essa integração transversal garante robustez metodológica à abordagem adotada.

2.3 Procedimentos de análise

A análise foi conduzida com base em quatro categorias temáticas, definidas a partir dos objetivos específicos do estudo:

- Fatores de risco organizacionais (jornadas extensas, turnos irregulares, estrutura de escala);
- Efeitos cognitivos e operacionais da fadiga (atenção, tempo de resposta, lapsos de vigilância);
- Estratégias de mitigação (tecnologias de monitoramento, pausas programadas, iluminação, design de interface);
- Implicações para a segurança e a produtividade (eventos críticos, queda de rendimento, prevenção de falhas).

Adotou-se uma leitura crítica e interpretativa, contrastando os estudos entre si com base na relevância temática e nas contribuições para o problema de pesquisa. As hipóteses H1 (fadiga e falhas operacionais), H2 (escalas e produtividade) e H3 (estratégias de mitigação) guiaram o processo de categorização.

2.4 Limitações

O uso exclusivo de fontes indexadas pode gerar viés de publicação, com a exclusão de dados relevantes presentes em documentos técnicos ou normativos. As diferenças regionais e contextuais entre os estudos exigem cautela quanto à generalização dos achados para o cenário brasileiro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na análise teórico-comparativa de dezenove estudos, identificaram-se evidências consistentes sobre os impactos da fadiga na segurança operacional e na produtividade de maquinistas e controladores de tráfego ferroviário. A discussão está estruturada em três blocos temáticos, articulados com os objetivos e hipóteses da pesquisa: (1) relação entre fadiga e falhas operacionais; (2) influência das escalas e fatores organizacionais na intensificação da fadiga; e (3) estratégias e tecnologias de mitigação.

3.1 Fadiga e segurança operacional: relação causal e evidência empírica

Diversos estudos documentam a relação entre fadiga e risco operacional elevado, confirmando a relevância do tema para o debate sobre segurança no setor. Fan e Smith (2020) descrevem efeitos cumulativos da fadiga na memória de trabalho, no tempo de reação e na capacidade de julgamento, principalmente em operadores submetidos a longos turnos. Chen et al. (2024) demonstram, em simulação com maquinistas de trens de alta velocidade, a evolução dinâmica da fadiga ao longo do turno, identificando janelas críticas de vulnerabilidade.

Roets e Folkard (2022) propõem um modelo de risco baseado na hora do dia, revelando que o risco de falhas operacionais aumenta mesmo na ausência de sintomas visíveis de cansaço. Esses achados reforçam que a fadiga atua de modo invisível, mas altamente insalubre, exigindo sistemas proativos de prevenção.

3.2 Escalas, organização do trabalho e fadiga crônica

A hipótese H2, que vincula a fadiga às jornadas e à organização do trabalho, é sustentada por múltiplas evidências. Gurubhagavatula et al. (2021) relatam que trabalhadores sujeitos a escalas rotativas e fragmentação do sono exibem maior risco de fadiga crônica e lapsos de atenção, mesmo com tempo total de sono semelhante. Roets e Folkard (2022) reforçam que o desalinhamento entre turnos e ritmos circadianos eleva o risco de erro humano, especialmente em tarefas críticas no transporte urbano.

Estudos qualitativos como os de Auliani et al. (2024) e Iridiastadi (2021) revelam a percepção dos operadores sobre a ausência de pausas, sobrecarga e falta de suporte organizacional. Xu e Hall (2021) argumentam que escalas mal planejadas comprometem tanto o bem-estar quanto a segurança. Xu e Hall (2021) também sugerem que escalas mais seguras devem considerar não apenas a carga horária total, mas também fatores como tempo de vigília contínua, exigência cognitiva da tarefa e intervalos de recuperação, reforçando a necessidade de planejamento centrado no operador.

3.3 Tecnologias e estratégias combinadas de mitigação da fadiga

Em conformidade com a hipótese H3, a literatura sugere que estratégias integradas são mais eficazes do que soluções isoladas. Fan et al. (2022) e Wu et al. (2025) demonstram o potencial de sensores e algoritmos baseados em EEG para detecção precoce de fadiga. Wu et al. (2025) também destacam o potencial de modelos preditivos baseados em IA treinados com dados contextuais para antecipar sinais de fadiga em operadores, com resultados promissores quanto à acurácia e tempo de resposta.

Liu et al. (2021) e Guo et al. (2024) testam intervenções táteis e cognitivas, com melhora no tempo de resposta e alerta situacional. Barger et al. (2021) destacam o impacto positivo de pausas curtas com exercícios leves e iluminação específica. Xiao et al. (2023) explora a importância do design de interfaces que promovam a autopercepção da fadiga, reforçando a atuação preventiva.

Ainda que os blocos acima destaquem treze artigos, os demais seis estudos da base analisada foram utilizados na formulação da estrutura teórica, na definição das categorias de análise e no aprofundamento metodológico, assegurando consistência à abordagem teórico-comparativa proposta.

4. CONCLUSÃO

Este estudo reuniu evidências robustas sobre os impactos da fadiga ocupacional na segurança operacional e na produtividade de maquinistas e controladores de tráfego ferroviário. A partir da análise de dezenove estudos revisados por pares, confirmou-se que a fadiga representa um risco operacional central no setor ferroviário urbano.

Os achados indicam com consistência que a fadiga compromete o desempenho cognitivo, reduz a prontidão operacional e amplia o risco de falhas em ambientes de alta demanda atencional. Esses efeitos são ainda mais acentuados sob jornadas extensas e escalas irregulares, revelando como o arranjo organizacional do trabalho pode agravar vulnerabilidades operacionais e afetar a produtividade. Também se observa que estratégias combinadas de mitigação, como o monitoramento fisiológico, os ajustes nos turnos e o suporte tecnológico, apresentam potencial para reduzir riscos sem comprometer o desempenho, especialmente quando aplicadas de forma integrada.

A análise comparativa também revelou a necessidade de adaptação contextual das práticas e tecnologias estudadas, tendo em vista as especificidades operacionais, normativas e infraestruturais do setor ferroviário brasileiro. A escassez de pesquisas nacionais sobre o tema reforça a relevância da presente investigação como contribuição teórica e prática para a construção de políticas e estratégias de gestão do risco de fadiga em sistemas de transporte urbano.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se a ampliação desta análise por meio de estudos de caso em empresas do setor ferroviário, bem como a avaliação empírica da efetividade de estratégias mitigadoras identificadas nesta pesquisa. O aprofundamento do tema poderá contribuir não apenas para o fortalecimento da cultura de segurança, mas também para o equilíbrio entre desempenho operacional e bem-estar dos trabalhadores ferroviários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AULIANI, S.; AZ-ZAHRA, H. F.; NURSAGITA, C.; SOETISNA, H.; IRIDIASTADI, H.; BUDIAWAN, W. 2024. A qualitative study investigating fatigue among Indonesian freight-train drivers. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 28, p. 101286, 2024. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101286.

BARGER, L. K.; SULLIVAN, J. P.; LOCKLEY, S. W.; CZEISLER, C. A. 2021. Exposure to short wavelength-enriched white light and exercise improves alertness and performance in operational NASA flight controllers working overnight shifts. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 63(2), p. 111–118, 2021. https://doi.org/10.1097/jom.0000000000002054.

CENDALES, B. E.; GÓMEZ-ORTIZ, V.; USECHE, S. A.; CEDILLO, L.; STEPHENSON, D. W. H.; LANDSBERGIS, P. 2024. Mental health outcomes among urban public transport workers: A systematic literature review. Journal of Transport & Health, 36, p. 101804, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jth.2024.101804.

CHEN, Y.; ZHANG, Y.; PAN, Q.; WEI, L.; JIAO, Y.; JIANG, C.; SUN, Z.; HOU, L. 2024. Dynamic evolution of high-speed railway driver fatigue across scheduling shifts – a simulator study in China. International Journal of Rail Transportation, p. 1–18, 2024. https://doi.org/10.1080/23248378.2024.2411676.

DONG, S.; ZHANG, T.; ZHU, H.; LI, K.; WANG, A. 2020. Research on the effect of shift work system on rail transit drivers' sleep and fatigue. In: 13th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 2020.

FAN, C.; PENG, Y.; PENG, S.; ZHANG, H.; WU, Y.; KWONG, S. 2022. Detection of train driver fatigue and distraction based on forehead EEG: A time-series ensemble learning method. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(8), p. 13559–13569, 2022. https://doi.org/10.1109/tits.2021.3125737.

FAN, J.; SMITH, A. P. 2020. Effects of occupational fatigue on cognitive performance of staff from a train operating company: A field study. Frontiers in Psychology, 11, p. 558520, 2020. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.558520.

GUO, Z.; CHANG, X.; LI, G.; ZHOU, M.; YUAN, B.; XU, H.; LI, Z.; GREEN, P. 2024. The effectiveness of tactile intervention sensors in mitigating fatigue of high-speed railway drivers. IEEE Sensors Journal, 24(24), p. 42103–42117, 2024. https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3487844.

GURUBHAGAVATULA, I.; BARGER, L. K.; BARNES, C. M.; BASNER, M.; BOIVIN, D. B.; DAWSON, D.; DRAKE, C. L.; FLYNN-EVANS, E. E.; MYSLIWIEC, V.; PATTERSON, P. D.; REID, K. J.; SAMUELS, C.; SHATTUCK, N. L.; KAZMI, U.; CARANDANG, G.; HEALD, J. L.; VAN DONGEN, H. P. A. 2021. Guiding principles for determining work shift duration and addressing the effects of work shift duration on performance, safety, and health. Sleep, 44(11), 2021. https://doi.org/10.1093/sleep/zsab161.

IRIDIASTADI, H. 2021. Fatigue in the Indonesian rail industry: A study examining passenger train drivers. Applied Ergonomics, 92, p. 103332, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103332.

LI, F.; CHEN, C.-H.; ZHENG, P.; FENG, S.; XU, G.; KHOO, L. P. 2020. An explorative context-aware machine learning approach to reducing human fatigue risk of traffic control operators. Safety Science, 125, p. 104655, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104655.

LIU, W.; TANG, M.; WANG, C.; ZHANG, K.; WANG, Q.; XU, X. 2021. Attention-guided dual enhancement train driver fatigue detection based on MTCNN. In: 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST), 2021.

MOSHAWRAB, M.; ADDA, M.; BOUZOUANE, A.; IBRAHIM, H.; RAAD, A. 2022. Smart wearables for the detection of occupational physical fatigue: A literature review. Sensors, 22(19), p. 7472, 2022. https://doi.org/10.3390/s22197472.

RODGER, J. A. 2020. An expert system gap analysis and empirical triangulation of individual differences, interventions, and information technology applications in alertness of railroad workers. Expert Systems with Applications, 144, p. 113081, 2020. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113081.

ROETS, B.; FOLKARD, S. 2022. Estimating hourly work schedule risk in railway traffic controllers. Safety Science, 151, p. 105757, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105757.

SIEBER, W. K.; CHEN, G. X.; KRUEGER, G. P.; LINCOLN, J. E.; MENÉNDEZ, C. C.; O'CONNOR, M. B. 2022. Research gaps and needs for preventing worker fatigue in the transportation and utilities industries. American Journal of Industrial Medicine, 65(11), p. 857–866, 2022. https://doi.org/10.1002/ajim.23346.

WU, H.; JIAO, Y.; JIANG, C.; WANG, T.; YU, J. 2025. Fatigue state evaluation of urban railway transit drivers using psychological, biological, and physical response signals. IEEE Access, 13, p. 23270–23284, 2025. https://doi.org/10.1109/access.2025.3533487.

XIAO, Y.; YANG, Z.; XIE, J.; LI, M. 2023. Interface interaction design of railroad dispatcher fatigue state analysis system. In: 4th International Conference on Intelligent Design (ICID), 2023.

XU, S.; HALL, N. G. 2021. Fatigue, personnel scheduling and operations: Review and research opportunities. European Journal of Operational Research, 295(3), p. 807–822, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.036.

Ariane Cristina Alvim Araujo (ariane_fisica@yahoo.com.br)
IF Sudeste MG, Campus Santos Dumont, Graduação em Engenharia Ferroviária e Metroviária, Rua Técnico Panamá, 45 - Quarto Depósito, Santos Dumont, MG, Brasil.
Lisleandra Machado (lisleandra.machado@ifsudestemg.edu.br)
IF Sudeste MG, Campus Santos Dumont, Rua Técnico Panamá, 45 - Quarto Depósito, Santos Dumont, MG, Brasil.
Camila Martins Saporetti (camila.saporetti@iprj.uerj.br)
Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, RJ, Brasil

FATORES INTERVENIENTES NA INTENÇÃO DE MOTOCICLISTAS RESPEITAREM A VELOCIDADE COM BASE NA TEORIA DO COMPORTAMENTO PLANEJADO ESTENDIDA.

André Luis Barcelos Matos[1], Flávio José Craveiro Cunto[1], Ingrid Luiza Neto[2], Yurih Ribeiro Queiroz[1], Laura Gonçalves[1]
[1] Universidade Federal do Ceará, [2]Universidade Católica de Brasília

RESUMO
Entender o comportamento dos motociclistas é importante para o desenvolvimento de estratégias de segurança viária. O presente estudo visa a identificar os fatores intervenientes na intenção de motociclistas respeitarem a velocidade, utilizando a Teoria do Comportamento Planejado Estendida. Para tanto, desenvolveu-se a Escala de Respeito à Velocidade por Motociclistas (ERVM), a partir do estudo das crenças salientes locais. A ERVM foi submetida à análise de fidedignidade, Análise Fatorial Confirmatória e Modelagem por Equações Estruturais, para analisar os efeitos das variáveis latentes e sociodemográficas na intenção de respeitar a velocidade. Foi evidenciado o efeito do controle comportamental percebido e da atitude sobre a intenção de respeitar a velocidade, bem como o papel central da percepção de risco sobre a atitude e o controle comportamental percebido.

1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O mundo vivencia uma verdadeira epidemia de mortes no trânsito, que afeta sobretudo os usuários mais vulneráveis, dentre os quais se destacam os motociclistas. No Brasil, cerca de 62% das internações hospitalares registradas pelo Sistema Único de Saúde (SUS) em 2020 foram motociclistas (Brasil, 2023). Acompanhando essa tendência, na cidade de Fortaleza, os motociclistas representaram 52% das vítimas fatais no trânsito em 2023 (AMC, 2024).

Dentre os principais fatores de riscos de sinistros entre motociclistas, o excesso de velocidade se destaca (Eyssartier, 2017). Em Fortaleza, o monitoramento dos fatores de risco para a violência no trânsito, realizado pela *Bloomberg Initiative for Global Road Safety* (BIGRS), em parceria com o *Johns Hopkins School of Public Health* (JHSPH) e Universidade Federal do Ceará (UFC), demonstrou que os motociclistas são os condutores que mais excedem os limites de velocidade (33%) (Torres *et al*., 2019).

A investigação dos condicionantes que afetam o comportamento de exceder a velocidade limite é um elemento essencial para a definição de políticas públicas de segurança viária. Nesse contexto, as teorias sobre comportamento humano, em especial a Teoria do Comportamento Planejado (TCP) desenvolvida por Ajzen (1991), tem se mostrado uma ferramenta importante que tem sido amplamente aplicada para compreensão do comportamento, sobretudo nas situações que envolvem o comportamento arriscado no trânsito (Eyssartier *et al*., 2017).

A TCP assume que a intenção comportamental é influenciada por três construtos independentes: atitude (relacionado às crenças favoráveis ou desfavoráveis sobre o comportamento), norma subjetiva (a pressão social aprovando ou desaprovando determinado comportamento) e controle comportamental percebido ou percepção de controle do comportamento (a percepção de que é possível executar uma ação). Estes construtos representam um conjunto de crenças que o indivíduo expressa com maior frequência e intensidade (crenças salientes) e que interagem entre si (Velloso, 2013). Ademais, a TCP é aberta a extensões e refinamentos, com o objetivo de melhorar a previsão e a explicação do comportamento em análise (Ajzen, 1991), utilizando-se a chamada TCP estendida. Assim, a inclusão de novos construtos, como a percepção de risco sugerida por (Liang, 2024), permite aumentar o poder explicativo do modelo. Como ferramenta de análise para a TCP, os Modelo de Equações Estruturais (MEE) têm se mostrado capazes de investigar relações complexas entre as variáveis sociodemográficas e latentes (Liang, 2024).

A presente pesquisa visa analisar a influência dos construtos básicos da TCP, aliada à percepção de risco, na intenção do motociclista em respeitar a velocidade.

2.MÉTODO

O estudo foi realizado a partir da construção de um instrumento de autorrelato capaz de incorporar as crenças dominantes e as características de uso da motocicleta na cidade de Fortaleza. Para tal, os passos metodológicos foram divididos em cinco etapas principais (Figura 1) descritos a seguir: levantamento das crenças, construção

da ERVM, coleta dos dados, validação da estrutura interna e Modelagem por Equações Estruturais.

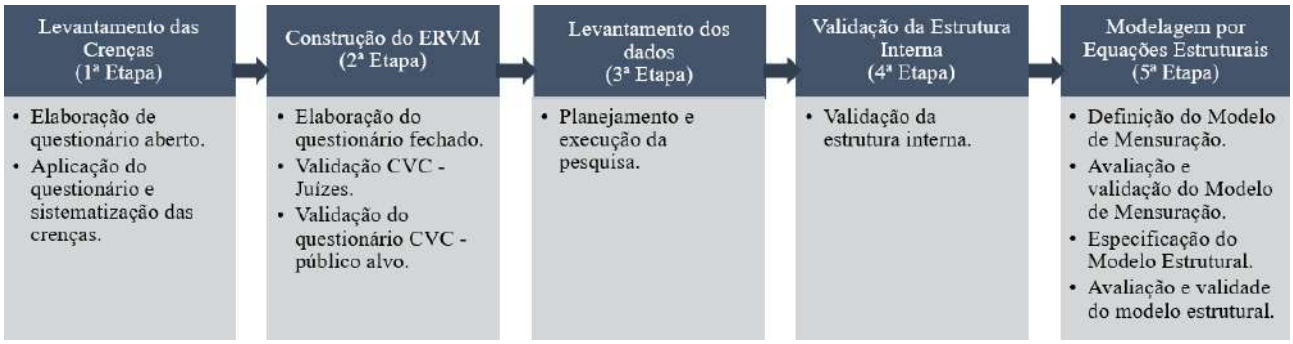


Figura 1: Método da pesquisa.

Na etapa 1 foi elaborado um questionário aberto para a realização da pesquisa piloto de crenças salientes. Os entrevistados foram convidados a listar, de forma espontânea, as vantagens e as desvantagens percebidas em adotar ou não tal comportamento, conforme orientações metodológicas de Ajzen *et al*. (1995).

Na etapa 2, para a construção da ERVM, foram consideradas as crenças recorrentes e adaptados itens dos estudos realizados por Elliott *et al*., (2005), Velloso *et al.,* (2014: 2018) e Yang *et al*., (2019). Foram definidos 40 itens que passaram por duas etapas de validação de conteúdo, com base na metodologia de Hernandez-Nieto (2002), por meio do Coeficiente de Validade de Conteúdo (CVC). O instrumento foi estruturado em escala do tipo *Likert* e de diferencial semântico.

A coleta dos dados, prevista na etapa 3, foi realizada tanto de forma presencial, com apoio Associação dos Trabalhadores por Aplicativos de Fortaleza (ATAF) e da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC), bem como de forma remota, através formulário via *Google* formulário, direcionado ao público em geral, com apoio do Grupo de Pesquisa Rodoviário e Urbano em Mobilidade Segura (PRUMOS) e do Laboratório Cearense de Psicometria (LACEP), ambos da UFC. Foi alcançada uma amostra de 358 indivíduos, dentre os quais 147 responderam presencialmente e 211 responderam de forma *online*, dentro dos parâmetros para MEE (Schumacker e Lomax, 2015).

A etapa 4 consistiu na preparação para a MEE, por meio do processo de análise da estrutura interna da ERVM, através da utilização do coeficiente Ômega de McDonald (ω). Essa métrica indica o grau em que os itens medem de forma consistente um construto, considerando as cargas fatoriais reais de cada item e as variâncias de erro específicas (Dunn *et al*., 2014) (Tabela 1).

Na etapa 5 realizou-se a Análise Fatorial Confirmatória (AFC), que testa empiricamente se os dados da pesquisa se ajustam à estrutura teórica previamente definida (Kline, 2016). Utilizou-se o estimador *Diagonally Weighted Least Squares* (DWLS), com erro padrão robusto e tratamento de dados faltantes *listwise deletion*, método mais adequado para escalas categóricas ou ordinais, pois produzem estimativas mais consistentes dos parâmetros e índices de ajuste (Brown, 2015). A Tabela 1 também detalha os itens finais dos construtos, de acordo com a análise dos índices de ajuste e de resíduos aceitáveis para AFC.

Ainda na etapa 5, foi realizada a MEE, que permite analisar como construtos psicológicos: atitude (ATIT), percepção de controle (PERC), norma subjetiva (NORS) e percepção de risco (PERR), influenciam a intenção comportamental (INTE) dos motociclistas em respeitar os limites de velocidade. Além das variáveis latentes, foram incluídas as variáveis sociodemográficas: USO, variável dummy (0 = uso para trabalho; 1 = não uso para trabalho), referente ao uso da motocicleta para trabalho, e a variável GENERO, variável dummy (0 = feminino; 1 = masculino). Com o processo de ajuste, o modelo estrutural final, MEE consolidado, foi definido com as seguintes relações: Influência direta de PERC, NORS e ATIT sobre INTE (relação básica da TCP); Influência de ATIT, PERR, NORS, USO e GENERO sobre PERC; Influência de PERR, NORS, USO e GENERO sobre ATIT, além da definição de covariâncias específicas entre os itens 27/26 e 23/25, justificadas com base na teoria, para ajustar níveis residuais.

Tabela 1: Construção do modelo de medida.

	ETAPA 4 - FIDEDIGNIDADE		ETAPA 5 -AFC	MODELO DE MEDIDA
CONSTRUTOS	**ITENS REMOVIDOS**	**ω**	**ITENS REMOVIDOS**	**ITENS FINAIS**
ATITUDE (ATIT)	-	0,806	2, 21, 22, 24, 32	1, 3, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31
NORMA SUBJETIVA	8	0.673 para **0.805**	4, 7	5, 6, 9, 10
PERCEPÇÃO DE CONTROLE	40	0.653 para **0.741**	33, 35, 36, 37	11, 12, 13, 14, 38
PERCEPÇÃO DE RISCO	34, 39	0.291 para **0.738**	-	18, 19,20
INTENÇÃO	-	**0.924**	-	15, 16, 17

Acesso a ERVM: (https://drive.google.com/file/d/14itDbhGeCvW7Epx9_mI8yJgccC46nRXx/view?usp=sharing)

Foi proposto um segundo modelo, denominado MEE interação, com a definição de uma nova variável sociodemográfica USO_GENERO, variável dummy, construída a partir da interação entre uso da motocicleta para o trabalho USO e o gênero GENERO do usuário. O MEE interação buscou compreender o efeito da variável uso da motocicleta para o trabalho em relação ao gênero do motociclista. A Tabela 2 representa a construção da variável USO_GENERO.

Tabela 2: Caracterização da Variável dummy USO_GENERO.

GENERO	USO	USO_GENERO	SIGNIFICADO
0	0	0	**Mulheres** que **não utilizam** a moto para o trabalho
1	0	0	**Homens** que **não utilizam** a motocicleta para o trabalho
0	1	0	**Mulheres** que **utilizam** a motocicleta para o trabalho
1	1	1	**Homens** que **utilizam** a motocicleta para o trabalho

Legenda: USO: 0 (não usa para trabalho), 1 (usa para trabalho); GÊNERO: 0 (feminino), 1 (masculino)

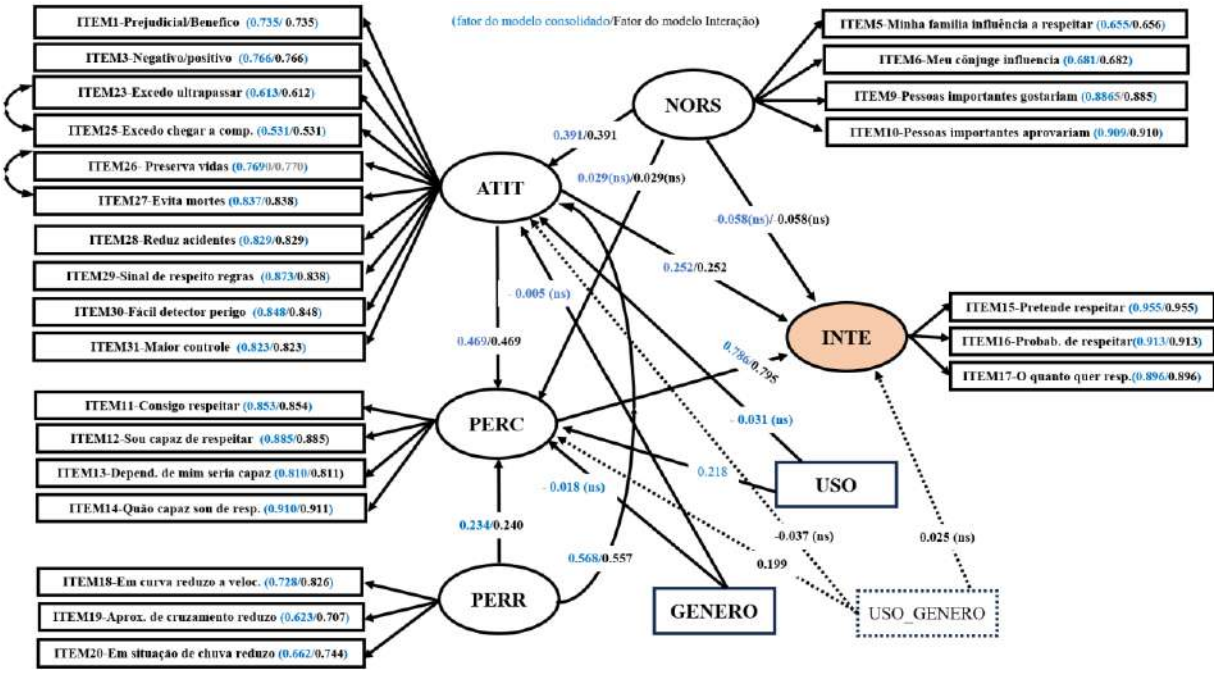
O MEE interação teve o modelo estrutural ajustado mantendo a relação básica da TCP através dos construtos PERC, NORS e ATIT influenciando INTE, a influência da ATIT, PERR, NORS, USO_GENERO sobre a PERC e a influência da PERR, NORS, USO_GENERO sobre a ATIT, além da definição de covariâncias específicas, justificadas pela teoria base, entre os itens 27/26 e 23/25, necessários ajuste dos níveis de resíduos do modelo, resultando no "MEE Consolidado".

4.RESULTADOS E CONCLUSÕES

O modelo consolidado obtido na modelagem teve bons indicadores, com índices de ajuste incrementais CFI = 0.993 e TLI/NNFI = 0.994, considerados adequados (>0.95). Os índices de erro absoluto RMSEA = 0.051 (IC90% 0.048 - 0.058), SRMS = 0.068 caracterizados com bom nível de ajuste e PNFI 1,0 considerado modelo parcimonioso (>0.80) também apresentaram bons níveis de ajuste. De modo geral, o modelo foi capaz de capturar bem as relações previstas pela TCP estendida nos dados dos motociclistas. Essa consistência do MEE consolidado também foi evidenciada no modelo interação, com índices de ajuste satisfatórios (CFI = 0.994, TLI/NNFI = 0.993, NFI = 0.996, erro absoluto RMSEA = 0.049 (IC90% 0.042 - 0.055) e SRMS = 0.076, caracterizados com bom nível de ajuste e PNFI 0.946 considerado modelo parcimonioso.

A Figura 2 mostra o diagrama estrutural dos modelos com resumo dos itens e fatores, sendo os fatores em azul para o modelo consolidado e em cinza para o modelo interação. Observa-se que a intenção comportamental de respeitar o limite de velocidade foi influenciada fortemente pelo controle percebido (consolidado: 0.786/interação: 0.795). Já a atitude teve efeito direto menor (consolidado: 0.246/interação: 0.252), entretanto maior influência sobre a percepção de controle comportamental (consolidado: 0.439/interação: 0.469), indicando que os motociclistas que entendem as vantagens da velocidade segura têm mais capacidade de

mantê-las. Tais resultados estão em consonância com a TCP, a qual postula que as atitudes e a percepção de controle comportamental são preditoras diretos da intenção comportamental (Ajzen, 1991).



Legenda: (ns) = não significativo (α=0,05)
Fator do modelo consolidado (cor azul) / Fator do modelo interação (cor preta)

Figura 2: Diagramas estruturais do MEE Consolidado/Interação.

A norma subjetiva, descrita principalmente pela influência de familiares e pessoas importantes, foi o único construto que não apresentou influência direta na intenção de não exceder a velocidade (consolidado: -0.034 /interação: -0.058, não significativo). Embora sem significância estatística, merece atenção por sugerir uma tendência contraintuitiva, em que percepções de pressão social podem reduzir a intenção de respeitar o limite. Este padrão pode refletir a natureza mais individualizada entre motociclistas, conforme estudo de Elliott *et al*. (2007). Esse construto também não apresentou influência significativa sobre a percepção de controle comportamental (consolidado: 0.050 /interação: 0.029, não significativas). No entanto, teve influência na atitude (consolidado: 0.378/interação: 0.391). Assim, a pressão social tem reflexo na atitude de respeito à velocidade.

A percepção de risco destacou-se como a variável exógena central na intenção do respeito à velocidade. O substancial efeito da percepção de risco sobre a atitude (consolidado: 0.568/interação: 0.557) indica que motociclistas que percebem maior risco desenvolvem atitudes mais favoráveis ao respeito ao limite de velocidade. Esse resultado reforça evidências anteriores de que a conscientização sobre os riscos é central para modificar atitudes seguras (Elliott *et al*., 2003). Já o efeito da percepção de risco sobre a percepção de controle comportamental (consolidado: 0.234/interação: 0.240) fortalece a percepção de que é possível respeitar a velocidade.

A inclusão da variável de interação entre uso e gênero teve como objetivo explorar se o efeito do uso da motocicleta para o trabalho difere entre homens e mulheres. A interação USO_GENERO sobre a ATIT = -0.037, e USO_GENERO sobre a INTE = 0.025 não foram significativas. Contudo, o efeito USO_GENERO sobre PERC = 0.199 teve associação moderada e positiva, indicando que homens motociclistas podem desenvolver maior confiança no controle, ainda que essa confiança nem sempre se traduza em atitudes seguras.

A influência da percepção de controle comportamental com efeito direto mais relevante na intenção indica a importância do investimento em treinamentos e campanhas com foco na pilotagem segura, reforçando as técnicas defensivas e combatendo o excesso de confiança. A atitude se mostra relevante, tanto pelo efeito direto moderado sobre a intenção, como pelo efeito sobre a percepção de controle comportamental. Portanto, informações sobre as vantagens da política de controle de velocidade são especialmente relevantes. Já a relação

entre norma subjetiva e atitude indica a relevância de ações voltadas ao grupo profissional, sobretudo o público masculino que apresenta atitude mais propensa à velocidade, devendo estimular a imagem do profissional que cuida da sua segurança. A percepção de risco se destaca com forte influência sobre a atitude, o que ressalta a importância de ações educativas voltadas a demonstrar o risco da velocidade elevada com campanhas direcionadas, contendo simulações sobre situações de risco do cotidiano do condutor. Os resultados indicam caminhos para a definição de políticas com foco no motociclista, tais como: treinamentos focados na percepção de risco, campanhas de mídias direcionadas as atitudes e normas subjetivas, diferenciação nas ações pelo perfil de uso, expansão da regulamentação para fortalecer o uso profissional e a rotulagem positiva.

O estudo tem por limitações a influência do ambiente nas respostas dos participantes na pesquisa presencial sobre crenças na agência de gestão de trânsito, o que corre também para pesquisas online, quando há o risco de respostas socialmente desejáveis e maior dificuldade com mecanismos de controle das respostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ajzen, I. (1991) The theory of planned behavior. Organizational Behavior and Human Decision Processes, *50*(2), 179–211. doi:10.1016/0749-5978(91)90020-T

Ajzen, I., Driver, B. L., & Nichols, A. J., III. (1995). Identifying salient beliefs about leisure activities: Frequency of elicitation versus response latency. Journal of Applied Social Psychology, 25, 1391-1410.

AMC. (2024) Relatório Anual de Segurança Viária – Fortaleza 2023. Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza – AMC. 1ª Edição.

Brasil. (2023) Boletim Epidemiológico 6: Cenário brasileiro das lesões de motociclistas no trânsito de 2011 a 2021. Ministério da Saúde. Volume 54.

Brown, T. (2015). Confirmatory Factor Analysis for Applied Research (2nd Ed). Guilford Press.

Dunn, T. J. Baguley, T.; Brunsden, V. (2014). From alpha to omega: A practical solution to the pervasive problem of internal consistency estimation. British Journal of Psychology, v. 105, n. 3, p. 399–412.

Elliott, M. A.; Baughan, C. J.; Sexton, B. F. (2007). Errors and violations in relation to motorcyclists' crash risk. Accident Analysis & Prevention, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 491–499,

Elliott, M. A.Armitage, C. J.; Baughan, C. J. (2003). Drivers' compliance with speed limits: An application of the theory of planned behavior. Journal of Applied Psychology, v. 88, n. 5, p. 964–972.

Elliott, M. A.Armitage, C. J.; Baughan, C. J. (2005). Exploring the beliefs underpinning drivers' intentions to comply with speed limits. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, [s. l.], v. 8, n. 6.

Eyssartier, C., Meineri, S., e Gueguen, N. (2017) Motorcyclists' intention to exceed the speed limit on a 90 km/h road: Effect of the type of motorcycles. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 45, 183–193. doi:10.1016/j.trf.2016.12.009

Hernandez-Nieto, R. (2002). Contributions to statistical analysis. Mérida, Venezuela: Los Andes University Press.

Kline, R. B. (2016). *Principles and practice of structural equation modeling* (4th ed.). The Guilford Press.

Liang, Z., Zhan, X., Deng, R., e Fu, X. (2024) Research on Risky Driving Behavior of Young Truck Drivers: Improved Theory of Planned Behavior Based on Risk Perception Factor. Journal of Advanced Transportation, 2024, 1–16. doi:10.1155/2024/9966501

McDonald, R. P. (1999). *Test Theory: A Unified Treatment*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Schumacker, R. E.; Lomax, R. G. A Beginner's. (2024). Guide to Structural Equation Modeling: Fourth Edition. 0. ed. [s.l.] : Routledge, 2015. Disponível: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781317608097>. Acesso: 23 out.

Torres, C. A., Xavier, V. J. M., e Cunto, F. J. C. (2019). Relação entre os pilares de segurança viária e a taxa de mortalidade dos países membros da OMS: um estudo utilizando modelo de equações estruturais. In: 33º Congresso Anual da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2019, Balneário Camboriú. Anais do Congresso.

Velloso, M. S., Jacques, M. A. P., e Torres, C. V. (2013). Estudo do comportamento do condutor em relação ao respeito à velocidade limite.

Velloso, M. S., Jacques, M. A. P., e Torres, C. V. (2018). Estudo das crenças salientes e da intenção do condutor em respeitar a velocidade limite em vias urbanas. Texto para Discussão. [s. l.], n. 35, Texto Discussão, p. 26, 2018.

Yang, L., Zhang, X., Zhu, X., Luo, Y., Luo, Y. (2019). Research on Risky Driving Behavior of Novice Drivers. Sustainability,

André Luís Barcelos Matos (andreluis.matos@det.ufc.br)
Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br)
Ingrid Luiza Neto (ingridluizaneto@gmail.com)
Laura Gonçalves (lauragoncalves@alu.ufc.br)
Yurih Ribeiro Queiroz (yurih123.queiroz@gmail.com
Universidade Federal do Ceará.
Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici – Bloco 703 – CEP. 60455-760 – Fortaleza, CE, Brasil

FATORES QUE INFLUENCIAM A ESCOLHA DE PARADA EM PONTOS DE DESCANSO: PERCEPÇÕES DE CAMINHONEIROS NO DISTRITO FEDERAL

Gabriel Elias Almeida de Souza[1], **Michelle Andrade**[1]
[1]Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO
O estudo analisa os fatores que influenciam a decisão dos caminhoneiros na escolha de Pontos de Parada e Descanso (PPDs) no Distrito Federal. A pesquisa foi desenvolvida sob uma abordagem quali-quantitativa por meio de questionários aplicados a motoristas profissionais do transporte rodoviário de carga. Os resultados mostram que a taxa cobrada para o uso do PPD é o fator de maior influência. Além disso, 78,4% dos respondentes relataram conduzir por mais de seis horas consecutivas, em desacordo com a legislação vigente. O teste ANOVA não identificou diferenças significativas entre os grupos, indicando consenso acerca da sua percepção das características essenciais em PPDs. O estudo conclui que é necessária maior fiscalização e padronização dos serviços oferecidos, visando promover bem-estar e segurança.

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é responsável pelo maior volume de movimentação de cargas e passageiros em comparação com os outros modos de transporte, correspondendo a mais de 60% das mercadorias em território brasileiro (CNT, 2019b), movimentando mais de 4% do produto interno bruto brasileiro (Araújo *et al*., 2014). Apesar da relevância do transporte rodoviário de cargas para a economia do país, as políticas governamentais, empresas do setor e sociedade não apresentam a atenção necessária para infraestrutura rodoviária e a segurança dos motoristas (Silva, 2015).

Em busca de maximizar os lucros, algumas empresas seguem pressionando os caminhoneiros por meio dda imposição de prazos de coleta e entrega mais curtos, estimulando os profissionais a reduzirem o tempo de descanso adequado (Botelho *et al.*, 2011). Somente em 2015, com o intuito de mitigar as condições de trabalho irregulares usualmente praticadas pelos motoristas, foi criada a Lei n.º 13.103/2015 (Brasil, 2015), conhecida popularmente como “Lei do Motorista” ou ainda “Lei do Descanso”. Essa legislação dispõe sobre aspectos como jornada de trabalho, tempo de direção, períodos de descanso e condições laborais dos motoristas de transporte rodoviário de passageiros e cargas. Posteriormente, complementando a referida lei, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), estabeleceu, por meio da Resolução n.º 6.054/2024, o Regulamento dos Pontos de Parada e Descanso (PPDs) nas rodovias federais concedidas. Seu objetivo é regulamentar, fiscalizar e padronizar os locais de descanso destinados aos motoristas profissionais, em conformidade com a Lei nº 13.103/2015 e o Código de Trânsito Brasileiro (ANTT, 2024).

Os PPDs são estabelecimentos localizados ao longo das rodovias e visam proporcionar descanso e segurança aos motoristas, reduzindo a fadiga e promovendo condições dignas de trabalho, contribuindo para a prevenção de sinistros de trânsito (ANTT, 2024). Além disso, também foram idealizados como espaços de suporte para que os motoristas possam usufruir de um descanso digno durante percursos longos e exaustivos (AL-KAISY et al., 2011), contribuindo para a segurança viária ao reduzir a fadiga dos condutores, fator este que afeta diretamente seus reflexos e capacidade de reação (Jackson *et al*., 2013).

Atualmente, o Brasil conta com 139 PPDs, sendo 128 postos de combustíveis e 11 pontos de parada e apoio em 21 estados brasileiros mais o Distrito Federal, com a maior concentração na região Sul do país, com 62 estabelecimentos certificados (Ministério dos Transportes, 2025). Com o aumento no número de PPDs certificados no país e a recente regulamentação para padronização desses estabelecimentos, é possível que a fiscalização ainda não esteja sendo realizada de forma adequada, resultando em pontos certificados que não cumprem os requisitos mínimos exigidos, como a gratuidade dos serviços essenciais.

Outros problemas enfrentados pelos motoristas profissionais do transporte rodoviário de cargas continuam presentes, como a desvalorização da profissão, o medo de assaltos, a carga excessiva de trabalho, dificuldades com fiscalizações devido ao excesso de carga e a falta de tempo para a convivência familiar. Além disso, os próprios condutores relataram que suas rotinas costumam envolver cerca de 11 horas de trabalho por dia, sendo

que alguns mencionaram jornadas ainda mais extensas, de 13, 16 ou até 18 horas diárias (Guimarães, 2003).

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é analisar quais características dos PPDs mais influenciam a decisão dos caminhoneiros do Distrito Federal em realizar paradas para descanso, bem como verificar se seus hábitos estão em conformidade com a Lei nº 13.103/2015. O estudo também avalia a consistência das respostas entre os motoristas e identifica quais aspectos dos PPDs, como limpeza, alimentação, segurança, taxas cobradas e localização, demandam melhorias segundo a percepção dos próprios condutores.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, conforme a classificação proposta por Provdanov e Freitas (2013), uma vez que busca descrever e compreender, sem interferência direta, as percepções dos caminhoneiros sobre os PPDs, com base na observação e análise de seus relatos. A abordagem adotada foi quali-quantitativa, combinando a análise estatística de dados com a interpretação qualitativa das percepções dos participantes.

Considerando a extensa malha rodoviária nacional, a pesquisa foi delimitada ao Distrito Federal, com a aplicação de questionários presenciais junto a motoristas profissionais de transporte de cargas no Setor de Indústria e Abastecimento (SIA-DF). Os participantes foram abordados durante o processo de descarregamento de mercadorias, garantindo que estivessem disponíveis para responder às questões com atenção e segurança.

O instrumento de coleta foi um questionário estruturado com 12 perguntas fechadas, dividido em duas partes:

- A primeira parte contou com oito questões avaliadas em escala *Likert* de 11 pontos (0 = "Não influencia"; 10 = "Influencia muito"), com o objetivo de identificar os fatores que mais influenciam a decisão dos motoristas em escolher um PPD para descanso. Foram avaliados aspectos como limpeza, alimentação, segurança, taxas cobradas, infraestrutura e localização (Tabela 1).

- A segunda parte incluiu quatro perguntas fechadas relacionadas a comportamentos que configuram descumprimento da Lei nº 13.103/2015 (Lei do Motorista), especialmente no que se refere a tempo de direção e jornadas de trabalho. As questões foram selecionadas com base no estudo de Guimarães (2003), permitindo verificar se práticas irregulares ainda persistem e, consequentemente, identificar melhorias necessárias nos PPDs para incentivar o cumprimento da legislação e o bem-estar dos motoristas.

Tabela 1: Questionário aplicado para os caminhoneiros em escala *Likert*

Identificação	Aspectos Essenciais no PPD
Q1	Qualidade e/ou variedade da alimentação local
Q2	A sua segurança pessoal (brigas, furtos no ambiente)
Q3	Segurança do veículo e/ou da carga (roubo de carga, sequestros nas proximidades do PPD)
Q4	Serviço de atendimento disponibilizado no PPD (borracharia, conveniência, combustível)
Q5	Taxa cobrada pela utilização do PPD (taxa para utilização de áreas de banho ou vagas)
Q6	Quantidade de vagas disponíveis no PPD
Q7	Limpeza e higienização dos ambientes (refeitórios, banheiros,)
Q8	Áreas de lazer e descanso

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados foram coletados presencialmente no Setor de Indústria e Abastecimento (SIA-DF), entre os dias 07/06/2025 e 30/06/2025. A amostra foi composta por 51 respondentes, todos do sexo masculino (n = 51). A maioria atua como caminhoneiro há entre 10 e 20 anos (n = 33), e dirige entre 6 e 8 horas consecutivas sem

descanso (n = 24), sendo considerado como descanso o tempo superior a 30 minutos, conforme definido pela Lei nº 13.103/2015 (Brasil, 2015).

Quanto à jornada diária, 24 motoristas relataram trabalhar entre 9 e 10 horas, número próximo aos que informaram jornadas superiores a 10 horas diárias (n = 22). Além disso, a maioria declarou trabalhar seis dias por semana (n = 24).

Esses dados estão organizados na Tabela 2, que apresenta o perfil geral de cada grupo, a frequência absoluta (Fi), a frequência relativa em porcentagem (Fr), e as médias ($\bar{x}$) das respostas na escala *Likert*, referentes às características que influenciam a decisão de parada em um PPD.

Tabela 2: Análise estatística descritiva das respostas

Aspecto Geral	Grupo	Fi	Fr (%)	$\bar{x}_{Q1}$	$\bar{x}_{Q2}$	$\bar{x}_{Q3}$	$\bar{x}_{Q4}$	$\bar{x}_{Q5}$	$\bar{x}_{Q6}$	$\bar{x}_{Q7}$	$\bar{x}_{Q8}$
Tempo de Serviço	Menos que 10 anos	7	13,7%	6,4	6,4	7,3	6,0	8,3	6,6	7,1	5,4
	Entre 10 e 20 anos	33	64,7%	7,7	8,1	8,4	7,6	9,2	8,4	8,6	7,4
	Acima de 20 anos	11	21,6%	6,8	8,3	8,8	6,6	9,5	7,9	9,0	6,9
Tempo de direção sem descanso (considerando descanso tempo superior à 30 minutos)	Até 6 horas	11	21,6%	6,8	8,3	8,5	6,9	9,4	7,8	8,4	6,5
	Entre 6 e 8 horas	24	47,1%	7,1	7,8	8,3	7,3	9,1	7,9	8,3	7,0
	Acima de 8 horas	16	31,4%	7,9	7,9	8,3	7,3	8,9	8,5	8,9	7,4
Horas trabalhadas por dia	Até 9 horas	5	9,8%	8,6	8,4	8,6	8,0	8,4	7,8	8,2	7,4
	Entre 9 e 10 horas	24	47,1%	7,5	8,0	8,4	7,5	9,2	8,4	8,5	7,2
	Acima de 10 horas	22	43,1%	6,9	7,8	8,2	6,6	9,1	7,8	8,6	6,8
Dias trabalhados na Semana	Até 5 dias	24	47,1%	7,4	7,8	8,2	7,4	9,2	8,3	8,7	7,3
	6 dias	20	39,2%	6,9	8,0	8,6	6,7	9,4	7,6	8,5	6,3
	7 dias	7	13,7%	8,3	8,1	8,3	8,0	8,1	8,7	7,7	8,6
$\bar{x}_{final}$		**51**	**100%**	**7,4**	**7,9**	**8,3**	**7,2**	**9,0**	**8,0**	**8,4**	**7,0**

Os resultados apresentados indicaram um resultado preocupante. Corroborando com o achado da pesquisa CNT (2019a) que indica que os caminhoneiros dirigem em média 11,5 horas por dia, 78,4% dos respondentes declararam dirigir por mais de seis horas consecutivas sem descanso, configurando um elevado padrão de infração à Lei nº 13.103/2015 (Brasil, 2015). Essa legislação estabelece que motoristas de carga não podem dirigir por mais de cinco horas e meia ininterruptas, sendo obrigatória uma pausa mínima de 30 minutos a cada seis horas de condução, com o objetivo de prevenir sinistros de trânsito associados à fadiga. Considerando a gravidade dessa conduta, optou-se por isolar esse grupo para a aplicação do teste ANOVA de uma via, a fim de verificar se há diferenças estatisticamente significativas nas percepções quanto às características que influenciam a escolha de parada em um PPD, dado que esse grupo representa, na amostra, o maior potencial de risco viário por exaustão.

Além disso, verificou-se que o fator mais expressivo nas avaliações foi o referente às taxas cobradas pelos PPDs, com média de 9,0 e desvio padrão de ±1,0, sendo classificado como de alta influência. Durante a aplicação do questionário, esse item foi o que gerou maior número de comentários espontâneos e manifestações de insatisfação por parte dos motoristas. Muitos relataram que, em determinadas regiões, só é possível utilizar o PPD mediante abastecimento do veículo ou pagamento de taxas, especialmente para o uso de áreas de banho. Adicionalmente, os condutores apontaram que serviços complementares, como borracharias e lojas de conveniência, frequentemente praticam preços superiores aos de mercado. Tais práticas, além de contrariar o disposto na Resolução nº 6.054/2024 da ANTT, que garante a gratuidade de diversos serviços essenciais nos PPDs certificados, impactam negativamente na decisão dos caminhoneiros de utilizar esses pontos para descanso comprometendo a segurança deste profissional e dos demais usuários das rodovias.

Para a aplicação do teste ANOVA de fator único, foi adotado um nível de confiança de 95%, sendo considerado estatisticamente significativo um *p-valor* inferior a 0,05. Os resultados demonstraram que não houve diferenças significativas nas avaliações dos seguintes fatores: qualidade e/ou variedade da alimentação (p = 0,11), segurança pessoal (p = 0,89), segurança do veículo e/ou da carga (p = 0,61), serviço de atendimento (p = 0,46), taxa de utilização do PPD (p = 0,42), disponibilidade de vagas (p = 0,14), limpeza e higienização dos ambientes (p = 0,24) e áreas de lazer e descanso (p = 0,12). Esses achados indicam que, mesmo entre os motoristas que dirigem por longos períodos sem descanso, as percepções sobre os fatores que influenciam a escolha de parada em PPDs são convergentes, demonstrando uma uniformidade nas avaliações independentes do comportamento quanto ao tempo de direção.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar os principais fatores que influenciam a decisão dos motoristas profissionais de transporte rodoviário de cargas no Distrito Federal quanto à utilização de Pontos de Parada e Descanso (PPDs), além de verificar a conformidade de seus hábitos com a Lei nº 13.103/2015. A partir de um questionário estruturado aplicado presencialmente, foi possível observar que mais da metade dos participantes declarou dirigir por mais de seis horas consecutivas sem pausa, prática que contraria a legislação vigente e acentua os riscos relacionados à fadiga.

Com base nesse achado, o grupo com jornada irregular foi isolado para aplicação do teste ANOVA de fator único, a fim de investigar possíveis diferenças significativas nas percepções sobre os fatores de escolha dos PPDs. Os resultados indicaram ausência de variação estatisticamente significativa entre os grupos, sugerindo homogeneidade nas avaliações, independentemente do tempo de direção sem descanso.

Entre os fatores avaliados, a taxa cobrada pelo uso dos PPDs destacou-se como o mais relevante, apresentando média de 9,0 e desvio padrão de ±1,0. Relatos dos caminheiros indicam que, em algumas localidades, o acesso aos serviços essenciais está condicionado a pagamento ou abastecimento, o que contraria a Resolução nº 6.054/2024 da ANTT, que assegura a gratuidade desses serviços nos estabelecimentos certificados. Tal situação compromete a função essencial dos PPDs e reforça a necessidade de fiscalização efetiva e padronização das estruturas oferecidas.

Apesar dos resultados relevantes, o estudo apresenta limitações que devem ser reconhecidas. A amostra foi restrita ao Distrito Federal, com número reduzido de participantes (n = 51), todos do sexo masculino, o que limita a generalização dos achados. Além disso, o uso exclusivo de perguntas fechadas e de uma escala *Likert* de 11 pontos pode não ter sido o mais adequado ao perfil da população estudada, restringindo a profundidade e a precisão das respostas. A autodeclaração de comportamentos também pode ter sido influenciada por viés de desejabilidade social.

Diante dessas limitações, recomenda-se que pesquisas futuras sejam conduzidas com amostras mais amplas e representativas de diferentes regiões do país, contemplando maior diversidade de gênero e experiência profissional. Sugere-se ainda a adoção de escalas de avaliação mais acessíveis, como as de cinco pontos, além da inclusão de perguntas abertas para capturar aspectos qualitativos da percepção dos motoristas. A investigação de fatores associados ao descumprimento da legislação, bem como a análise da eficácia dos PPDs na redução de acidentes por fadiga, também representam caminhos promissores de estudos.

Resultados destes estudos poderão subsidiar avanços na promoção de políticas públicas mais eficazes voltadas à valorização do caminhoneiro e à promoção de condições adequadas de trabalho, bem-estar e segurança, reconhecendo o papel estratégico desses profissionais no desenvolvimento econômico nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT - Agência Nacional De Transportes Terrestres (2024) *Resolução nº 6.054, de 31 de outubro de 2024.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 89, 1 nov. 2024. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&tipo=RES&numeroAto=00006054

&seqAto=000&valorAno=2024&orgao=DG/ANTT/MT&cod_modulo=623&cod_menu=9230 (acesso em: 5 jul. 2025).

Al-Kaisy, A.; Kirkemo, Z.; Veneziano, D.; Dorrington, C. (2011) *Traffic Use of Rest Areas on Rural Highways.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2255. 146-155. DOI: 10.3141/2255-16.

Araújo, M. P. S.; Bandeira, R. A. M.; e Campos, V. B. G. (2014) *Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas*. Journal of Transport Literature. 8. 187-226. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v8n4a8.

Botelho, L. J., Diesel, L. E., Adamczyk, J. F., e Zeferino, M. T. (2011) *Profissão motorista de caminhão: Uma visão (im)parcial*. Saúde e Transformação Social, 2(1), 108-113.

BRASIL (2015) *Lei n.º 13.103, de 2 de março de 2015. Dispõe sobre o exercício da profissão de motorista.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 152, n. 42, p. 1-2, 3 mar. 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13103.htm (acesso em: 5 jul. 2025).

BRASIL (1997) *Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 24 set. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm (acesso em: 5 jul. 2025).

CNT Confederação Nacional do Transporte (2019a) *Perfil dos caminhoneiros: Pesquisa CNT de rodovias 2019*. CNT. https://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/Pesquisa%20Perfil%20Caminhoneiro%202019.pdf (acesso em: 13 jul. 2025).

CNT Confederação Nacional do Transporte (2019b) *Pesquisa CNT de Rodovias 2019*. Disponível em: https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/34e78e55-5b3e-4355-9ebc-acf1b8e7b4a4.pdf (acesso em: 5 jul. 2025).

Guimarães, M. C.; Landim, L. S.; Aparecida, H. R. S. (2003) *Estresse ocupacional e sofrimento no trabalho: um estudo com caminhoneiros.* Revista de Psicologia, Fortaleza, v.21, n.1/2, 2003, p.54-63. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/12600 (acesso em 5 jul. 2025)

Jackson, M. L., Croft, R. J., Kennedy, G. A., Owens, K., & Howard, M. E. (2013) *Cognitive components of simulated driving performance: Sleep loss effects and predictors. Accident Analysis and Prevention,* DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2012.05.020.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (2025) *Painel dos Pontos de Parada e Descanso - PPDs*. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre_/portal-trc/ppd/lista-de-ppds-certificados (acesso em: 5 jul. 2025).

Prodanov, C. C.; De Freitas, E. C. (2013) *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*-2ª Edição. Editora Feevale.

Silva, R. A. (2015) *Vida de caminhoneiro: sofrimento e paixão.* Mestrado em Psicologia (Dissertação), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas.

Gabriel Elias Almeida de Souza (souza.almeida@aluno.unb.br)
Michelle Andrade (michelleandrade@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes Anexo SG-12, 1° andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

IMPACTO DA PRECIPITAÇÃO NO COMPORTAMENTO DE CONDUTORES: UMA ABORDAGEM BASEADA EM ESTUDO NATURALÍSTICO DE DIREÇÃO

Isabela Pereira Macedo Dutra[1], Mariana de Paiva[1], José Gustavo Venancio da Silva Ramos[1], Luciana Araujo Azevêdo de Oliveira[1], Jorge Tiago Bastos[2]
[1]Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, [2]Universidade Federal do Paraná.

RESUMO
Este estudo analisou a influência da precipitação no comportamento de condutores com base em dados do Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro (NDS-BR), coletados na Região Metropolitana (RM) de Curitiba entre 2019 e 2021. A amostra incluiu 543 viagens, com registros por segundo de velocidade, aceleração e frenagem. A condição de chuva foi atribuída à estação pluviométrica mais próxima, e os dados foram agrupados em faixas de velocidades, de acelerações e de frenagens. Testes não paramétricos, com e sem reamostragem bootstrap, indicaram que a chuva levou a aumento do tempo em velocidades moderadas e frenagens abruptas e redução no tempo de permanecia em acelerações normais e velocidades excessivas. O bootstrap revelou diferenças sutis não captadas na amostra original. Os resultados oferecem subsídios para políticas públicas de segurança viária.

1. INTRODUÇÂO

Os sinistros de trânsito estão entre as principais causas de morte no Brasil, com 34.881 óbitos registrados em 2023 e uma taxa de mortalidade de 16,2 por 100 mil habitantes (ONSV, 2025). Motociclistas representaram 38,6% das vítimas, seguidos por ocupantes de automóveis (22%), indicando a necessidade de adoção de estratégias que visem aumentar a segurança viária.

Os fatores associados aos sinistros são agrupados em: humano, veicular, viário e ambiental. Entre esses, os fatores humanos e ambientais são frequentemente apontados como determinantes, muitas vezes inter-relacionados (Wierwille *et al.*, 2002). Entre os fatores ambientais, a precipitação destaca-se por comprometer a visibilidade, a aderência ao pavimento e influenciar no comportamento dos condutores (Pisano *et al.*, 2005). Em áreas urbanas, a chuva pode reduzir a velocidade média, aumentar os espaçamentos entre veículos e diminuir a fluidez (Downs, 2004). O *Highway Capacity Manual* também aponta a visibilidade como elemento de redução da velocidade em condições adversas (Camacho *et al.* 2010).

Diversos estudos apontam que os condutores tendem a adotar estratégias mais defensivas sob chuva. Em Lisboa, Faria *et al*. (2020) constataram um aumento nas acelerações e frenagens bruscas sob chuva (2% e 3,5%, respectivamente), em comparação ao tempo seco (1,5% e 1,7%). Segundo os autores, esse comportamento pode ser interpretado como tentativa de adaptação ao risco ampliado. Na região de *Twin Cities*, nos EUA, Agarwal *et al.* (2006) identificaram que a velocidade média de tráfego pode reduzir entre 1% e 7%, dependendo da intensidade da precipitação. Billot *et al.* (2009), por sua vez, verificaram uma redução de 8% na velocidade de fluxo livre em Paris sob chuva leve (2–3 mm/h), e de 12,6% em condições moderadas a intensas. Complementarmente, Hranac *et al.* (2006) constataram redução de velocidade entre 10% e 25% em áreas metropolitanas norte-americanas durante eventos de chuva intensa, o que limita a progressão dos motoristas para faixas de velocidade mais elevadas.

No Brasil, ainda são escassos os estudos que investigam o comportamento dos condutores diante às condições ambientais. Normalmente, as pesquisas baseiam-se em questionários (Dozza *et al*., 2015) ou simuladores (Santos *et al.*, 2017), métodos que enfrentam limitações em termos de realismo e confiabilidade. Como alternativa, os Estudos Naturalísticos de Direção (NDS) surgem como opção ao utilizarem sensores e câmeras instalados em veículos para registrar o comportamento dos motoristas em tempo real, em contextos reais de condução (Van Nes *et al.*, 2019).

O método NDS é utilizado em vários países para entender o comportamento dos condutores em condições reais. Nos EUA, o SHRP 2 NDS revelou a forte influência de distrações e fadiga em sinistros (Neale *et al.*, 2005; Richard *et al.*, 2020). No Japão, Suto *et al.* (2007) utilizaram o NDS para avaliar a eficácia de sinalizações dinâmicas, enquanto Yoh *et al.* (2017) analisaram diferenças entre motoristas locais e estrangeiros. No Brasil, dados do NDS-BR já foram utilizados para mostrar que o uso do celular compromete o tempo de reação e aumenta o risco de colisão traseira (Bastos *et al.*, 2020) e que a presença de radares e lombadas eletrônicas gera redução de 22% na velocidade média dos motoristas (Gadda *et al.*, 2021).

Este artigo tem como objetivo analisar a influência da precipitação no comportamento de condutores, a partir de dados do Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro (NDS-BR), coletados na Região Metropolitana de Curitiba entre 2019 e 2021. A análise se concentrou no tempo de permanência em diferentes faixas de velocidade, aceleração e frenagem, comparando situações com e sem chuva, por meio de testes estatísticos.

2. MÉTODO

2.1. Obtenção de dados sobre comportamento de condutores e sobre Precipitação

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir do NDS-BR, que adota metodologia baseada na coleta contínua e não invasiva de informações durante a condução real de veículos. Para isso, foram usados notebook, inversor de voltagem, dispositivo GPS e três câmeras, com gravação de imagens e dados de velocidade e posição a cada segundo, sem captação de áudio, garantindo a privacidade dos condutores. A seleção dos participantes ocorreu de forma voluntária, a partir de convites realizados nas redes sociais.

Os condutores, selecionados aleatoriamente, tiveram sua primeira viagem desconsiderada para adaptação ao sistema. A partir dos vídeos e registros do GPS, foram extraídos o código do condutor, localização (latitude e longitude), data, horário, número da viagem, tempo de condução, velocidade instantânea, aceleração e tipo, localização e limite de velocidade da via A amostra utilizada neste estudo envolveu 31 condutores que circularam pela Região Metropolitana de Curitiba – PR, entre 2019 e 2021, totalizando 543 viagens e 326,77 horas de condução válidas, consideradas apenas quando houve simultaneidade entre registros visuais e dados de GPS, com o motor ligado e o freio de mão desativado.

As informações meteorológicas foram obtidas no CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), que disponibiliza a localização (latitude e longitude) das estações pluviométricas de Curitiba (Butiatuvinha, Atuba, Boa Vista, Cachoeira, Pilarzinho, Santa Felicidade, São Braz, Umbará e Vista Alegre), bem como dados de precipitação. Esses dados incluem código da estação, nome, data e hora da medição, sendo registrados a cada 10 minutos em caso de chuva e a cada hora quando não há ocorrência. Para a análise, considerou-se que a precipitação em cada segundo da viagem correspondia ao valor registrado pela estação mais próxima do condutor naquele momento. A distância euclidiana entre os registros de posição dos condutores e as estações pluviométricas indicou valores entre 0,11 km e 42,94 m. Em 95% dos segundos de viagens investigados, os condutores estavam a menos de 10 km da estação.

2.2. Análise dos Dados e Testes Estatísticos

As informações de localização das estações meteorológicas e dos veículos foram registradas em coordenadas de latitude e longitude. Em função da divergência entre o tempo coleta de dados do condutor (segundos) e de precipitação (minuto ou hora), considerou-se que, a cada segundo, a condição pluviométrica era equivalente ao último valor informado pela estação mais próxima do veículo, com auxílio da Linguagem Python.

Para analisar o comportamento dos condutores, foram definidas categorias baseadas na porcentagem de tempo em diferentes faixas de velocidade (V), aceleração (A) e frenagem (F): V1 (velocidade >10% abaixo do limite da via), V2 (±10% do limite), V3 (>10% acima do limite); A1 (acelerações normais: $0 \leq a \leq 1{,}5$ m/s²), A2 (acelerações abruptas: $a > 1{,}5$ m/s²); F1 (frenagens normais: $-1{,}5 \leq a \leq 0$ m/s²), F2 (frenagens abruptas: $a < -1{,}5$ m/s²). Cada viagem foi dividida em subviagens caso ocorresse mudança nas condições de precipitação, sendo excluídas aquelas com duração inferior a 30 segundos. As somas das porcentagens em cada grupo de velocidade e de aceleração/frenagem totalizam 100%.

Foram elaborados gráficos *boxplot* para os parâmetros avaliados. Devido à limitação do tamanho das amostras, foi adotado o método *bootstrap* para reamostragem, conforme recomendado por Alves (2013) e Golovko (2025). A análise estatística foi conduzida em *Python* e R. Aplicou-se o teste de normalidade (Shapiro-Wilk ou D'Agostino-Pearson). Para o grupo referente a velocidade, caso as variáveis apresentassem distribuição normal, utilizou-se o teste t pareado e *ANOVA* (com pós-teste de *Tukey*). Para variáveis não normais, aplicou-se *Kruskal-Wallis* e post hoc de *Dunn* com correção de Holm. Comparações binárias entre aceleração e frenagem foram feitas por teste *t de Student* (dados normais) ou *U-Mann-Whitney* (dados não normais), adotando-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0{,}05$). Nas análises com *bootstrap*, os testes foram replicados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Sob condições de tempo seco foram registradas 512 subviagens, enquanto sob chuva ocorreram 31 subviagens. Para a análise, foram elaborados *boxplots* (Figura 1), que representam a distribuição do percentual de tempo de permanência dos condutores em diferentes faixas de velocidade, aceleração e frenagem. Os gráficos permitem avaliar a dispersão dos dados por meio do intervalo interquartil (IQR) e identificar valores atípicos, aspectos utilizados para a caracterização do comportamento dos condutores em distintos contextos climáticos.

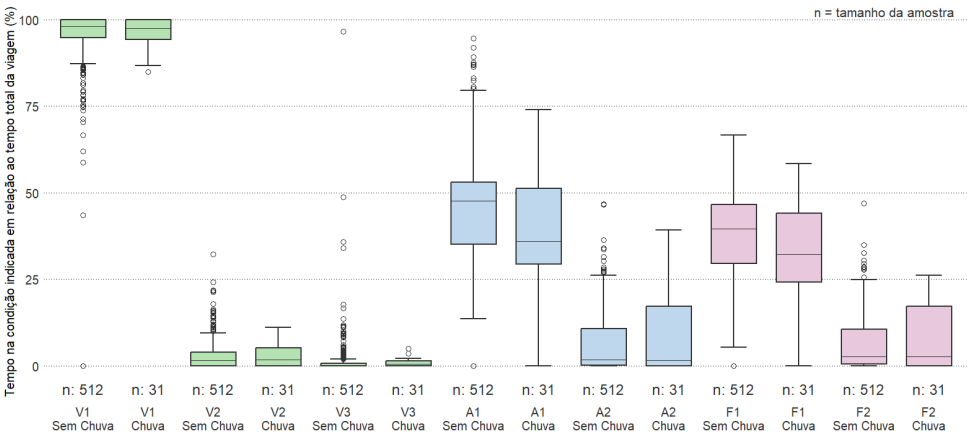


Figura 1: Boxplot do percentual de tempo de permanência em faixas de velocidade (chuva e sem chuva)

A análise dos dados da Figura 1 revelou que, embora a variável V1 tenha apresentado intervalos interquartis (IQR) semelhantes em ambas as condições (sem chuva 5,14 e com chuva 5,84), indicando estabilidade no comportamento dos condutores, as demais variáveis apresentaram maior dispersão sob chuva. As categorias V2 e V3 apresentaram aumentos nos IQRs, sugerindo maior variabilidade nas velocidades adotadas em pista molhada (V2 - sob chuva 5,14 e sem chuva 3,87; V3 - sob chuva 1,40 e sem chuva 0,75). As variáveis A1 e A2, e F1 e F2 também mostraram aumento na dispersão sob chuva, com destaque para acelerações e frenagens abruptas (A1 - 17,92 sem chuva e 21,73 com chuva; A2 - 10,63 sem chuva e 17,09 com chuva; F1 - 16,94 sem chuva e 19,80 com chuva; F2 - 9,99 sem chuva e 17,15 com chuva). Esses resultados indicam que a presença de precipitação está associada a um comportamento mais heterogêneo entre os condutores, refletindo estratégias variadas de adaptação ao risco viário. Tal constatação encontra respaldo nos estudos de Ni *et al.* (2022), Elyoussoufi *et al*. (2023) e Billot *et al.* (2009), que associam essa variabilidade ao impacto da chuva na visibilidade, na aderência ao pavimento e na complexidade perceptiva durante a condução.

Os testes de normalidade indicaram p-valores inferiores a 0,05 para todas as variáveis analisadas e, comparando V1, V2 e V3, o teste de *Kruskal-Wallis* resultou em p-valores < 0,01 tanto para a amostra original quanto para a amostra com *bootstrap.* Assim, para comparações múltiplas entre os grupos, aplicou-se o teste pós-hoc de Dunn com correção de Holm. A Tabela 1 mostra os resultados.

Tabela 1: Teste Dunn – Amostra Original e com *bootstrap* (sem chuva *versus* com chuva)

Grupo 1	Grupo 2	Amostra original		Amostra original *bootstrap*	
		Z-score	**p-valor (Holm)**	**Z-score**	**p-valor (Holm)**
V1_chuva	V1_sem chuva	-0,2609	7,94e-01[2]	2,3267	9,99e-03[1]
V2_chuva	V2_sem chuva	0,4631	1,00e+00[2]	10,207	1,84e-24[1]
V3_chuva	V3_sem chuva	0,8154	1,00e+00[2]	-20,595	4,51e-94[1]
V2_chuva	V3_chuva	1,3333	3,65e-01[2]	45,818	0,00e+00[1]
V2_sem chuva	V3_sem chuva	6,4613	4,15e-10[1]	27,099	2,02e-16[1]

[1]Diferença significativa; [2]Não há diferença significativa.

A análise comparativa entre V1, V2 e V3 (Tabela 1) revelou que, embora a amostra original não tenha indicado diferenças estatisticamente significativas entre as condições com e sem chuva, a aplicação do método bootstrap evidenciou alterações relevantes no comportamento dos condutores. Os resultados apontam um aumento no tempo de permanência em V1 e V2 durante a chuva, sugerindo uma postura mais cautelosa frente ao risco

percebido, enquanto em V3 observou-se redução no tempo de permanência sob chuva, indicando menor tolerância a velocidades elevadas em condições adversas. A comparação entre V2 e V3 também demonstrou preferência por velocidades moderadas em detrimento das excessivas, tanto em tempo seco quanto chuvoso. Esses resultados refletem uma tendência de condução defensiva, alinhada à literatura que associa a percepção de risco viário à adoção de estratégias mais conservadoras (Sakhare *et al.*, 2023; Ghasemzadeh e Ahmed, 2017; Bakhshi *et al.*, 2022), e destacam a importância do bootstrap para identificar padrões de adaptação comportamental sob diferentes condições climáticas.

A Tabela 2 apresenta os resultados do teste de *U-Mann-Whitney* aplicado às variáveis A e F sob condições com e sem chuva, considerando tanto a amostra original quanto a reamostragem via bootstrap.

Tabela 2: Teste de *U Mann-Whitney* aplicado às condições de chuva e sua ausência.

Variáveis	Amostra original p-valor	*bootstrap* (BCa)p-valor
A1_sem chuva e A1_chuva	0,0128[1]	0,000[1]
A2_sem chuva e A2_chuva	0,4651[2]	0,0002[1]
F1_sem chuva e F1_chuva	0,0445[1]	0,000[1]
F2_sem chuva e F2_chuva	0,7344[2]	0,000[1]

[1]Diferença significativa; [2]Não há diferença significativa.

A Tabela 2 mostra diferença estatisticamente significativa para A1 em ambas as abordagens, com redução da mediana de 47,7% para 36,1%, indicando menor permanência em acelerações normais sob chuva. Para A2, embora o teste com a amostra original não tenha indicado diferença significativa, o bootstrap revelou aumento significativo, com elevação da média de 6,02% para 9,07%, sugerindo maior ocorrência de picos de aceleração. Em F1, também houve diferença significativa nas duas análises, com redução da mediana de 39,6% para 32,3%, enquanto em F2, apenas o bootstrap apontou significância, com aumento da média de 6,28% para 8,08%. Esses resultados indicam que, sob chuva, os condutores tendem a reduzir o tempo em acelerações e frenagens normais, substituindo-as por respostas mais intensas, como forma de adaptação à redução de aderência e visibilidade, assim como constatado por Li *et al.* (2015) e Yeo *et al.* (2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a influência da precipitação no comportamento de condutores, com base em 543 viagens monitoradas na RM de Curitiba entre 2019 e 2021, utilizando dados do NDS-BR e informações pluviométricas do CEMADEN. Os dados foram categorizados em faixas de velocidade, aceleração e frenagem, sendo analisados por testes estatísticos, com e sem reamostragem por *bootstrap*. Os resultados indicaram que a chuva induz maior variabilidade comportamental entre os condutores, evidenciada por respostas mais heterogêneas em termos de tempo de permanecia em diferentes faixas de V, A e F. A aplicação do *bootstrap* possibilitou identificar alterações não detectadas na análise da amostra original. Porém, seu uso está sujeito a limitações, uma vez que o número de viagens sob chuva foi relativamente pequeno. Amostras reduzidas podem gerar reamostras redundantes e menor capacidade de representar a variabilidade populacional. Assim, recomenda-se a ampliação da amostra em estudos futuros, a fim de reduzir a dependência da reamostragem. Apesar dessa limitação, os resultados confirmam que a precipitação afeta os padrões de condução, reforçando a necessidade de inserir variáveis ambientais no planejamento e na gestão do tráfego por meio da integração de dados meteorológicos em sistemas inteligentes de transporte, do ajuste de limites de velocidade às condições climáticas e da adoção de medidas preventivas em trechos críticos nas políticas de segurança viária.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Paraná e ao Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV) pelo financiamento da pesquisa e ao Núcleo de Estudos e Pesquisas em Engenharia Civil e Meio Ambiente, do Instituto Federal de Goiás - Campus Goiânia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agarwal, M., Maze, T. H. e Souleyrette, R. (2006). The weather and its impact on urban freeway traffic operations. In *Proceedings of the 85nd annual meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.*

Alves, E. J. (2013) Métodos de *bootstrap* e aplicações em problemas biológicos. Dissertação de Mestrado — Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista.

Amancio, E. C. (2021). Influência de dispositivos de fiscalização eletrônica de velocidade no comportamento do condutor em cenário urbano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

Bakhshi, V.; Aghabayk, K. e Parishad, N. (2022). Evaluating rainy weather effects on driving behaviour dimensions of driving behaviour questionnaire. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2022, p. 1–10.

Bastos, J. T., Santos, P. A. B. D., Amancio, E. C., Gadda, T. M. C., Ramalho, J. A., King, M. J., & Oviedo-Trespalacios, O. (2020). Naturalistic driving study in Brazil: an analysis of mobile phone use behavior while driving. *International journal of environmental research and public health*, 17(17), 6412

Billot, R.; Faouzi, N.-E.E. e Vuyst, F.D. (2009). Multilevel Assessment of the Impact of Rain on Drivers' Behavior: Standardized Methodology and Empirical Analysis. *Transportation research record*, 2107(1), 134-142.

Camacho, F. J.; Garcia, A. e Belda, E. (2010). Analysis of impact of adverse weather on freeway free-flow speed in Spain**.** *Transportation Research Record*, v. 2169, n. 1, p. 150-159.

Downs, A. (2004). Why traffic congestion is here to stay... and will get worse**.** *Access Magazine*, v. 1, n. 25, p. 19-25.

Dozza, M.; Flannagan, C. A. C. e Sayer, R. (2015). Real-world effects of using a phone while driving on lateral and longitudinal control of vehicles**.** *Journal of Safety Researc*h, v. 55, p. 81-87.

Elyoussoufi, A.; Walker, C. L.; Black, A. W. e Degirolamo, G. J. (2023). *The Relationships between Adverse Weather, Traffic Mobility, and Driver Behavior. Meteorology 2023,* 2(4), p. 489-508

Faria, M. V.; Baptista, P. C.; Farias, T. L. e Pereira, J. M. S. (2020). Assessing the impacts of driving environment on driving behavior patterns**.** *Transportation*, v. 47, n. 3, p. 1311-1337.

Gadda, T. M. C.; Amancio, E. C. e Santos, P. A. B. d. (2021). Estudo Naturalístico de Direção no Brasil: metodologia e resultados preliminares**.** *Congresso Brasileiro de Trânsito e Mobilidade Urbana*. Anais eletrônicos. Disponível em: https://www.revistatransportes.org.br. Acesso em: 19 set. 2024.

Ghasemzadeh, A. e Ahmed, M. M. (2017). Drivers' lane-keeping ability in heavy rain: Preliminary investigation using SHRP 2 naturalistic driving study data**.** *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 2663.

Golovko, V. V. (2025). Robust Method for Confidence Interval Estimation in Outlier-Prone Datasets: Application to Molecular and Biophysical Data. *Biomolecules*, *15*(5), 704.

Hranac, R.; Sterzin, E.; Krechmer, D.; Rakha, H. A.; Farzaneh, M. e Arafeh, M. (2006). Empirical studies on traffic flow in inclement weather. (VT-2008-06). Washington, DC: United States. *Federal Highway Administration*.

Neale, V. L.; Dingus, T. A.; Klauer, S. G.; Sudweeks, J. D. e Goodman, M. J. (2005). An overview of the 100-car naturalistic driving study and findings. Paper presented at the 19th *International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Washington, D.C.

ONSV (2025) Observatório Nacional de Segurança Viária. Dados consolidados de óbitos no trânsito brasileiro – 2023. São Paulo. Disponível em: https://www.onsv.org.br/pdi/dados/analise-datasus-2023. Acesso em: 13/07/2025.

Pisano, P. A.; Goodwin, L. C. e Rossetti, M. A. (2005). U.S. highway crashes in adverse road weather conditions**.** U.S. *DOT Federal Highway Administration*, Washington, D.C.

Sakhare, R. S.; Zhang, Y.; Li, H. e Bullock, D. M. (2023). Impact of rain intensity on interstate traffic speeds using connected vehicle data**.** *Vehicles*, 5(1), p. 133-155.

Santos, M. I.; Meira, P. T.; de Oliveira, S.; Ribeiro, R. L.; Larocca, A. P. C. e Jr, F. I. K. (2017). Conceito, configuração e aplicação de um simulador de direção no Brasil: Estudo de caso. *Transportes*, v. 25, n. 2, p. 1-14.

Suto, K.; Fujiwara, A. e Zhang, J. (2007). Characteristics of Driving Behavior on Dangerous Road, and Influences of Warning Information at Intersections. *Infrastructure Planning Review*, *24*, 887-894.

Van Nes, N.; Bärgman, J.; Christoph, M. e Van Schagen, I. (2019). The potential of naturalistic driving for in-depth understanding of driver behavior: UDRIVE results and beyond**.** *Safety Science*, v. 119, p. 11-20, 2019.

Wierwille, W. W., Hanowski, R. J., Hankey, J. M., Kieliszewski, C. A., Lee, S. E., Medina, A., ... e Dingus, T. A. (2002). Identification and evaluation of driver errors: Overview and recommendations.

Yeo, J.; Lee, J e Jang, K. (2021). The effects of rainfall on driving behaviors based on driving volatility. *International journal of sustainable transportation*, v. 15, n. 6, p. 435-443.

Yoh, K.; Okamoto, T.; Inoi, H. e Doi, K (2017). Comparative Study on Foreign Drivers' Characteristics Using Traffic Violation and Accident Statistics in Japan. *IATSS Research*, v. 41, p. 94-105.

Isabela Pereira Macedo Dutra (isabelapereiramacedo@outlook.com)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Mariana de Paiva (mariana.paiva@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
José Gustavo Venâncio da Silva Ramos (jose.ramos@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Luciana Araujo Azevêdo Oliveira (luciana.azevedo@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Jorge Tiago Bastos (jtbastos@ufpr.br)
Universidade Federal do Paraná Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 - Curitiba - PR, Brasil.

IMPACTO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E DE VISIBILIDADE NA FREQUÊNCIA DE ACIDENTES EM RODOVIA

Fernando Lima de Carvalho[1], **Ana Paula Camargo Larocca**[1], **Orlando Yesid Esparza Albarracin**[2]
[1]Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP)
Departamento de Engenharia de Transportes
[2]Universidade Presbiteriana Mackenzie

RESUMO
Relacionar acidentes de trânsito com variáveis climáticas é fundamental para compreender como condições ambientais influenciam a segurança viária, permitindo o desenvolvimento de contramedidas mais eficazes. O artigo tem como objetivo destacar a correlação entre as condições climáticas e o risco de acidentes rodoviários em um nível agregado de forma semanal, a fim de aprimorar o monitoramento da segurança nas estradas em nível nacional. Para tanto, foram desenvolvidos modelos de regressão binomial negativa, adequados para os dados de contagem obtidos, utilizando variáveis explanatórias representativas da precipitação, umidade, temperatura do ar e ponto de orvalho. Os resultados indicam associação significativa entre condições climáticas e a frequência semanal de acidentes rodoviários, com efeitos distintos entre as variáveis analisadas.

1. INTRODUÇÃO

A segurança viária é uma preocupação nas políticas públicas de mobilidade e saúde, dada a elevada taxa de mortalidade associada aos acidentes de trânsito no Brasil, um dos países com os maiores índices de fatalidades no trânsito no mundo. Diversos fatores contribuem para a ocorrência desses eventos, incluindo o comportamento dos condutores, atributos da infraestrutura viária, as condições dos veículos e os aspectos ambientais durante os deslocamentos. Nesse contexto, estudos ao redor do mundo buscam compreender essas relações a fim de propor soluções eficazes para mitigar os impactos sociais e econômicos decorrentes dos acidentes.

Dentre as condições ambientais, fatores relacionados ao clima – como chuvas, neblina e variações de temperatura – têm sido apontados como elementos importantes na modelagem do risco de acidentes. Diversos estudos identificam uma relação positiva entre o volume de precipitação e a frequência de acidentes viários, indicando que o aumento da precipitação está associado a uma maior incidência de ocorrências. Os autores indicam que o risco imposto pela chuva é uma combinação da baixa aderência pneu-pavimento na estrada e com condições de baixa visibilidade (BERGEL-HAYAT et al., 2013; THEOFILATOS E YANNIS, 2014; GUIDELI et al., 2021). Os estudos de Bergel-Hayat et al. (2013) e Brijs et al. (2008) apresentam evidências contrastantes quanto à influência da temperatura do ar nos acidentes viários, apontando tanto efeitos positivos quanto negativos, a depender da métrica adotada (temperatura média mensal ou desvios da média diária). Além disso, estudos indicam que a proximidade entre a temperatura do ar e o ponto de orvalho aumenta o risco de acidentes viários, por favorecer a formação de neblina ou gelo na pista (PULUGURTHA et al., 2019; LEE, 2017). Por fim, a variável de umidade relativa do ar não é tão explorada por não representar uma relação tão direta e difícil de quantificar (HERMANS et al., 2006; THEOFILATOS E YANNIS, 2014).

A relação entre variáveis climáticas e índices de acidentes no Brasil ainda é pouco explorada, em parte pela escassez e baixa qualidade dos dados disponíveis. Fernandes (2014) identificou associação linear positiva entre variáveis climáticas e acidentes em Botucatu-SP, embora tenha utilizado apenas correlações lineares simples, sem apoio de modelos preditivos mais robustos. Guideli et al. (2021) confirmaram a influência da chuva na frequência de acidentes diários, mas destacaram a limitação do uso de dados agregados de rodovias e estações meteorológicas regionais de forma generalizada, o que compromete a precisão espacial dos resultados. Assim, embora relevantes, os estudos existentes ainda carecem de aprofundamento estatístico e correlação espacial.

Diante desse cenário, este estudo busca aprofundar a compreensão sobre os efeitos das condições climáticas e da visibilidade na frequência semanal de acidentes em trechos rodoviários, por meio de modelos de regressão adequados a dados de contagem. A análise será realizada com base em dados vinculados pontualmente a uma estação meteorológica, visando aprimorar a correlação espacial. A expectativa é que os resultados contribuam com diretrizes de gestão da segurança viária ajudando na definição de contramedidas mais eficazes, especialmente em situações meteorológicas adversas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os dados utilizados no estudo, assim como os métodos estatísticos empregados para a análise, conduzida por meio da linguagem de programação em R. O foco da pesquisa é a rodovia BR-116, mais conhecida como rodovia Régis Bittencourt, uma das principais vias de ligação entre as regiões Sudeste e Sul do Brasil. Essa rodovia conecta as cidades de São Paulo (SP) e Curitiba (PR), desempenhando um papel estratégico no escoamento de cargas e na mobilidade regional.

2.1. Base de dados

A base de dados utilizada na pesquisa é composta pela integração de três fontes distintas: registros de acidentes na rodovia, dados de volume de tráfego da praça de pedágio de Barra do Turvo-SP (fornecidos pela concessionária responsável pelo trecho: Arteris S.A.) e variáveis climáticas obtidas através de dados abertos disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As três fontes foram agregadas em escala semanal para compor uma linha temporal delimitada entre janeiro de 2014 e novembro de 2019, devido às inconsistências nos dados mais antigos e das alterações no padrão de mobilidade provocadas pela pandemia da Covid-19 em 2020. Os registros de acidentes foram diferenciadas entre acidentes com vítimas (fatais ou não) e com danos materiais. O volume de tráfego foi representado pelo volume médio diário semanal (veículos/dia), enquanto as variáveis climáticas foram agregadas por média semanal (umidade, temperatura e ponto de orvalho) e, no caso da precipitação, pelo volume acumulado (mm).

Para reduzir limitações de generalização dos dados meteorológicos e aprimorar a correspondência espacial com os eventos de trânsito, selecionaram-se os acidentes ocorridos em um raio de 12 km da estação meteorológica de Barra do Turvo-SP. Essa escolha baseia-se em Camargo et al. (2005), que demonstraram que distâncias de até 12 km explicam mais de 90% da variabilidade da precipitação no Estado de São Paulo, sendo, portanto, adequadas para regiões tropicais. A estação foi escolhida também pela disponibilidade de dados completos e por sua localização em trecho rodoviário de geometria crítica, com relevo montanhoso, comumente associado a maior risco de acidentes. As medidas descritivas das variáveis da base final estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Medidas descritivas das variáveis utilizadas.

Nome da variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Fonte
Contagem total de acidentes	9,54	6,32	1	44	Arteris
Contagem de acidentes com vítimas	1,56	1,31	0	7	Arteris
Contagem de acidentes com danos materiais	7,99	5,70	0	42	Arteris
Precipitação total (mm)	31,64	33,13	0,2	216	INMET
Temperatura média (ºC)	17,78	3,37	8,16	25,02	INMET
Umidade média (%)	86,85	5,80	61,79	96,29	INMET
Temperatura do ponto de orvalho média (ºC)	15,65	3,19	5,44	21,19	INMET
Volume Diário Médio Semanal (Veículo/dia)	127238	16108,15	23140	180794	Arteris

Além disso, incluiu-se uma variável binária para identificar semanas com feriados festivos (carnaval e festas de fim de ano), com o objetivo de captar de forma mais precisa os efeitos sazonais sobre a frequência de acidentes. Estudos demonstram que esses períodos concentram maior número de ocorrências, reflexo de alterações nas dinâmicas de deslocamento e intensificação das atividades sociais e econômicas (MORENIKEJI et al., 2023). A inclusão da variável busca aprimorar o ajuste estatístico do modelo e sua sensibilidade à detecção de padrões atípicos na série temporal.

2.2. Modelagem estatística

Dada a natureza dos dados, o número semanal de acidentes registrados na rodovia BR-116, foi inicialmente considerado o modelo de regressão de Poisson. No entanto, verificou-se a presença de sobredispersão, ou seja, a variância dos dados era superior à média, violando um dos pressupostos deste modelo. Assim, optou-se por utilizar o modelo de regressão Binomial Negativa, também conhecido como modelo Poisson-gama, uma generalização do modelo de Poisson que permite que a variância exceda a média por meio da introdução de um parâmetro de dispersão.

As variáveis levantadas relacionadas às condições climáticas mencionadas no tópico anterior foram consideradas nos modelos como variáveis explicativas, juntamente com a variável binária referente aos

feriados festivos com intuito de capturar possíveis alterações no comportamento dos motoristas durante estes períodos. Por fim, o volume diário médio (VDM) foi incluído como variável de controle, incorporado ao modelo por meio de uma função "offset". Essa abordagem permite ajustar a contagem de acidentes em função do volume de tráfego, reconhecendo que trechos com maior fluxo veicular estão naturalmente mais expostos à ocorrência de sinistros, possibilitando a modelagem da taxa de acidentes por unidade de exposição.

A modelagem é realizada com a linguagem de programação R, utilizando o ambiente RStudio e a função *glm.nb()* do pacote MASS. O ajuste do modelo é avaliando usando a métrica do Critério de Informação de Akaike (AIC), valores mais baixos de AIC indicam melhor equilíbrio entre qualidade de ajuste e parcimônia, sendo preferido o modelo com o menor valor de AIC entre os comparados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de analisar o efeito das variáveis climáticas sobre a frequência de acidentes, foram ajustados três modelos de regressão, tendo como variáveis resposta o número de acidentes por semana: totais, com danos materiais e com vítimas. As estimativas dos parâmetros do modelo de regressão Binomial Negativa, com os erros padrão entre parênteses e os respectivos p-valores, estão apresentadas na Tabela 2. Foram considerados apenas os coeficientes estatisticamente significativos ao nível de 5% (valor-p < 0,05).

Vale destacar que, na modelagem, observou-se alta correlação entre a temperatura do ar e a do ponto de orvalho, mas ambas foram mantidas na modelagem devido ao caráter complementar de suas interpretações sobre os efeitos climáticos nos acidentes. A temperatura do ar reflete as condições térmicas gerais, enquanto o ponto de orvalho indica a saturação da umidade, associada à formação de neblina e à condensação no pavimento. Modelos de regressão ajustando individualmente cada uma dessas variáveis mostraram que sua inclusão não compromete a significância das demais variáveis (valor-p < 0,05).

Tabela 2: Estimativas, erros padrões (E.P) e p-valores, modelos de regressão Binomial Negativa.

	Modelos					
	1		**2**		**3**	
Variável dependente	Total de acidentes		Acidentes com vítima		Acidentes com danos materiais	
	Estimativas (E.P.)	p-valor	Estimativas (E.P.)	p-valor	Estimativas (E.P.)	p-valor
Intercepto	– 7,141 (0,527)	0,0000	– 9,477 (0,723)	0,0000	– 7,239 (0,559)	0,0000
Precipitação (mm)	0,004 (0,001)	0,0001	–	–	0,004 (0,001)	0,0000
Temperatura (ºC)	– 0,286 (0,048)	0,0000	– 0,216 (0,068)	0,0016	–0,307 (0,051)	0,0000
Umidade (%)	– 0,023 (0,006)	0,0001	– 0,025 (0,008)	0,0038	–0,023 (0,006)	0,0003
Temp. do ponto de orvalho (ºC)	0,294 (0,053)	0,0000	0,266 (0,076)	0,0004	0,308 (0,057)	0,0000
Feriados festivos (0 – Não; 1 – Sim)	0,438 (0,119)	0,0002	–	–	0,512 (0,126)	0,0000

Nota-se que a variável precipitação apresentou coeficiente positivo nos modelos de regressão para as variáveis respostas número total de acidentes por semana e acidentes com danos materiais, estimando-se, em ambos os casos, um aumento médio de aproximadamente 0,4% acidentes ($\exp(0{,}004) = 1{,}004$) por cada milímetro adicional de chuva. Esses achados estão em consonância com a literatura, que aponta o aumento da precipitação como fator de risco, estando relacionado principalmente à redução da aderência do pavimento. Por outra parte, observa-se uma relação negativa entre a temperatura e acidentes registrados na rodovia, consistente entre os diferentes modelos, independentemente da gravidade das ocorrências. O aumento de 1 °C na temperatura média semanal está associado a uma redução entre 19,4% [1-exp(-0,216)] e 26,4% [1-exp(-0,307)] no número esperado de acidentes totais, com vítimas e com danos materiais. Essa relação pode estar vinculada a períodos de maior luminosidade e menor ocorrência de intempéries, condições típicas de épocas mais quentes e que influenciam positivamente a dinâmica do tráfego.

Em contraste, a temperatura do ponto de orvalho exerceu influência positiva sobre o total de acidentes, sugerindo que a presença de umidade concentrada no ar sob temperaturas mais elevadas pode aumentar o risco de sinistros, possivelmente devido à formação de neblina e à consequente redução da visibilidade. Esse impacto é estimado em um aumento aproximado de 36,1% ($\exp(0{,}308) = 1{,}361$) de acidentes com danos materiais para cada aumento de 1 °C na temperatura média do ponto de orvalho.

Os resultados também apontaram uma relação inversa entre a umidade relativa média do ar e a frequência de acidentes. Embora esse achado possa parecer contraditório em relação ao efeito positivo do ponto de orvalho, considerando que ambas as variáveis refletem aspectos da umidade atmosférica, porém, a diferença pode ser explicada por suas naturezas distintas. A umidade relativa é influenciada pela temperatura do ar e pode apresentar valores baixos mesmo em condições com alta quantidade de vapor d'água. Já o ponto de orvalho representa a umidade absoluta, sendo um indicador mais direto da propensão à formação de neblina e condensação, especialmente durante a noite e nas primeiras horas do dia. Esses resultados são coerentes com a literatura, que ressalta a complexidade da influência da umidade relativa sobre a segurança viária e sua limitada exploração em estudos anteriores. Assim, os achados reforçam a importância de considerar múltiplas dimensões das variáveis meteorológicas na modelagem de acidentes.

Por fim, observa-se que o número total de acidentes registrados semanalmente na rodovia aumenta, em média, 54,96% [exp(0,438) = 1,5496] na presença de feriados, sugerindo que o comportamento dos motoristas pode ser influenciado por comemorações ou mudanças na rotina associadas a essas datas.

O número semanal de acidentes e os valores previstos pelos modelos de regressão Binomial Negativa são apresentados na Figura 1, evidenciando o bom desempenho dos modelos, cujas previsões acompanham de forma consistente o comportamento observado dos acidentes ao longo do tempo. Nota-se a presença de um padrão sazonal anual, indicando recorrência na ocorrência de acidentes ao longo dos anos. Esse comportamento sugere a influência de fatores temporais, como as estações do ano, condições climáticas e/ou ciclos operacionais, os quais devem ser considerados na modelagem estatística.

Quanto ao ajuste dos modelos, os valores de AIC foram 1.757,8, 929,08 e 1.683,9, respectivamente. Observa-se que as previsões para os acidentes com vítimas (modelo 2) apresentam menor variabilidade, o que sugere a necessidade de incorporar outras variáveis explicativas além das climáticas – como características do condutor ou da infraestrutura – para melhor compreender os fatores associados a esse tipo de ocorrência, apontando para a necessidade de análises complementares em estudos futuros. Nesse sentido, a desagregação dos dados por tipo de severidade e por categoria de acidente pode permitir uma análise mais detalhada e aderente aos fatores de risco específicos de cada grupo. Por fim, destaca-se a elevada influência das variáveis climáticas na ocorrência de acidentes na rodovia Régis Bittencourt, localizada em uma região caracterizada por clima predominantemente úmido, com formação frequente de neblina, chuvas intensas e variações térmicas. Tais condições, associadas à geometria que inclui trechos de serra com curvas acentuadas e declives, contribuem significativamente para a redução da visibilidade e da aderência do pavimento, elevando o risco de sinistros.

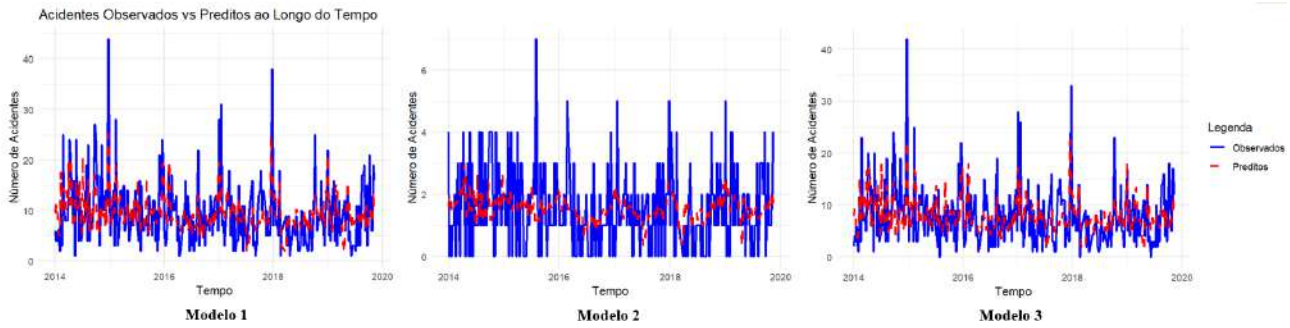


Figura 1: Acidentes observados e previstos usando os modelos de regressão Binomial Negativa no período de estudo.

4. CONCLUSÕES

O objetivo do artigo foi alcançado ao relacionar as condições climáticas e de visibilidade com a frequência semanal de acidentes rodoviários por meio da regressão binomial negativa, resultando em coeficientes estatisticamente significativos e coerentes com a literatura. Constatou-se que as variáveis climáticas influenciam de forma distinta a frequência de acidentes: a precipitação mostrou-se positivamente associada à ocorrência de sinistros, enquanto a temperatura média do ar teve relação inversa. A temperatura do ponto de orvalho apresentou associação positiva, possivelmente ligada à formação de neblina e à redução da visibilidade. Já a umidade relativa mostrou efeito negativo, embora com resultados contraditórios na literatura, dado seu comportamento dependente de outras variáveis.

De maneira geral, a modelagem reforça a importância de considerar múltiplas dimensões das variáveis meteorológicas na análise da segurança viária. O comparativo de desempenho entre os modelos destaca a relevância de se trabalhar com dados desagregados por tipo de severidade, o que permite identificar com maior precisão os fatores climáticos mais associados a acidentes com consequências humanas. O estudo apresenta limitações, como a restrição espacial a um único ponto meteorológico e o uso de dados agregados, o que pode atenuar variações pontuais de curto prazo. Futuros trabalhos podem explorar a inclusão de dados meteorológicos em maior resolução temporal e espacial, bem como avaliar interações com variáveis operacionais da rodovia e características do tráfego, ampliando a capacidade preditiva dos modelos e a aplicabilidade dos resultados em políticas públicas de prevenção, orientando, por exemplo, a adoção de materiais inteligentes ou outras inovações tecnológicas na infraestrutura viária, capazes de mitigar riscos associados às condições climáticas e de visibilidade.

Agradecimentos
Esse trabalho foi feito com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Processo nº 88887.957699/2024-00. O trabalho também contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processos 304448/2023-0 e 407056/2022-0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGEL-HAYAT, Ruth; DEBBARH, Mohammed; ANTONIOU, Constantinos; YANNIS, George. Explaining the road accident risk: Weather effects. Accident Analysis & Prevention, v. 60, p. 456–465, 2013. DOI: 10.1016/j.aap.2013.03.006.

BRIJS, Tom; KARLIS, Dimitris; WETS, Geert. Studying the effect of weather conditions on daily crash counts using a discrete time-series model. Accident Analysis & Prevention, v. 40, n. 3, p. 1180–1190, 2008. DOI: 10.1016/j.aap.2008.01.001.

CAMARGO, Marcelo Bento Paes de; BRUNINI, Orivaldo; PEDRO JUNIOR, Mário José; BARDIN, Ludmila. Variabilidade espacial e temporal de dados termopluviométricos diários da rede de estações agrometeorológicas do Instituto Agronômico (IAC). Bragantia, Campinas, v. 64, n. 3, p. 473–483, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000300017.

FERNANDES, Paola Gabriela. Associação entre acidentes de trânsito e condições climáticas do município de Botucatu. 2014. Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Logística) – Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu, 2014. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/19909. Acesso em: 3 jun. 2025.

GUIDELI, Leandro Canezin; CUENCA, André Lucas dos Reis; SILVA, Milena Arruda; PASSINI, Larissa de Brum. Road crashes and field rainfall data: mathematical modeling for the Brazilian mountainous highway BR-376/PR. Transportes, v. 29, n. 3, p. 1–12, 2021. DOI: 10.14295/transportes.v29i3.2498.

HERMANS, Elke; BRIJS, Tom; OFFERMANS, Col; STIERS, Tim. The impact of weather conditions on road safety investigated on an hourly basis. In: TRB 85th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2006. p. 1–16. Disponível em: http://hdl.handle.net/1942/1365. Acesso em: 3 jun. 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Portal do INMET. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/. Acesso em: 3 jun. 2025.

LEE, Sang Jun. 결빙구간의 교통사고 심각도 영향 요인 연구 [A study on factors that influence traffic accident severity in road surface freezing]. Journal of the Korean Society of Safety, Seoul, v. 32, n. 6, p. 150-156, Dec. 2017. DOI: https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.6.150.

MORENIKEJI, W.; MUSA, H. D.; MICHAEL, E.; MEDAYESE, S. Are Holidays or Festive Periods to Blame for Seasonal Spikes in Road Traffic Accidents in Nigeria? Ethiopian Journal of Environmental Studies & Management, v. 14, n. 2, p. 114–121, 2023. Disponível em: https://dx.doi.org/10.4314/etsj.v14i2.15.

PULUGURTHA, S. S.; MANE, A. S.; DUDDU, V. R.; GODFREY, C. M. Investigating the influence of contributing factors and predicting visibility at road link-level. *Heliyon*, [S.l.], v. 5, e02105, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02105.

THEOFILATOS, Athanasios; YANNIS, George. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. Accident Analysis & Prevention, v. 72, p. 244–256, 2014. DOI: 10.1016/j.aap.2014.06.017.

Fernando Lima de Carvalho (fernandolima19@usp.br)*; Ana Paula Camargo Larocca* (larocca.ana@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, São Carlos-SP.
Orlando Yesid Esparza Albarracin (orlando.albarracin@mackenzie.br)
Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 930, Consolação, São Paulo-SP.

INFLUÊNCIA DO AMBIENTE URBANO SOBRE VELOCIDADES INSEGURAS: ANÁLISE ESPACIAL COM DADOS NATURALÍSTICOS DE DIREÇÃO E INDEXAÇÃO H3

Jefferson Artigas Guerra[1], **Jorge Tiago Bastos**[1]
[1]Universidade Federal do Paraná

RESUMO
A velocidade é um fator de risco, impactando a probabilidade de sinistros e a severidade das lesões, especialmente em áreas urbanas onde a interação entre usuários é maior. Contudo, a compreensão sobre como o ambiente urbano influencia esse comportamento permanece fragmentada. Este artigo tem o objetivo de analisar a influência do ambiente urbano adjacente sobre as velocidades praticadas nas vias arteriais de Curitiba. Para isso, utiliza dados do Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro espacializados em uma grade hexagonal (H3). Foram desenvolvidos modelos de Regressão Linear Robusta para estimar a velocidade média e de Regressão Logística penalizada para estimar a chance de praticar velocidade insegura. Os resultados indicaram que embora a velocidade média tenha sido menor em áreas de alta densidade habitacional, a probabilidade de praticar uma velocidade insegura foi maior nesses locais, evidenciando que os próprios limites de velocidade regulamentares induzem os condutores à prática de velocidade inseguras nesses locais.

1. INTRODUÇÃO

A segurança viária é um desafio em áreas urbanas. A velocidade tem papel central como fator de risco, com impacto na probabilidade e severidade dos sinistros (Aarts e van Schagen, 2006). A abordagem do Visão Zero propõe que o erro humano é inevitável, destacando a responsabilidade do desenho viário na moderação de velocidades e proteção aos usuários (OMS, 2021). Nesse contexto, o ambiente urbano, composto pelo uso do solo e infraestrutura, atua como fator determinante que influencia o comportamento do condutor (Ewing e Dumbaugh, 2009). As vias arteriais são destacadas como elementos críticos na discussão sobre segurança viária. Projetadas para suportar velocidades operacionais mais altas, essas vias apresentam uma mistura de fluxo motorizado em alta velocidade e usuários vulneráveis locais, elevando o potencial de conflito.

Em Porto Alegre, foi observado que áreas com maior proporção de vias arteriais estavam associadas a uma maior incidência de sinistros com vítimas (Obelheiro, 2024). Contudo, a relação entre as características das vias arteriais e o comportamento de velocidade apresenta nuances. Em Curitiba, por exemplo, Santos (2022) identificou correlação inversa entre a presença dessas vias e o excesso de velocidade. Essa observação é reforçada por Monteiro e Bastos (2024) , que, ao analisarem as vias de trânsito rápido da cidade, confirmaram que a presença de fiscalização eletrônica é um fator relevante para o desencorajamento do excesso de velocidade. A análise conjunta desses estudos sugere que a infraestrutura de gestão de velocidades em Curitiba pode estar restringindo o comportamento de risco em suas vias de maior capacidade. Diretrizes internacionais defendem que a definição de limites de velocidade deve ser sensível ao contexto urbano, não apenas à função da via para o tráfego motorizado (NACTO, 2020).

A investigação dessa relação complexa demanda uma metodologia que capture a dinâmica da condução em seu contexto real, superando as limitações de métodos como simuladores ou questionários. Os estudos naturalísticos de direção atendem a essa necessidade, ao registrarem dados por meio de sensores e câmeras instalados nos veículos dos participantes durante suas viagens rotineiras, sem a interferência de um pesquisador. No Brasil, o Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro (NDS-BR) tem possibilitado investigações sobre a influência do ambiente urbano na velocidade, como os trabalhos de Santos (2022), Monteiro e Bastos (2024), Szeliga *et al*. (2022) e Amancio *et al*. (2024). Apoiando-se nesta mesma base de dados, este artigo tem o objetivo de analisar a influência do ambiente urbano adjacente sobre as velocidades praticadas nas vias arteriais de Curitiba.

2. MÉTODO

A pesquisa foi realizada em Curitiba (PR), com dados do Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro (NDS-BR) (Bastos *et al*., 2023), que monitorou 57 motoristas em 556 horas de condução e 11,8 mil quilômetros percorridos. O território analisado foi dividido, conforme apresentado na Figura 1, em unidades espaciais com o uso da malha hexagonal H3 (resolução 11), como forma de amenizar o Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP) (Javanmard *et al*., 2023). A análise concentrou-se nas vias classificadas como arteriais, conforme o Código de Trânsito Brasileiro.

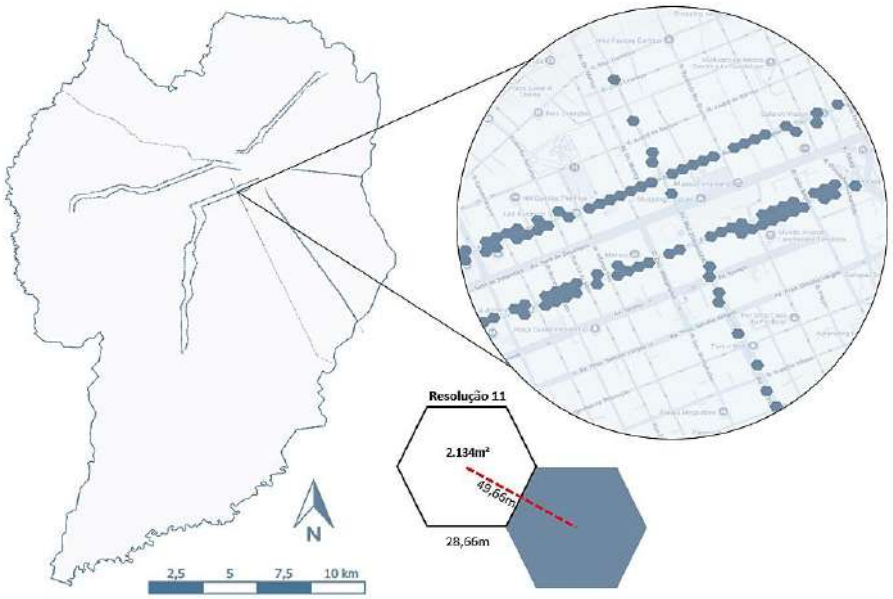


Figura 1: Área de estudo, com a distribuição da amostra de hexágonos (H3) sobre as vias arteriais e as dimensões da unidade de análise (Resolução 11)

As variáveis explicativas foram organizadas em dois grupos: (i) infraestrutura e operação viária, representada pela presença de radares, semáforos e interseções; e (ii) uso e ocupação do solo, representado por duas variáveis: densidade habitacional e número de alvarás comerciais (Tabela 1). A densidade habitacional foi classificada em três faixas, com base nos parâmetros do Plano Diretor de Curitiba (IPPUC, 2015): baixa densidade (menos de 80 habitações por hectare), média (entre 80 e 200 hab/ha) e alta (acima de 200 hab/ha).

Tabela 1: Variáveis explicativas utilizadas na modelagem

Grupo temático	Variável	Tipo	Fonte	Critério de Espacialização	Classificação da Variável
Infraestrutura Viária	Radar	Pontual	Site Prefeitura (2024)	Contagem de presença em buffer de 100 m	Binária (sim/não)
	Semáforo		Base oficial da Prefeitura		
	Interseção		Malha viária oficial	Contagem de presença em buffer de 25 m	
Uso e Ocupação do Solo	Alvará Comercial	Agregado	Cadastro municipal de licenciamento	Contagem por hexágono	Contínua (padronizada por z-score)
	Densidade Habitacional		Censo Demográfico IBGE (2023)	Média de habitações por hectare em cada hexágono	Categórica (Baixa/Média/Alta)

Foram utilizadas duas variáveis dependentes, ambas observadas em condição de tráfego não condicionado (Richard et al., 2013): (i) a velocidade média praticada (contínua); e (ii) a prática de velocidade insegura (binária). A definição desta última baseia-se na metodologia do guia City Limits (NACTO, 2020), que estabelece limites seguros conforme o risco contextual da via, em alinhamento ao paradigma dos Sistemas Seguros. O guia emprega uma matriz de risco que avalia o "nível de atividade" e a "densidade de conflitos", para os quais este estudo utilizou a densidade habitacional como variável *proxy*. Para as vias arteriais, foram adotados os limites de 40 km/h para alta densidade, 60 km/h para baixa densidade e 50 km/h para média densidade, valores que aplicam as recomendações do guia para *Major Streets* em diferentes contextos de atividade e risco.

Tabela 2: Variáveis dependentes utilizadas na modelagem

Grupo	Classificação da Variável	Unidade	Critérios	Fonte
Velocidade Média	Contínua	km/h	Velocidade média em condição de tráfego não condicionado	NDS-BR
Velocidade Insegura	Binária	Sim / Não	Definida por matriz de risco contextual (Hierarquia da Via + Densidade)	

A definição da modelagem a ser empregada deu-se a partir de testes de diagnóstico. A regressão linear clássica foi descartada por violação dos pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (teste de Breusch-Pagan). A autocorrelação espacial identificada (Índice de Moran) foi interpretada como decorrente da sequência das trajetórias, e não de uma estrutura espacial fixa. Por isso, o uso de modelos espaciais foi considerado inadequado. Adotou-se a Regressão Linear Robusta (RLM) para modelar a velocidade média, e a Regressão Logística (Logit) para a prática da velocidade insegura (Tabela 3). Na RLM, as variáveis explicativas categóricas passaram por um processo de *dummização*.

Tabela 3: Síntese dos modelos adotados na pesquisa

Variável Dependente	Modelo Adotado	Justificativa Metodológica
Velocidade média (contínua)	Regressão Linear Robusta (RLM – Huber + HC1)	Robustez frente à heterocedasticidade e não normalidade dos resíduos
Velocidade insegura (binária)	GLM Logit com penalização L1 (Lasso)	Seleção automática de variáveis para um modelo parcimonioso e estável

3. RESULTADOS

A amostra analisou 2.018 hexágonos em vias arteriais, dos quais 334 (16,5%) apresentaram velocidade superior ao limite seguro, definido pela matriz de risco contextual. A Tabela 4 e a Figura 2 apresentam os indicadores de velocidade por classe de densidade, onde se observa que a velocidade média diminui com o aumento da densidade, enquanto a ocorrência de velocidade insegura aumenta, alcançando 100% nos segmentos de alta densidade.

Tabela 4: Indicadores de velocidade e segurança por classe de densidade

Classe de Densidade	Quantidade de hexágonos	Velocidade Segura (km/h)	Velocidade Média Praticada (km/h)	Proporção de Hexágonos com a Prática de Velocidade Insegura
Baixa	1685	60	51,8	13,60%
Média	285	50	47,8	20,00%
Alta	48	40	47,7	100%

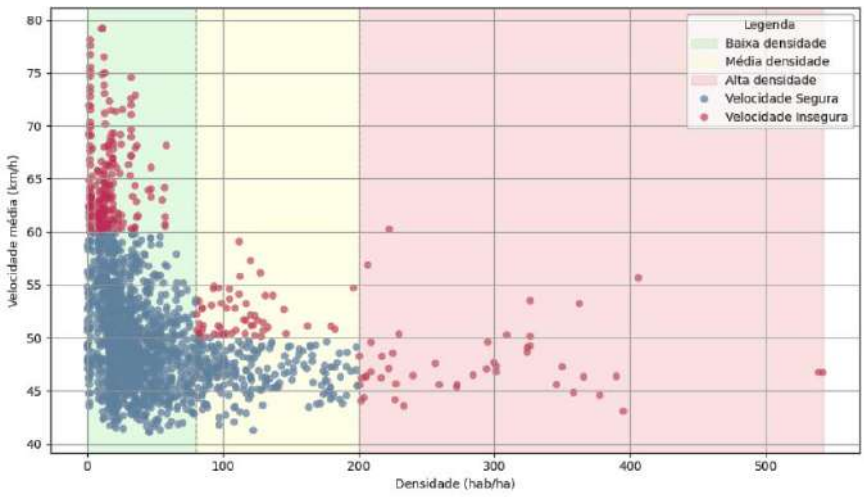


Figura 2: Relação entre densidade habitacional, velocidade média e classificação de risco

A análise do modelo RLM (Tabela 5) indica que os maiores efeitos redutores na velocidade média foram observados na presença de sinalização semafórica e sua combinação com medidores de velocidade fixos. Fatores como a presença isolada de medidores, o aumento da densidade comercial e o aumento da densidade habitacional também se associaram a reduções estatisticamente significativas.

Tabela 5: Coeficientes estimados nos modelos de regressão para vias arteriais

Modelo	Intercepto	Densidade Média[1]	Densidade Alta[1]	Radares	Interseção	Semáforos	Radar + Semáforo	Alvará
RLM	54,29*	-2,11*	-1,95*	-1,43*	-0,15 (ns)	-5,01*	-5,16*	-0,46*

Legenda: (*) p < 0,05; (ns) não significativo. RLM: efeito na velocidade média (km/h).
[1]Categoria de referência: Densidade Habitacional (Baixa)

No modelo GLM (Tabela 6), os mesmos elementos de controle atuaram como fatores de proteção, reduzindo a chance do comportamento de risco. O efeito mais expressivo, contudo, foi o da densidade habitacional, que em comparação com a baixa densidade, a chance de praticar velocidade insegura foi 121% maior em áreas de densidade média (OR = 2,21) e mais de 1.600 vezes superior em áreas de alta densidade (OR = 1623,3).

Tabela 6: Coeficientes estimados nos modelos de regressão para vias arteriais

Modelo	Intercepto	Densidade Média[1]	Densidade Alta[1]	Radares	Interseção	Semáforos	Radar + Semáforo	Alvará
GLM	0,36*	2,21*	1623,3*	0,59*	0,72*	0,30*	0,32*	0,71*

Legenda: (*) p < 0,05; (ns) não significativo. GLM: Odds Ratio para velocidade insegura.
[1]Categoria de referência: Densidade Habitacional (Baixa)

A análise conjunta (Figura 3) dos modelos confirma que, enquanto os dispositivos de operação viária e a atividade comercial se associam de forma consistente à redução da velocidade e do risco, a densidade habitacional apresenta efeitos contrastantes. A redução da velocidade média observada em ambientes mais densos mostra-se insuficiente para o contexto, resultando em um aumento expressivo da chance de a velocidade ser classificada como insegura.

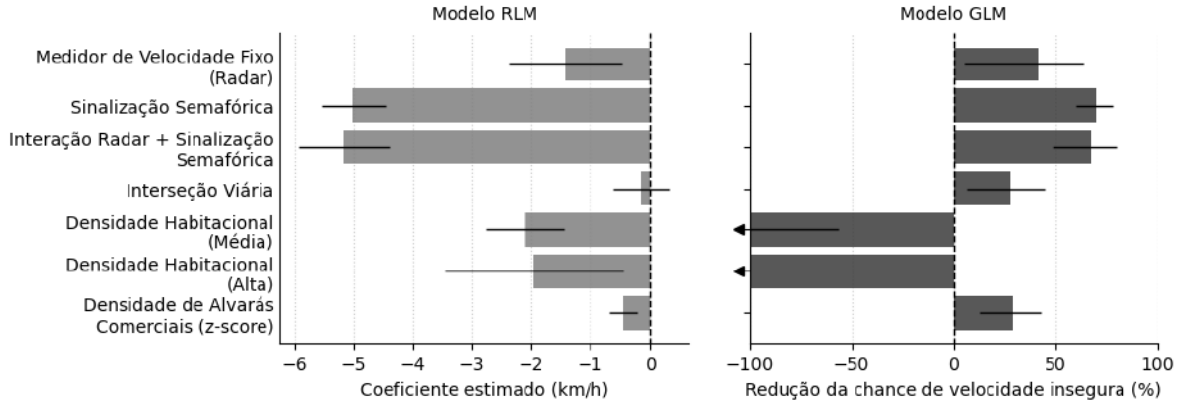


Figura 3: Efeitos estimados nos modelos RLM (velocidade média) e GLM (velocidade insegura)

4. CONCLUSÃO

Os resultados mostram que fatores de infraestrutura e operação viária, como a presença de sinalização semafórica e medidores de velocidade, estão associados à redução da velocidade média e da chance de velocidade insegura. A atividade comercial também foi associada a velocidades mais moderadas. No que diz respeito à densidade habitacional, embora a velocidade média diminua em áreas mais densas, a chance de a velocidade ser inadequada ao contexto aumenta. A análise conjunta dos dois modelos revela que a velocidade escolhida pelos condutores em resposta à complexidade do ambiente urbano não acompanha o risco real. Esse "paradoxo da densidade" reforça a interpretação de Obelheiro (2024), que observou maior ocorrência de sinistros com vítimas em áreas com mais vias arteriais, sendo a inadequação da velocidade ao contexto um dos possíveis fatores que explicam esse padrão. O estudo também dialoga com trabalhos anteriores no tocante à relação entre infraestrutura de controle e redução do excesso de velocidade observada por Santos (2022) e aos achados de Monteiro e Bastos (2024), que indicaram a fiscalização eletrônica como um fator determinante para desencorajar o excesso de velocidade. O estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados, como o descompasso temporal entre as bases de dados, o tamanho da amostra de condutores, a fixação de uma única resolução espacial (MAUP) e um conjunto não exaustivo de variáveis do ambiente construído. A metodologia adotada, ciente dessas limitações, foi desenhada para mitigar vieses inerentes à análise, como o controle do erro amostral e a padronização da unidade espacial para atenuar o MAUP. Ao empregar uma malha espacial de menor dimensão, a análise complementa abordagens anteriores ao distinguir situações em que a velocidade praticada, mesmo dentro do limite regulamentar, permanece incompatível com o uso real da via. Conclui-se que os próprios limites de velocidade podem induzir os condutores à prática de velocidades inseguras em áreas de alta densidade habitacional. Para que a velocidade segura seja um comportamento induzido pelo ambiente, para além da necessidade de revisão dos limites, é preciso compatibilizar o desenho das vias com seu uso real a partir de estratégias de moderação de tráfego.

Pesquisas futuras podem aprimorar e expandir os achados, superando as limitações apontadas e testando a generalização do método para outras cidades e contextos.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à universidade Federal do Paraná e ao Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarts, L.; I. van Schagen (2006) Driving speed and the risk of road crashes: a review. *Accident Analysis & Prevention*, v. 38, n. 2, p. 215-224. DOI: 10.1016/j.aap.2005.07.004.

Amancio, E. C.; T. M. C. Gadda; J. N. Corrêa, G. D. C. Bonetti; O. Oviedo-Trespalacios e J. T. Bastos (2024). Impact of Speed Limit Enforcement Cameras on Speed Behavior: Naturalistic Evidence from Brazil. Transportation Research Record, 2678(9), 807-822. DOI: 10.1177/03611981241230548

Bastos, J. T.; M. A. P. Bernardinis; D. F. Neris; A. Schmitz; T. M. C. Gadda; E. C. Amancio e P. A. B. Santos (2023) O Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro (NDS-BR): da concepção aos primeiros resultados. *Anais do XXXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Disponível em: https://proceedings.science/proceedings/100405/_papers/174585?lang=pt-br (acesso em 09/07/2025).

Brasil (1997) *Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997*. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm (acesso em 09/07/2025).

Ewing, R.; E. Dumbaugh (2009) The Built Environment and Traffic Safety: A Review of the Empirical Evidence. *Journal of Planning Literature*, v. 23, n. 4, p. 347–367. DOI: 10.1177/0885412209335553.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2023) *Censo Demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html (acesso em 09/07/2025).

Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) (2015) *Mapa de Bairros de Curitiba: Anexo II da Lei Nº 14.771, de 17 de dezembro de 2015*. Curitiba: IPPUC.

Javanmard, R.; J. Lee; J. Kim; L. Liu e E. Diab (2023) The impacts of the modifiable areal unit problem (MAUP) on social equity analysis of public transit reliability. *Journal of Transport Geography*, v. 106. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103500.

Monteiro, A. S.; J. T. Bastos (2024). Análise da prática do excesso de velocidade em vias de trânsito rápido a partir de dados naturalísticos de direção. *Transportes*, v. 32, n. 1, e2910. DOI: 10.58922/transportes.v32i1.2910.

National Association of City Transportation Officials (NACTO) (2020) *City Limits: Setting Safe Speed Limits on Urban Streets*. New York, NY: NACTO. Disponível em: https://nacto.org/publication/city-limits/ (acesso em 09/07/2025).

Obelheiro, M. R. (2024) *Modelagem da Segurança Viária em Ambientes Urbanos: Uma Abordagem Espacial*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Richard, C. M.; S. G. Klauer; D. J. Le; T. A. Dingus e G. M. Fitch (2013) Investigating Speeding Behavior with Naturalistic Approaches: Methodological Lessons Learned. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2365, p. 58-65. DOI: 10.3141/2365-08.

Santos, P. A. B. dos (2022) *The impact of built environment on speeding behavior in Curitiba - Brazil*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: https://hdl.handle.net/1884/78426 (acesso em 09/07/2025).

Szeliga, R. A.; B. H. S. Chaves; D. T. Nava e J. T. Bastos (2022). Velocidade veicular praticada em interseções urbanas: análise baseada em dados naturalísticos. Anais do XIV Seminário Internacional de Investigação em Urbanismo. DOI: 10.5821/siiu.12175.

Jefferson Artigas Guerra (jeffersonguerra@ufpr.br)
Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano (PPU), Setor de Tecnologia, Av. Coronel Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil.
Jorge Tiago Bastos (jtbastos@ufpr.br)
Universidade Federal do Paraná, Departamento de Transportes (DTT), Setor de Tecnologia, Av. Coronel Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil.

INTERVENÇÕES EM INTERSEÇÕES DE VIA COLETORA COM CANTEIRO CENTRAL NA CIDADE DE MARINGÁ-PR

Luiz Gustavo Begali[1, 2], Tathyane Câmara de Souza Amorim[1], Luana Izumi Shingo[1, 2], Giordanno Pietro Altoé Marcantonio[1], Thiago Botion Neri[2]
[1]Prefeitura do Município de Maringá, [2]Universidade Estadual de Maringá

RESUMO
O presente trabalho propõe solução para conflitos de tráfego em um trecho urbano de uma via coletora do município de Maringá/PR, caracterizado pelo alto volume veicular nos horários de pico e elevado número de acidentes. A partir de contagens de tráfego classificadas e direcionais em três interseções críticas, identificaram-se pontos de conflito causados principalmente por conversões à esquerda e movimentos de retorno em canteiros centrais estreitos. Com base nesses dados, foram propostas intervenções como a implantação de sentido único em vias de acesso, proibição de retornos em determinados pontos e reorganização do tráfego por meio de sinalização horizontal. A modelagem de tráfego, realizada com o *software PTV Vistro*, demonstrou melhoria dos níveis de serviço em um cenário pós-intervenção, indicando maior segurança e fluidez do trânsito local, contribuindo para um planejamento urbano eficiente e seguro.

1. INTRODUÇÃO

A segurança viária é essencial para o bom funcionamento do sistema de transporte, sendo um dos maiores desafios da Engenharia de Tráfego. Segundo o Manual de Segurança Viária (DER-SP, 2023), compete à engenharia o planejamento, a construção, o gerenciamento e a manutenção do sistema viário, a fim de garantir o deslocamento de forma segura, fluida, confortável e acessível. Por isso, um planejamento urbano eficaz é crucial para o atendimento destas necessidades, reduzindo o índice de acidentes e proporcionando um deslocamento ágil e eficiente.

De acordo com dados do Registro Nacional de Sinistros e Estatísticas de Trânsito (Denatran, 2025), o Brasil apresenta uma taxa de motorização de cerca de 405 veículos ativos em circulação a cada 1000 habitantes, e uma taxa de 130,31 acidentes para cada 10 mil veículos no ano de 2024. Já para o município de Maringá, onde localiza-se a área de estudo, essa taxa de motorização é próxima de 628 veículos ativos para cada 1000 habitantes, com uma taxa de 264,89 acidentes para cada 10 mil veículos no mesmo período. Essa alta densidade veicular em circulação exige maior atenção às condições de tráfego e elaboração de projetos que visam a redução do número de acidentes nas vias urbanas.

A área de estudo consiste em um trecho de uma via coletora de Maringá, a Avenida das Indústrias. De acordo com dados do Corpo de Bombeiros Militar do Paraná (2025), no ano de 2024 foram registrados 10 acidentes de trânsito no local, que consistiram, em sua maioria, em colisões entre automóveis, ou entre automóveis e motocicletas. Além disso, por meio de observação local provocada por um polo gerador de viagens existente na esquina da avenida com a rua Zygmunt Krosnowski, onde estão implantadas as secretarias de Infraestrutura (SEINFRA) e de Limpeza Urbana (SELURB) do município de Maringá, detectou-se a presença de muitos pontos de conflito e situações de "quase-acidente" que motivaram o presente estudo e a solução proposta.

Estes pontos de conflito existem, principalmente, por conta da grande quantidade de cruzamentos em "T", nos quais é permitida a conversão à esquerda, além de cinco aberturas para conversões em "U" em meio ao canteiro central da via. As conversões à esquerda permitidas no trecho analisado são caracterizadas por Silva (2022) como a pior situação possível, visto que não existe uma faixa exclusiva para os veículos que farão esta manobra, forçando a redução de velocidade na faixa de tráfego e impactando também no trajeto dos veículos subsequentes, além da existência do tráfego no sentido oposto, gerando alto risco de acidentes por colisão lateral. O Plano de Mobilidade Urbana do município de Maringá (PlanMob, 2022) cita que, por conta do alto volume de tráfego, uma das situações que geram conflito e demandam grande atenção é a de movimentos de conversão à esquerda permitidas em vias de sentido duplo, apresentando como válida a restrição deste tipo de manobra em diversos cruzamentos da cidade.

De acordo com o estudo realizado por Kamili *et al.* (2025), a funcionalidade dos retornos está diretamente associada a diversos fatores, como o comprimento e a posição da abertura, da composição do tráfego e a velocidade do contrafluxo. Ainda, segundo a AASHTO (2018), esse tipo de movimento nas aberturas do

canteiro central pode ser permitido em locais com baixo a médio número de conversões, mas deve oferecer segurança ao veículo que realizará a manobra, além de boas condições de visibilidade do tráfego no outro sentido, devendo ser implantada uma faixa adicional para a realização da conversão, ou, em casos onde não há condições geométricas favoráveis, os veículos podem realizar esta conversão a partir da faixa normal de tráfego, desde que o canteiro tenha uma largura mínima, que varia de acordo com o comprimento do veículo de projeto. Para os locais analisados, não existe espaço suficiente para a implantação de uma faixa exclusiva de retorno no canteiro central, que possui largura de 1,50 metros. Para um veículo de projeto padrão, de 5,7 m de comprimento, a AASHTO recomenda que esta largura seja de, no mínimo, 5 metros.

Visto isso, o objetivo da realização desta intervenção é a mitigação dos conflitos de tráfego existentes na Avenida das Indústrias, no município de Maringá, Paraná, nas interseções e aberturas no canteiro central presentes no trecho de 650 metros entre a rua Joaquim de Castro Lopes e a Avenida Ambrósio Bulla, de forma a reduzir o risco de acidentes no local e oferecer maior segurança ao usuário na realização de manobras de conversão.

2. METODOLOGIA

Inicialmente, faz-se necessário entender os motivos que levaram à análise da área de estudo definida. Como citado anteriormente, foram recebidas reclamações sobre o tráfego no trecho, geradas pelas sedes das secretarias municipais (SEINFRA e SELURB), que se enquadram como polos geradores, por conta do volume de entrada e saída de veículos leves e pesados. Também, nos últimos seis anos, houve a intensificação do tráfego por conta da construção de quatro condomínios habitacionais, havendo a implantação de grande adensamento populacional na Avenida das Indústrias, além da existência de um projeto para implantação de outro condomínio em uma das vias locais que chegam na avenida. Além disso, a via também fornece acesso a Sarandi, município conurbado a Maringá, de onde provém boa parte do tráfego de veículos, tanto individuais quanto de transporte coletivo metropolitano.

A partir disso, para melhor entendimento das manobras realizadas, houve a necessidade de contagens de tráfego que contabilizassem o fluxo de forma classificada e direcional, para a identificação da frequência de cada tipo de manobra nas interseções, a fim de possibilitar o desenvolvimento de projetos que atendam a necessidade e reduzam o risco de acidentes em locais mais críticos. As Figuras 1 e 2 apresentam o detalhamento, realizado no *software QGIS Desktop*, na versão 3.40.5 (Bratislava), de cada movimento realizado, sendo as interseções representadas por letras, enquanto os números representam suas respectivas aproximações.

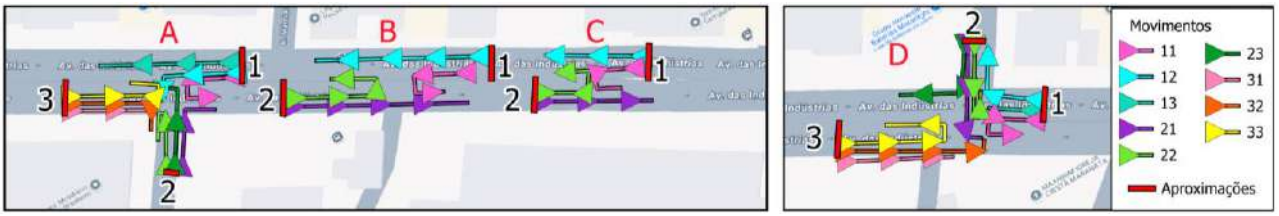


Figura 1: Interseções entre as ruas Joaquim de Castro Lopes e Procópio Ferreira (A a D).

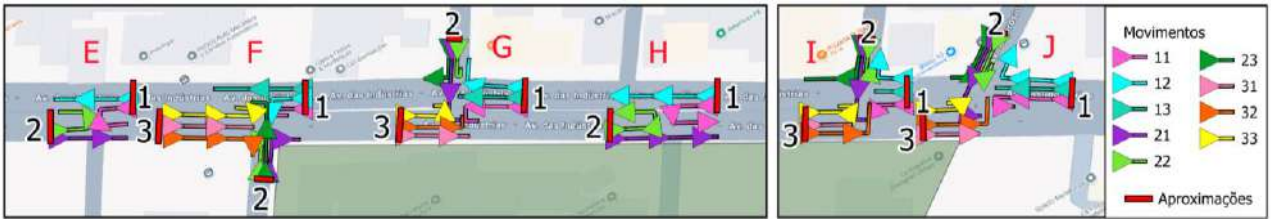


Figura 2: Interseções entre a R. Procópio Ferreira e a Av. Ambrósio Bulla (E a J).

A escolha dos locais de contagem foi feita considerando os pontos onde se sabe que há maior número de conversões e se concentram as reclamações. Assim, optou-se pela sua realização nas interseções em "T" entre a Avenida das Indústrias e a Rua Joaquim de Castro Lopes (A), Rua Zygmunt Krosnowski (F) e Avenida Ambrósio Bulla (J). Ademais, as contagens de tráfego foram realizadas em campo de forma manual, realizando

a diferenciação entre motos, automóveis e veículos pesados que realizam cada uma das conversões, sendo realizadas uma vez durante o período da manhã e outra no período da tarde, em intervalos de 15 minutos, possibilitando melhor entendimento do fluxo veicular local em cada horário. A compreensão da frequência de cada movimento e dos tipos de veículos que os realizam tornou possível a elaboração de projetos que visam o aumento da segurança viária na região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como citado no item anterior, as contagens foram realizadas em três interseções que possuem maior número de conversões, classificando-se o fluxo veicular em função do tipo de veículo (carros, motos e veículos pesados). Por fatores externos, não foi possível a realização das contagens durante os horários de pico, sendo necessário que estas ocorressem no período das 8h45 às 10h45 e das 14h às 16h.

De posse destes valores, utilizou-se os fatores de equivalência apresentados na Tabela 1 para conversão destes números em unidades de carro de passeio (UCP), retirados do Plano de Mobilidade Urbana do município de Maringá (PlanMob, 2022).

Tabela 1: Fatores de equivalência em unidades de carro de passeio (UCP).

Veículo	Carro	Motocicleta	Caminhão	Ônibus
Fator de equivalência	1,00	0,35	2,00	2,25

As análises foram realizadas de acordo com a metodologia disposta no *Highway Capacity Manual* (HCM), que unifica as categorias de caminhão e ônibus. Por isso, utilizou-se o fator de equivalência para veículos pesados igual a 2. Realizando a conversão dos dados para UCP, foi possível a determinação da hora de pico para o período analisado, além do seu respectivo volume horário para cada movimento, como apresentam as Tabelas 2, 3 e 4. Os movimentos não realizados no período de contagem não foram apresentados.

Tabela 2: Resumo por movimento e hora de pico referente ao tempo de contagem na interseção A.

Hora de Pico – Manhã	**09:00**	**10:00**						
Movimento	3-1	3-2	1-2	1-1	1-3	2-3	2-1	**TOTAL**
Volume Horário - Pico da Manhã	217	44	48	11	177	15	20	**532**
Hora de Pico – Tarde	**14:15**	**15:15**						
Movimento	3-1	3-2	1-2	1-1	1-3	2-3	2-1	**TOTAL**
Volume Horário - Pico da Tarde	226	56	45	6	157	9	14	**513**

Tabela 3: Resumo por movimento e hora de pico referente ao tempo de contagem na interseção F.

Hora de Pico - Manhã	**09:00**	**10:00**						
Movimento	3-3	3-1	3-2	1-2	1-3	2-3	2-1	**TOTAL**
Volume Horário - Pico da Manhã	2	178	30	111	158	28	64	**571**
Hora de Pico - Tarde	**14:00**	**15:00**						
Movimento	3-3	3-1	3-2	1-2	1-3	2-3	2-1	**TOTAL**
Volume Horário - Pico da Tarde	3	196	55	93	158	24	65	**594**

Tabela 4: Resumo por movimento e hora de pico referente ao tempo de contagem na interseção J.

Hora de Pico - Manhã	**09:00**	**10:00**							
Movimento	1-1	1-3	1-2	3-2	3-3	3-1	2-1	2-3	**TOTAL**
Volume Horário - Pico da Manhã	8	75	3	22	3	129	13	104	**357**
Hora de Pico - Tarde	**14:15**	**15:15**							
Movimento	1-1	1-3	1-2	3-2	3-3	3-1	2-1	2-3	**TOTAL**
Volume Horário - Pico da Tarde	3	73	9	24	6	188	21	139	**463**

A partir desta análise, foram definidas algumas medidas de projeto que visam a mitigação dos conflitos existentes. Por conta do baixo número de conversões em "U" nessas interseções, optou-se pela proibição da manobra de retorno nos três cruzamentos, deslocando-se estes movimentos para as aberturas entre interseções. Também, para o aumento da segurança em conversões à esquerda, serão implantadas marcações de sinalização horizontal, deslocando o tráfego para a parte mais à direita da via e retirando a permissão para estacionamento

nestes trechos, aumentando o espaço de espera de veículos no canteiro central.

Ademais, devido ao alto volume de conversões nas interseções A e F, uma alternativa encontrada para a redução do número de pontos de conflito é a implantação do sentido único de circulação nas ruas Joaquim de Castro Lopes e Zygmunt Krosnowski, reduzindo a quantidade de movimentos permitidos nas interseções. Já para a interseção J, optou-se pela manutenção do sistema de mão dupla, visto que a Avenida Ambrósio Bulla é uma importante via de acesso aos bairros vizinhos e à cidade de Sarandi, sendo realizada apenas a proibição de retornos e a marcação de sinalização.

Também, por conta do baixo volume de conversões, será realizado o fechamento das interseções E, G e I, eliminando os pontos de conflito existentes, além da redução do comprimento da interseção H, para melhor ordenar o tráfego e reduzir a quantidade de veículos realizando a manobra de retorno ao mesmo tempo na abertura. As medidas citadas encontram-se dispostas no croqui de sinalização, apresentado nas Figuras 3 e 4.



Figura 3: Croqui de sinalização atualizado do trecho entre as ruas Joaquim de Castro Lopes e Procópio Ferreira.

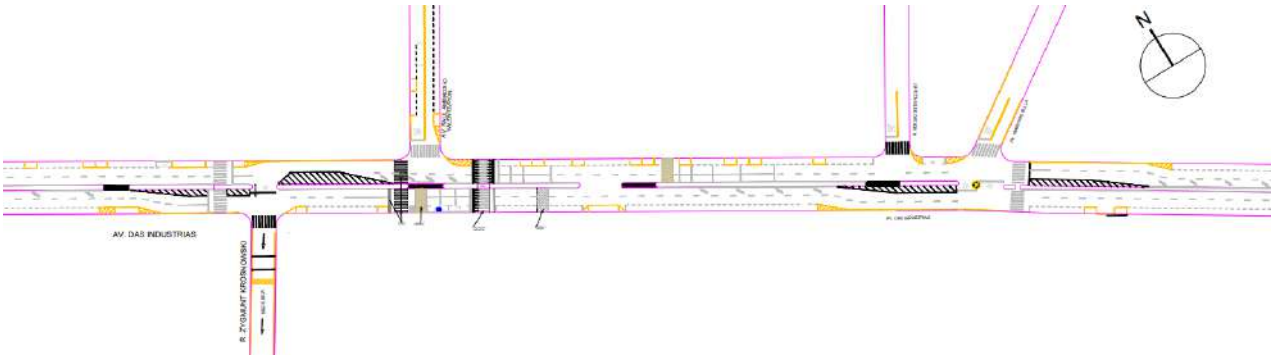


Figura 4: Croqui de sinalização atualizado do trecho entre a Rua Procópio Ferreira e a Av. Ambrósio Bulla.

Foi realizada a modelagem do tráfego nas interseções por meio do *software PTV Vistro*, considerando-se o cenário nas condições atuais e de projeto, com as características do tráfego de veículos contabilizado para a hora de maior fluxo no intervalo da contagem para a hora de maior fluxo no intervalo da contagem da manhã. A Figura 5 apresenta a modelagem realizada para o cenário atual, enquanto a Figura 6 apresenta as condições para o cenário de projeto.



Figura 5: Modelagem do tráfego no trecho, em sua configuração atual.



Figura 6: Modelagem do tráfego no trecho, com as alterações previstas no projeto.

Para o cenário atual, nota-se que a manobra de conversão à esquerda, a partir da Rua Zygmunt Krosnowski para a Avenida das Indústrias, se enquadra como nível de serviço C. Já para o cenário de projeto, com a implantação do sistema de mão única, mesmo com a transferência deste tráfego para a interseção da Rua Joaquim de Castro Lopes, o nível de serviço desta e das outras interseções seguem com os níveis de serviço.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo, permitiu a obtenção de uma possível solução para um conflito em via urbana, baseado em dados empíricos de contagens de tráfego direcionais e classificadas e validados por meio de análises de capacidade e nível de serviço, tendo como objetivo o aumento da segurança viária para os que ali trafegam. Tal metodologia reforça a importância do levantamento de dados e das análises de tráfego para a tomada de decisões por parte do poder público.

A realização das contagens, bem como a modelagem de tráfego realizada confirmaram as problemáticas já deduzidas por meio da observação local. Já a análise realizada a partir do projeto de alteração proposto indicou melhoria geral dos níveis de serviço nas interseções, indicando provável melhoria na segurança durante a realização de movimentos de conversão. Assim, para a continuidade do estudo, é importante a realização de novas pesquisas após a implantação do novo projeto, a fim de verificar sua aplicabilidade e melhorias obtidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2018) A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (7ª ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Corpo de Bombeiros Militar do Paraná (2025) SYSBM Imprensa. Disponível em: https://www.sysbm.bombeiros.pr.gov.br/sysbmnew/menu_imprensa/ (acesso em 24/06/2025).

DER/SP (2023) Manual de Segurança Viária. São Paulo: Departamento de Estradas e Rodagem.

Kamili, S. I.; T. Ameen; H. A. Wani; A. Ahmad (2025) Investigating safety implications of median U-turn (MUT) intersections based on dilemma zone and critical gap analysis. *International Journal of Transportation Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.ijtst.2025.04.006.

Ministério dos Transportes (2025) Registro Nacional de Sinistros e Estatísticas de Trânsito. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/renaest (acesso em 24/06/2025).

PMM; Cidade Viva (2022) PlanMob Maringá - Resumo Executivo. Maringá: Prefeitura Municipal de Maringá.

Silva, W. P. (2022) *Controle de tráfego urbano* (1ª ed.). São José dos Pinhais: Brazilian Journals Editora.

Luiz Gustavo Begali (luizgustavobegali@gmail.com)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Tathyane Câmara de Souza Amorim (tathyane.eng@gmail.com)
Prefeitura do Município de Maringá, Secretaria de Mobilidade Urbana
Avenida Colombo, 3114 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Luana Izumi Shingo (ra118501@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Humanas, Departamento de Geografia
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Giordanno Pietro Altoé Marcantonio (giordanno1995@gmail.com)
Prefeitura do Município de Maringá, Secretaria de Mobilidade Urbana
Avenida Colombo, 3114 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Thiago Botion Neri (tbneri2@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil

MODELO DE PREVISÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL PARA RODOVIAS DE PISTA SIMPLES A PARTIR DA CURVACIDADE ANTERIOR E POSTERIOR

Thaís Machado Garay[1], Daniel Sergio Presta García[1], César Luís Andriola[2], Fernando Fraga de Freitas dos Santos[3]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Universidade de Wisconsin-Madison, [3]MXFC Engenharia Ltda.

RESUMO
O presente trabalho trata da elaboração e validação de um modelo de estimativa da velocidade operacional (V85) em função da curvacidade anterior e da curvacidade posterior para a rodovia de pista simples ERS-122. O estudo foi realizado com dados de voluntários previamente coletados e foi feita uma análise de superfície de resposta a partir dos resultados obtidos por modelos de regressão linear múltipla com duas variáveis independentes. O modelo proposto revelou ser estatisticamente válido e ter bom desempenho (R^2=0,8476) apenas para um subtrecho específico com 1,5 km de extensão, em local onde são verificadas as menores velocidades.

1. INTRODUÇÃO

A velocidade operacional é utilizada para avaliar a percepção dos usuários dos veículos quanto as condições de projeto de uma via, sendo possível analisar a consistência geométrica e definir limites de velocidades, aprimorando a segurança viária. IPEA (2008) aponta o comportamento inadequado por parte dos usuários como principal fator de acidentes, sendo a velocidade incompatível com as condições da via como fator comportamental para incidentes em curvas, que, segundo o artigo, apresenta características geométricas desfavoráveis, fora de norma e passíveis de correção.

A modelagem dos parâmetros de comportamento do motorista em curvas horizontais tem se concentrado principalmente na estimativa da V_{85} (valor do percentil 85 para a velocidade) (DHAHIR; HASSAN, 2019). Segundo LESCANO *et al.*, os modelos de predição da velocidade, a partir das características geométricas da via, vem sendo estudados desde o século passado, com destaque para os que utilizam a curvacidade como variável independente. Além disso, GARCÍA (2008), destaca que modelos de previsão da velocidade atingida pela maioria dos condutores na via podem ser considerados como o melhor indicativo de comportamento quando se trata de três elementos: condutor, veículo e rodovia.

Este trabalho tem como objetivo principal a concepção e validação de um modelo de predição da Velocidade Operacional (V_{85}) de veículos de passeio sobre o trecho de pista simples da Rodovia ERS-122, a partir de parâmetros geométricos de curvacidade da rodovia. Como objetivo secundário, busca-se: (i) avaliar e selecionar dados obtidos previamente por ANDRIOLA (2021) do experimento na modalidade real para a geração dos modelos e (ii) avaliar o perfil de velocidades por estaca.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para o desenvolvimento da equação de previsão da velocidade operacional, é preciso utilizar modelos estatísticos, a fim de estabelecer uma relação matemática e estimar o valor da velocidade a partir de outros parâmetros conhecidos das curvacidades anterior e posterior. De acordo com HOFFMANN (2016), a existência de uma regressão linear múltipla ocorre quando a variável dependente (Y) é função de duas ou mais variáveis explanatórias (X), que neste estudo se referem à Velocidade Operacional (V_{85}) e às curvacidades anterior e posterior, respectivamente.

Outros modelos como de GARCÍA (2002) e de LESCANO et al. (2024) consideram os tamanhos de amostras necessárias conforme BOX E OPPENLANDER (1976). O último autor concebeu um modelo de regressão múltipla com a curvacidade como variável independente, calculada conforme equação 1 (DER/SC, 2000).

$$C_{AB} = \frac{\sum_{i=0}^{B} \delta i - \sum_{i=0}^{A} \delta i}{L_{AB}} \quad (1)$$

Onde:
CAB = curvacidade do seguimento AB em grados/km;
δi = deflexão angular entre estacas em grados;
LAB = desenvolvimento do seguimento AB em km.

O modelo será estatisticamente válido se a equação selecionada não tiver suas variáveis independentes correlacionadas entre si (LAMM et al., 1990). Essa análise é verificada pelo *p-value*, que é obtido a partir da análise de variância da regressão e deve apresentar valor menor que o nível de significância. (HOFFMANN, 2016). A representatividade do modelo é avaliada quanto ao coeficiente de determinação R^2, resultante do ajuste de reta através do método dos mínimos quadrados.

3. MÉTODO

Este estudo propõe a elaboração e validação de um modelo de previsão da velocidade operacional em rodovias de pistas simples, a partir da curvacidade anterior e posterior. Foi aplicada a seguinte metodologia:

- caracterização da planimetria e curvacidade a partir do *software* SAEPRO;
- tratamento e seleção de dados do experimento previamente realizado por ANDRIOLA (2021), com câmeras GoPro incorporadas ao veículo FIAT UNO 2020, a fim de obter vídeo registros e dados de telemetria;
- coleta de dados com voluntários de 18 a 50 anos;
- obtenção de velocidades por estaca: Velocidade de Fluxo Livre utilizada para o modelo de previsão da V_{85}, visto que as velocidades coletadas por ANDRIOLA (2021) são de condutores trafegando sem interferências de outros veículos e das condicionantes geométricas da rodovia;
- após tratamento e seleção dos dados, foram separados 20% dos dados válidos para validar o modelo de melhor desempenho;
- determinação da Velocidade Operacional 85 percentil (V85) a ser considerada na concepção do modelo;
- utilização de modelo de regressão múltipla com duas variáveis independentes;
- avaliação do modelo sobre sua validade estatística;
- desenvolvimento de uma matriz de análise;
- avaliação do modelo pelo coeficiente de determinação.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO

O trecho em estudo compreende um trecho de 7 quilômetros da rodovia ERS-122, do km 155+623,23 ao km 162+974,56 no estado do Rio Grande do Sul. O mesmo é caracterizado por pista simples, terreno ondulado, ambiente rural e por fazer a ligação da cidade Ipê com a BR-116, conforme a figura 1.

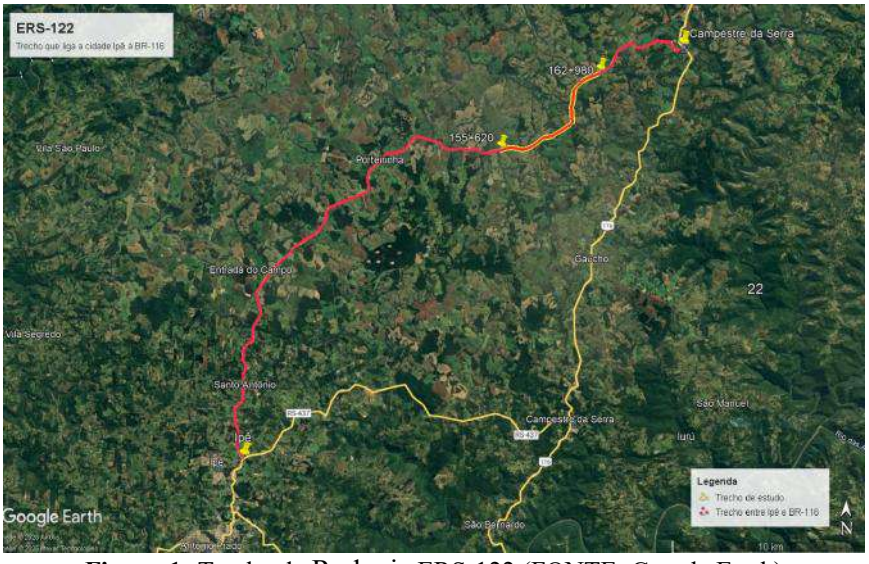


Figura 1: Trecho da Rodovia ERS-122 (FONTE: Google Earth)

As velocidades dos 25 voluntários foram coletadas para cada estaca e selecionadas no sentido de ida, ou seja, no sentido crescente do estaqueamento. As estacas que pertenciam aos pontos notáveis foram excluídas, de

modo que o estaqueamento ficasse exatamente de 5 em 5 metros, iniciando na estaca do km 155+625 e terminando na estaca do km 162+970.

Inicialmente, foi separada 20% da população (5 perfis de velocidade) com o objetivo de validar o modelo de melhor desempenho. Tanto para os 20 perfis de velocidade quanto para os 5 reservados, o percentil 85 das velocidades, a média aritmética e o desvio padrão foram calculados usando as funções disponíveis no Excel. O número de amostras necessária das velocidades em cada estaca foram calculadas conforme BOX E OPPENLANDER (1976) dado pela equação 2.

$$N = \frac{(S^2K^2(2+U^2)}{2E} \quad (2)$$

Onde:
N: número mínimo de amostras;
S: desvio padrão estimado;
K: constante relacionada ao nível de confiança igual a 1,96 (relacionado a 95% de confiança);
U: constante de correção igual a 1,04 (relacionado a 85 percentil);
E: erro admissível para a estimativa de velocidade igual a 7 km/h.

Com base nas informações dos Azimutes contidas no relatório de coordenadas e parâmetros por estaca, as curvacidades anterior e posterior foram calculadas por segmento para cada estaca. O cálculo foi feito a partir dos valores absolutos da diferença entre as deflexões acumuladas e dividindo-as pelo desenvolvimento do segmento, utilizando a equação 1.

Com a ferramenta do Excel de análise de dados, foi possível utilizar o modelo de regressão linear múltipla com as velocidades V_{85} para o intervalo Y (variável dependente), ambas as curvacidades para o intervalo X (variáveis independentes) e nível de confiança de 95%. Esse modelo foi aplicado para cada conjunto de desenvolvimento anterior e posterior espaçadas de 100 em 100 metros, iniciando com 100 metros anterior e 100 metros posterior em cada estaca. Após isso, aplicou-se o modelo para 100 metros anterior e 200 metros posterior, e assim por diante até compor a matriz de resposta do coeficiente de determinação (R^2) na extensão total do trecho, que compreende entre o km 55+625 e o km 62+970; e para o segmento entre o km 159+000 e o km 160+500, seguindo para ampliação da escala de 20 em 20 metros para a combinação de melhor coeficiente de determinação (R^2) e validação das equações.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

A figura 2 apresenta a matriz de resposta do trecho inteiro para o coeficiente de determinação (R^2) em intervalos de 100 em 100 metros, a qual indicou o modelo com comprimentos entre estacas de Lant = 200 metros e Lpos = 200 metros como o de melhor desempenho, resultando um R^2 de 0,2890 e *p-value* de $1{,}64\text{x}10^{-53}$ para curvacidade anterior (Cant) e $1{,}02\text{x}10^{-71}$ para curvacidade posterior (Cpos), sendo o coeficiente considerado com baixo poder de explicação da variação do comportamento da velocidade operacional (V_{85}) observada; porém, estatisticamente válida. O modelo estatisticamente válido é indicado da equação 3.

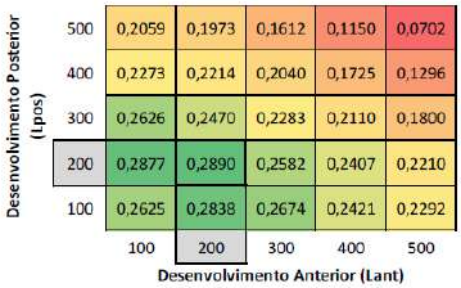


Figura 2: Matriz de resposta entre o km 155+625 e o km 162+970

$$V85 = 98{,}5508 - 49{,}1583 * Cant - 58{,}2325 * Cpos \quad (3)$$

A partir do gráfico de validação relativa do modelo com os valores das velocidades observadas e estimadas, apresentado na figura 3, foi identificado um segmento de melhor ajuste do modelo entre os quilômetros

159+000 e 160+500. Para a validade relativa ser comprovada, os perfis de velocidade observada dos motoristas e de velocidade estimada pela equação devem indicar comportamentos similares, seguindo as mesmas tendências de aceleração e desaceleração.

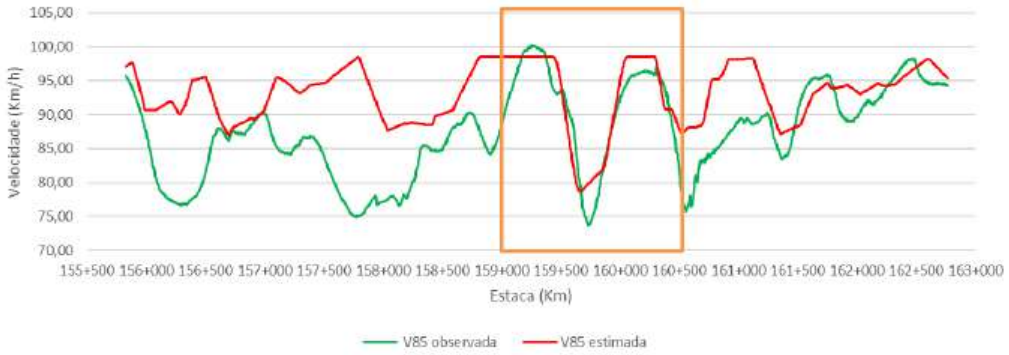


Figura 3: Velocidade por estaca entre o km 155+625 e o km 162+970

Na figura 4a observa-se a matriz de análise dos coeficientes de determinação para o segmento entre os quilômetros 59+000 e 60+500, utilizando intervalos de comprimento entre estacas de 100 metros. O conjunto que demonstrou melhor desempenho foi com Lant = 300 metros e Lpos = 200 metros, do qual se obteve um coeficiente R^2 de 0,8330, valores de p-value de $1{,}97x10^{-78}$ para Cant e $2{,}9x10^{-99}$ para Cpost, resultando na equação 4, que demonstrou ser um modelo válido e representativo.

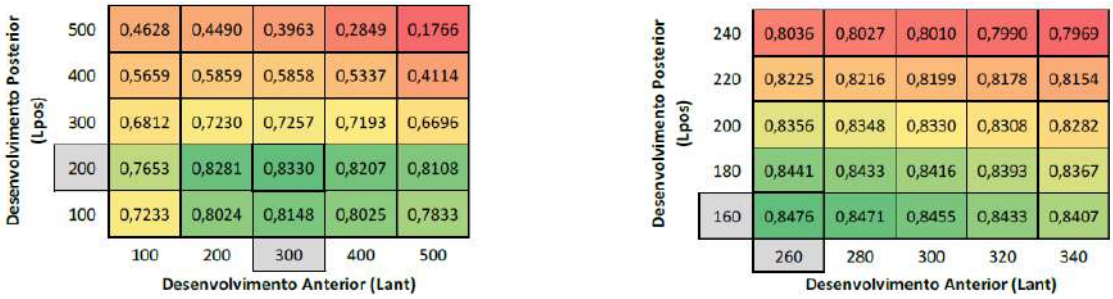


Figura 4: Matriz de resposta entre o km 159+000 e o km 160+500

$$V85 = 102{,}7559 - 68{,}6298 * Cant - 70{,}0900 * Cpos \quad (4)$$

A partir do conjunto de desenvolvimento anterior e posterior 300x200, foi ampliada a escala para conjuntos de 20 em 20 metros, apresentada na figura 4b. O modelo com Lant = 260 e Lpos = 160, mostrou-se estatisticamente válido (p-value de $1{,}03x10^{-75}$ e $3{,}30x10^{-102}$ para Cant e Cpos, respectivamente), apresentando melhor desempenho (R^2 = 0,8476). A equação final 5 indica a relação entre a variável dependente V85 e as variáveis independentes (Cant e Cpos).

$$V85 = 101{,}7801 - 58{,}7466 * Cant - 63{,}2673 * Cpos \quad (5)$$

A equação final 5 obteve um coeficiente de determinação de bom desempenho (0,8476), visto que um valor de R^2 = 1 apresenta todos os dados amostrais exatamente sobre a reta ajustada de mínimos quadrados, indicando que o modelo se ajusta perfeitamente aos dados. Desta forma, o modelo representado pela equação 5 revelou ser estatisticamente válido e de melhor desempenho para o segmento com curvacidades acumuladas em 260 metros anterior e 160 metros posterior à estaca na qual o veículo se encontra, para o segmento entre o km 159+000 e o km 160+500, local onde se observa significativa redução da velocidade de acordo com a percepção do condutor. A V_{85} foi de 101,78 km/h em condições de reta e para cada grado de curvacidade anterior e posterior essa se reduz em 58,75 km/h e 63,27 km/h, respectivamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo a elaboração e validação de um modelo de predição da Velocidade

Operacional (V_{85}) de veículos de passeio sobre o trecho de pista simples da Rodovia ERS-122, a partir de parâmetros geométricos de curvacidade da rodovia. O modelo proposto, utilizando as variáveis independentes de curvacidade anterior e posterior, demonstrou ser estatisticamente válido e com R^2 de 0,8476.

Foi analisada a matriz de resposta do trecho inteiro (km 155+625 ao km 162+970), do qual obteve-se o conjunto Lant = 200 m e Lpos = 200 m, com R^2 = 0,2890. Em seguida, foi desenvolvida a matriz de análise para o segmento de 1,5 km, entre os quilômetros 159+000 e 160+500, resultando o conjunto de Lant e Lpos de 100 em 100 metros, do qual resultou um coeficiente de determinação R^2 de 0,8330. Após isso, a escala de análise foi ampliada para 20 em 20 metros, obtendo um conjunto Lant = 260 m e Lpos = 160 m, com R^2 de 0,8476. O último modelo proposto teve melhor capacidade de explicar a variabilidade da velocidade operacional V85, com as curvacidades sendo significativas para a redução da velocidade 260 metros antes e 160 metros depois da estaca que o veículo se encontra. A percepção da sinuosidade pelo usuário foi mais significativa para a curvacidade posterior (a ser enfrentada pelo condutor), cujo coeficiente angular da equação foi de – 63,27.

O estudo se mostra relevante para a concepção de rodovias, especialmente aquelas de pista simples e com curvas de raios pequenos, onde a velocidade tende a ser reduzida. É possível incluir no modelo de previsão da velocidade operacional (V_{85}) elementos geométricos de segurança, como superelevação, superlargura e distâncias de visibilidade, os quais permitam avaliar a consistência geométrica da via, quanto a sua fluidez e dimensionamento dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOLA, C. L. Análise da Validade Comportamental de um Simulador de Direção Imersivo. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2021.

BOX, P. C.; OPPENLANDER, J.C. *Manual of Traffic Engineering Studies.* (14)78-91, 1976.

DER/SC. Diretrizes para a Concepção de Estradas. Departamento de Estradas de Rodagem de Santa Catarina. Fevereiro, 2000.

DHAHIR, B.; HASSAN, Y. Modeling Speed and Comfort Threshold on Horizontal Curves of Rural Two-Lane Highways Using Naturalistic Driving Data. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000246.

GARCÍA, D. S. P. Elaboração de Modelo de Previsão de Velocidade Operacional e Classificação de Rodovias do Estado do Rio Grande do Sul quanto a sua Consistência Geométrica. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2002.

GARCÍA, D. S. P. Método para Análise da Consistência Geométrica de Rodovias Brasileiras de Pistas Simples. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2008.

HOFFMANN, R. Análise de regressão: uma introdução à econometria. 5ª ed. Univeridade de SãoPaulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2016.

IPEA. Fatores condicionantes da gravidade dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Texto para discussão Nº 1344. Brasília, 2008.

LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M.; MAILAENDER, T. Comparison of Operating Speeds on Dry and Wet Pavements of Two-Lane Rural Highways. Transportation Research Record 1280. 199-207.

LESCANO, A. M. et al. Modelo de Previsão da Velocidade Operacional em Rotondas Modernas. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). Florianópolis-SC. Novembro, 2024.

Thaís Machado Garay (machadothais910@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, Brasil
Daniel Sergio Presta García (daniel.garcia@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Sistemas de Transporte do Departamento de Engenharia de Produção e Transportes (LASTRAN), Av. Osvaldo Aranha, 99 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, Brasil
César Luís Andriola (clandriola@wisc.edu)
Universidade de Wisconsin–Madison, 500 Lincoln Dr, Madison, WI 53706, Estados Unidos
Fernando Fraga de Freitas dos Santos (fernando@mxfc.com.br)
MXFC Engenharia Ltda., Av. Loureiro da Silva, 1940 - Cidade Baixa, Porto Alegre, Brasil

OPERAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS EM DECLIVES LONGOS E ÍNGREMES: SIMULAÇÃO TÉRMICA DE FREIOS COM BASE NA NBR 10966-2

Beatriz Akemi Ishihara, **Patrick Gabriel Quintino**,
André Luiz Cunha e **José Reynaldo Setti**
Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo avalia o risco de superaquecimento dos freios (*fade*) em caminhões que trafegam por longos declives, com base na NBR 10966-2. Foi desenvolvido um modelo computacional para estimar a temperatura dos freios durante a descida, considerando diferentes configurações veiculares, inclinações, velocidades e perfis de condução. Foram realizadas mais de 1 milhão de simulações com 14 classes de caminhões típicas da frota paulista. Os resultados indicam que a descida a 30 km/h é segura mesmo em rampas de 6% de inclinação, desde que o motorista utilize adequadamente o freio motor. Em contraste, aumentos na velocidade de descida ou condutas inadequadas elevam significativamente o risco de *fade*, especialmente em veículos com relação peso/potência desfavorável. O modelo apresentou boa aderência à norma, e a base de dados permite análises robustas e sensíveis. Conclui-se que a segurança em declives exige velocidade controlada, manutenção adequada e conscientização sobre a importância da condução segura.

1. INTRODUÇÃO

Incidentes com caminhões fora de controle em declives longos e íngremes são causados principalmente pela perda dos freios (*brake fade*), que ocorre quando o aquecimento excessivo dos freios reduz a eficácia da frenagem, muitas vezes levando à perda catastrófica de controle do veículo. A literatura sugere os fatores preponderantes para a ocorrência de acidentes com caminhões em declive são (Apronti *et al.*, 2017; Yan e Xu, 2018; Yan *et al.*, 2021; Ampadu *et al.*, 2022; Haq *et al.*, 2022): (*i*) falta de uso ou uso inadequado do freio motor e velocidade excessiva no declive; (*ii*) motoristas inexperientes ou sem familiaridade com o trecho do declive; (*iii*) sinalização inadequada do declive; (*iv*) falta de manutenção veicular; e (*v*) cansaço ou influência de drogas.

Um aspecto importante do projeto de declives longos e íngremes está ligado à capacidade de frenagem dos veículos. No Brasil, todos veículos comerciais devem atender à norma NBR-10966-2 que trata do desempenho e ensaios de frenagem para ônibus e caminhões (ABNT, 2019). Pela norma brasileira, equivalente à europeia ECE-R13 (ECE, 2016), os freios de caminhões devem ser projetados para que o veículo possa viajar a 30 km/h por 6 km num declive de 6%. Para ônibus, os requisitos são viajar a 30 km/h por 6 km num declive de 7% sem usar os freios de serviço. Ou seja, qualquer caminhão brasileiro é capaz de viajar a 30 km/h por 6 km num declive de 6% sem sofrer perda de freios por superaquecimento. Viajar em declives mais longos ou mais íngremes (ou ambos) exige velocidades de descida menores para evitar a ocorrência do *fade*.

No entanto, a experiência do motorista e a sua forma de condução afetam o desempenho dos freios em declives longos e íngremes. O objetivo deste trabalho foi determinar a velocidade segura em declives para caminhões típicos brasileiros, em função do tipo de caminhão; PBT; comprimento e magnitude do declive; e forma de condução do veículo. Essas informações podem subsidiar o planejamento, projeto e operação de rodovias visando reduzir o risco de acidentes por perda de freios.

2. PERDA DE FREIOS POR SUPERAQUECIMENTO

A perda de freios por superaquecimento decorre do uso excessivo dos freios de serviço ao longo de uma descida íngreme e longa. Como o princípio básico da frenagem consiste na transformação da energia cinética em calor através da fricção que existe entre as sapatas e o tambor, uma parte significativa desse calor é absorvida pelo tambor e sapatas. Quando a temperatura do sistema atinge um certo patamar (normalmente a partir de 250 °C), as sapatas perdem atrito num processo chamado *fade* ou saturação térmica. Nesse ponto, os freios de serviço deixam de funcionar e o motorista não consegue mais controlar a velocidade do veículo (Scott *et al.*, 2003; Umaras *et al.*, 2021).

As forças que atuam sobre um veículo num declive, no qual o motorista usa o freio motor, são (AASHTO, 2018): F_{BM}, força de frenagem produzida pelo freio motor; F_B, força de frenagem produzida pelos freios de serviço;

R_r, resistência de rolamento; R_a, resistência aerodinâmica; e R_g, resistência de rampa. As quatro primeiras são forças que atuam contra o movimento; a última força, a componente do peso na direção do movimento ($R_g = G \cdot \tan\alpha$), é a que faz o veículo mover-se no declive (G, peso do veículo e $\tan\alpha$, declividade da rampa). O motorista controla a velocidade de descida através do freio motor (F_{BM}) e do freio de serviço (F_B).

A temperatura dos freios ao longo do declive pode ser estimada através da conservação de energia (Lucas, 2004). Se o caminhão viaja em velocidade constante, há um equilíbrio das forças que atuam na direção do movimento (Limpert, 2011):

$$F_B + F_{BM} = R_g - R_r - R_a, \tag{1}$$

que pode ser reescrito em termos da potência ($P = F \cdot v$) como

$$P_B + P_{BM} = v\,(R_g - R_r - R_a), \tag{2}$$

em que P_B é a potência dissipada pelo sistema de freios de serviço (W); P_{BM} é a potência dissipada pelo freio motor (W); v é velocidade do veículo (m/s); e as resistências são dadas em N. Integrando-se potência em relação ao tempo na Eq. 2, obtém-se a energia térmica dos freios de serviço, que é dada por (Lucas, 2004):

$$Q_B(t) + P_{BM} \cdot t = t \cdot v\,(R_g - R_r - R_a), \tag{3}$$

com $Q_B(t)$ sendo a quantidade de calor produzida pelos freios de serviço do início do declive até o instante t, em J; e t, o tempo decorrido, em s. Conhecida a massa M_f (kg) e a temperatura T_0 (°C) do sistema de freios no início do declive pode-se determinar a temperatura dos freios $T_f(t)$ decorrido um tempo t através de

$$T_f(t) = T_0 + Q_B(t)/(M_f \cdot c_f) \tag{4}$$

em c_f é o calor específico do material dos freios, em J/(kg·°K).

3. MÉTODO

A Equação 4 e as anteriores foram usadas para criação de um programa em linguagem Python que simula o movimento do veículo a intervalos de duração Δt ao longo do declive, calculando as forças que atuam sobre o veículo que viaja a uma velocidade preestabelecida v, e, a partir da quantidade de calor Q_B, determina a temperatura dos freios de serviço T_f no intervalo Δt. O programa permite configurar as características operacionais de qualquer tipo de veículo, tais como: (*i*) peso bruto total; (*ii*) número de eixos; (*iii*) potência de frenagem disponível no freio motor; (*iv*) potência usada no freio motor ao longo do declive; (*v*) número de freios e suas massas; (*vi*) velocidade desejada ao longo do declive; etc. e fornece a temperatura dos freios de serviço T_f a intervalos de 10 m ao longo do declive analisado.

Este programa foi usado para geração de um conjunto de dados sintéticos usando um processo de Monte Carlo (Kalos e Whitlock, 2008) com 1.008 cenários que resultam da combinação de quatro fatores: (*i*) 14 classes de caminhões, representando a frota típica em rodovias brasileiras; (*ii*) 6 níveis da magnitude do declive: −3%, −4%, −5%, −6%, −7% e −8%; (*iii*) 4 níveis para a velocidade desejada no declive: 30, 40, 50 e 60 km/h; e (*iv*) 3 níveis para potência utilizada do freio motor: 40%, 60% e 80% da potência do motor, que representam a forma como o motorista usa os freios de serviço no declive.

Para cada cenário, foram simuladas 1.000 replicações do caminhão viajando por um declive suficientemente longo para vencer um desnível de 800 m. Em cada replicação foram sorteados aleatoriamente a temperatura dos freios no início do declive e o peso bruto total (PBT) do veículo. A temperatura inicial dos freios teve 4 níveis (40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C), considerados como freio frio (Limpert, 2011), com igual probabilidade de ocorrência. O PBT em cada replicação foi obtido aleatoriamente da distribuição acumulada de pesos brutos totais obtida em estudos anteriores (Cunha *et al.*, 2005; Carvalho e Setti, 2019). O conjunto de dados final consistiu de 1.008.000 descidas ao longo de um declive em que o desnível total é 800 m. A temperatura dos freios e a velocidade do caminhão foram registradas a cada 10 m percorridos na descida. O percurso mais curto foi 10 km (rampa de −8%) e o mais longo, 26,67 km (rampa de −3%).

4. RESULTADOS

Os dados foram classificados em função do tipo de condução no declive, que foi categorizada em: (*i*) *condução segura*, em que o motorista usa o freio motor com o equivalente a 80% da potência do motor, reservando os freios de serviço para emergências; (*ii*) *condução subótima*, quando o motorista usa o freio motor numa intensidade menor (60% da potência do motor) e, por conseguinte, usa os freios de serviço mais frequentemente; e (*iii*) *condução insegura*, quando o motorista usa uma parcela muito menor da potência disponível do freio motor (40%) e, por isso, usa os freios de serviço constantemente ao longo do declive.

Para cada veículo simulado, foi registrada a distância percorrida no declive até o ponto em que os freios atingem a temperatura de 250 °C, que é o ponto em que os freios perdem a eficiência por excesso de temperatura. A Tabela 1 resume os resultados, indicando a distância correspondente ao 99º. percentil da distribuição observada de distância até o *fade*, em função da magnitude do declive, agregando-se todas as 14 classes de caminhão. Apenas 1% dos veículos simulados sofreram o *fade* antes da distância indicada na tabela. O declive de −3% não apresentou o efeito *fade* nos trechos simulados, portanto foi suprimido da tabela.

Tabela 1: Distância percorrida no declive (em km) até a ocorrência do *fade*, para o 99º. percentil da distribuição observada para as 14 classes de caminhões, em função da magnitude do declive, para cada tipo de condução

Velocidade de descida (km/h)	**Condução segura**					**Condução subótima**					**Condução insegura**				
	−4%	−5%	−6%	−7%	−8%	−4%	−5%	−6%	−7%	−8%	−4%	−5%	−6%	−7%	−8%
30	–(1)	–(1)	7,13	2,90	1,68	–(1)	4,73	2,49	1,47	1,36	6,29	2,50	1,30	1,09	0,93
40	–(1)	6,16	2,40	1,58	1,12	9,59	2,69	1,78	1,26	0,93	3,09	1,82	1,37	0,90	0,87
50	–(1)	4,10	1,92	1,24	1,10	5,90	2,60	1,39	1,16	0,94	3,13	1,75	1,22	0,96	0,73
60	10,86	2,99	1,62	1,32	1,06	4,12	2,19	1,36	1,12	0,93	2,75	1,86	1,07	0,96	0,77

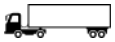
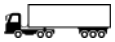
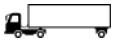
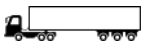
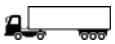
Nota: (1) A temperatura crítica não é atingida no declive para transpor o desnível de 800 m

A Tabela 1 demonstra que a distância segura até a ocorrência do *fade* é sensivelmente influenciada pelas variáveis simuladas neste estudo: PBT do veículo, velocidade de descida, magnitude do declive e modo de condução. À medida que essas variáveis aumentam, a exigência sobre o sistema de frenagem também cresce, reduzindo significativamente a distância percorrida até a perda dos freios de serviço. Por exemplo, em uma rampa de −6%, a 30 km/h e com condução segura, 99% dos caminhões percorrem pelo menos 7,13 km antes de atingir a temperatura crítica do *fade*. No entanto, ao elevar a velocidade para 40 km/h, essa distância cai para 2,40 km – uma redução de aproximadamente 66%. Mantendo a velocidade em 30 km/h, mas aumentando a declividade para −7%, a distância até o *fade* é de apenas 2,90 km, representando uma redução de 59% na distância percorrida no declive. Além disso, mesmo sem alterar a geometria da via ou a velocidade, uma condução subótima – com menor uso do freio motor – reduz a distância segura para 2,49 km, o que equivale a uma queda de 65% na margem de segurança operacional do veículo.

Caso o motorista opte por uma condução insegura, seja por inexperiência, desconhecimento da via, falta de manutenção veicular, cansaço ou qualquer outro motivo, as distâncias percorridas até a perda de freios são muito menores: a 30 km/h, 1,30 km; e a 60 km/h, 1,07 km em um declive de 6%. Esses resultados evidenciam que a velocidade operacional em declives longos e íngremes (−6% e 6 km) não deve ser superior a 30 km/h, como estabelecido na norma de frenagem (NBR10966-2).

A Tabela 2 representa um recorte detalhado da Tabela 1, considerando exclusivamente as condições estabelecidas pela NBR 10966-2: descida de 6% com 6 km de extensão a 30 km/h, com uso do freio motor e de serviço (ABNT, 2019) e PBT máximo legal. Nesse cenário normativo, a Tabela 2 apresenta o 99º. percentil da distância em que as 14 classes de caminhões analisadas conseguem percorrer antes de atingir o ponto de *fade*. Sob condução segura (com uso correto do freio motor), todas as classes veiculares atendem aos requisitos da norma. No entanto, as simulações mostram que conduções subótima ou insegura (menor ou pouco uso do freio motor) elevam significativamente o risco de perda de controle por superaquecimento dos freios. O caminhão da classe 2C2 apresentou o pior desempenho, pois combina a baixa potência de freio motor de um caminhão

Tabela 2: Distância percorrida em km até a ocorrência do *fade* em declives de −6% e −7% a 30 km/h para o 99º. percentil da distribuição observada, em função do veículo e condução (segura, subótima ou insegura), com o PBTC máximo legal

			Declive de −6%			**Declive de −7%**		
Classe PNCT e silhueta			*Segura*	*Subótima*	*Insegura*	*Segura*	*Subótima*	*Insegura*
B3		3C	–(1)	–(1)	6,64(2)	–(1)	–(1)	2,39
A2		2C	–(1)	–(1)	6,21(2)	–(1)	–(1)	2,43
C4		2S2	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)	7,13(2)
A2		2CC	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)	8,39(2)
E6		3S3	–(1)	–(1)	2,80	–(1)	4,95	1,70
B3		2S1	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)	–(1)
E6		3I3	–(1)	12,17(2)	2,17	–(1)	3,22	1,41
D5		2S3	–(1)	–(1)	2,68	–(1)	4,80	1,71
C4		2C2	7,13(2)	2,49	1,30	–(1)	1,47	1,09
D5		3S2	–(1)	–(1)	7,22(2)	–(1)	–(1)	3,07
C4		4CD	–(1)	–(1)	4,73	–(1)	–(1)	2,35
D5		3C2	–(1)	–(1)	5,20	–(1)	–(1)	2,42
F7		3D4	–(1)	7,68(2)	2,64	–(1)	3,27	1,81
H9		3M6	–(1)	4,41	2,27	–(1)	2,52	1,60

Notas:
(1) A temperatura crítica não é atingida no declive para transpor o desnível de 800 m
(2) O *fade* ocorre após o final do trecho normativo de 6 km (NBR 10966-2)
PNCT: Plano Nacional de Contagem de Tráfego do DNIT

rígido leve (2C) com a carga adicional de um reboque de dois eixos. Em condução subótima, os veículos 2C2 e 3M6 não completariam o trecho exigido pela norma sem alto risco de *fade*. Já sob condução insegura, apenas os veículos das classes 3C, 2C e 3S2 conseguiriam vencer o trecho normativo sem risco de perda de controle por ocorrência do *fade*.

Por outro lado, os caminhões das classes 2S2, 2CC e 2S1 demonstraram o melhor desempenho térmico de frenagem, apresentando menor risco de superaquecimento (Tabela 2). Em todos os modos de condução avaliados, estes veículos foram capazes de percorrer 6 km nos declives de −6% e −7%, sem atingir a temperatura crítica de *fade*. Esse desempenho se deve, em grande parte, ao menor número de eixos e, consequentemente, ao menor peso bruto total (PBT) desses veículos, além de uma maior potência de freio motor, especialmente nos casos dos veículos articulados, como o 2S1 e o 2S2, pelo menos para a amostra utilizada neste estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo indicam que, embora a maioria das configurações de caminhões atenda aos requisitos da norma NBR 10966-2 sob condução segura, determinadas combinações veiculares (2C2 e 3M6) apresentam riscos relevantes mesmo dentro dos limites normativos. Essas configurações devem ser consideradas críticas no projeto geométricoe merecem atenção especial da fiscalização.

Os resultados deixam claro que pequenas variações na velocidade de descida comprometem significativamente a segurança operacional: um aumento de 30 para 40 km/h reduziu em até 66% a distância segura antes do superaquecimento dos freios. Portanto, manter a velocidade máxima de 30 km/h em declives acentuados é não apenas compatível com os critérios normativos, mas fundamental para garantir a segurança dos usuários.

O estudo também evidenciou que a condução segura depende de múltiplos fatores, além do comportamento do motorista. A manutenção adequada dos freios é essencial, pois componentes desgastados ou desregulados prejudicam a dissipação térmica, elevam o risco de falhas e antecipam a ocorrência do *fade*. A conscientização

sobre o uso correto do freio motor, combinada com sinalização clara sobre a geometria da via, é indispensável para prevenir acidentes graves em trechos com declividade elevada.

Do ponto de vista metodológico, o modelo proposto demonstrou ser eficaz na representação do perfil térmico dos freios, e foi validado com base nos critérios da NBR 10966-2. A base de dados gerada por simulações de Monte Carlo apresentou alta representatividade da frota típica de caminhões que circula nas rodovias paulistas, abrangendo mais de um milhão de cenários, incluindo casos críticos de baixa potência do motor e distintas estratégias de condução. Isso possibilitou uma análise sensível e detalhada do risco de *fade* para cada combinação veicular, considerando os três perfis de condução analisados: segura (uso correto do freio motor), subótima (menor uso do freio motor) e insegura (maior uso do freio de serviço, freio em mau estado de conservação etc.).

Os achados deste estudo fornecem subsídios relevantes para a revisão de práticas de fiscalização, critérios de projeto geométrico, e políticas de operação contribuindo para a promoção de maior segurança nas rodovias com longos trechos em declive íngreme.

Agradecimentos
O desenvolvimento desta pesquisa foi apoiado pelo CNPq (processos 311964/22-2 e 310025/21-4 e bolsas de iniciação científica PIBIC-USP).

REFERÊNCIAS

AASHTO (2018) *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. (7ª ed.) American Association of State Highway e Transportation Officials, Washington, DC.

ABNT (2019) *NBR-10966-2 Veículos rodoviários automotores – Sistema de freios (Parte 2: Ensaios de frenagem e desempenho para veículos das categorias M, N e O)*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Ampadu, V.; A. Alrejjal e K. Ksaibati (2022) Incorporating horizontal curves and roadway geometry into the automated updated Grade Severity Rating System. *Transportation Research Record*, v. 2676, p. 329–343.

Apronti, D. T.; P. Saha; M. Moomen e K. Ksaibati (2017) Truck safety evaluation on Wyoming mountain passes. *Accident Analysis and Prevention*, v. 122, p. 342–349.

Carvalho, L. G. S. e J. R. Setti (2019) Calibration of the VISSIM truck performance model using GPS data. *Transportes*, v. 27, n. 3, p. 131–143.

Cunha, A. L.; M. L. Mon-Ma; J. J. Araújo; C. Y. Egami e J. R. Setti (2005) Caracterização da frota de caminhões no sistema Anhanguera-Bandeirantes. *Anais do XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, p. 443-1–443-8.

ECE (2016) *Regulation No. 13 of the ECE/UN – Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking [2016/194]*. Economic Commission for Europe of the United Nations.

Haq, M.; V. Ampadu e K. Ksaibati (2022) An investigation of brake failure related crashes and injury severity on mountainous roadways in Wyoming. *Journal of Safety Research*, v. 84, p. 7–17.

Kalos, M. e P. Whitlock (2008) *Monte Carlo Methods*. (2ª ed.) Wiley-VCH, Weinheim.

Limpert, R. (2011) *Brake Design and Safety*. (3ª ed.) SAE International, Warrendale, PA.

Lucas, M. J. (2004) "Faixas adicionais para trechos de rodovias com declives longos considerando os aspectos técnicos da frenagem de veículos de carga". Mestrado (dissertação). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Scott, J.; R. Fay; N. Hoover; R. D. Robinette e D. Deering (2003) Brake performance testing and truck runaway analysis. *SAE Transactions*, v. 112, p. 236–246.

Umaras, E.; A. Barari e M. Tsuzuki (2021) Heavy vehicles brake drums — An accurate evaluation on thermal loads in severe service conditions. *International Journal of Automotive Technology*, v. 22, n. 2, p. 371–382.

Yan, M. e J. Xu (2018) Prediction model for brake-drum temperature of large trucks on consecutive mountain downgrade routes based on energy conservation law. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2018, n. 1, p. 4587673.

Yan, M.; J. Xu; S. Han e F. Ma (2021) Safe speed prediction model for heavy trucks on consecutive mountain downgrade routes based on energy conservation law. *Transportation Research Record*, v. 2675, p. 1126–1138.

Beatriz Akemi Ishihara (beatrizishihara@usp.br), Patrick Gabriel Quintino (patrick.gabriel@usp.br),
André Luiz Cunha (alcunha@usp.br) e José Reynaldo Setti (jrasetti@usp.br)
Dep. de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos, SP

PERCEPÇÃO DE SEGURANÇA VIÁRIA NO ENTORNO ESCOLAR EM ÁGUAS LINDAS-GO: UMA ANÁLISE FATORIAL EXPLORATÓRIA

Jean Damas da Costa[1], **Matheus Duarte de Oliveira**[2], **Erika Cristine Kneib**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás (UFG), [2]Secretaria-Geral de Governo

RESUMO
Este artigo investiga a percepção de segurança viária no entorno de escolas públicas em Águas Lindas de Goiás, com foco na mobilidade infantil. Utilizou-se um questionário aplicado à comunidade escolar e análise fatorial exploratória (AFE) para identificar padrões de percepção. Os resultados revelam três fatores principais: mobilidade ativa e percepção de risco na circulação; transporte coletivo e infraestrutura de acesso e perfil sociodemográfico e autonomia no deslocamento. Conclui-se pela aplicabilidade do estudo, ao revelar os fatores principais no que se refere à percepção, podendo contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas de segurança viária no entorno de escolas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento das cidades tem impactado profundamente as condições de vida, especialmente no que diz respeito à mobilidade urbana. Para Harvey (2014), o direito à cidade envolve a capacidade coletiva de transformar o ambiente urbano, considerando as necessidades de todos os grupos sociais, inclusive crianças e adolescentes. No contexto urbano contemporâneo, autores como Park (1987) e Simmel (1987) apontam que o crescimento das cidades interfere diretamente nas relações sociais e na autonomia dos indivíduos. As crianças, por estarem em fase de desenvolvimento físico e cognitivo, enfrentam limitações significativas para se locomover com segurança em ambientes urbanos hostis.

A mobilidade infantil segura insere-se na agenda do direito à cidade, sendo um indicador da capacidade urbana de acolher sua população mais vulnerável. Tonucci (2009) defende que uma cidade adaptada às crianças é, por extensão, melhor para todos. Assim, a mobilidade urbana, enquanto direito social, está associada à qualidade de vida urbana (Maya, 2019; Harvey, 2014). As dificuldades de deslocamento de crianças e adolescentes refletem a precariedade da infraestrutura urbana e a exclusão desses sujeitos dos processos de planejamento. Gehl (2015) propõe o urbanismo centrado na escala humana, defendendo que o ambiente urbano deve favorecer o caminhar, o convívio e a segurança, sobretudo para os mais vulneráveis. Para as crianças, isso significa calçadas seguras, travessias sinalizadas e infraestrutura cicloviária conectada e protegida (Lopes, Roland, Costa, 2023). A infância é fase decisiva para o desenvolvimento humano, essencial para capacidades cognitivas e socioemocionais (Lopes, Roland, Costa, 2023). A escola, nesse cenário, exerce papel central ao proporcionar ambiente de aprendizagem e socialização. Segundo o Núcleo Ciência pela Primeira Infância (NCPI, 2014), experiências positivas nos primeiros anos favorecem adaptação, desempenho escolar e realização pessoal.

O presente estudo teve como objetivo investigar a percepção de segurança viária no entorno de escolas públicas, com ênfase na mobilidade infantil. Buscou-se compreender como crianças e comunidade escolar percebem os riscos do deslocamento diário, especialmente os trajetos a pé, de bicicleta, por transporte público ou escolar. A metodologia combinou análise do entorno físico das escolas e aplicação de questionários estruturados a estudantes. As respostas foram tratadas por estatística descritiva e análise fatorial, permitindo identificar padrões e fatores subjacentes às percepções relatadas. Os resultados reforçam a aplicabilidade do estudo, ao identificar os principais fatores relacionados à percepção de segurança viária no entorno escolar, oferecendo subsídios para políticas públicas que promovam ambientes escolares mais seguros e adequados à mobilidade infantil.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada no município de Águas Lindas de Goiás, envolvendo uma escola municipal e uma estadual. O município localiza-se a 194 km de Goiânia e possui população de 225.693 habitantes (IBGE, 2022). A Escola Municipal Acelina Alves de Araújo atende 720 alunos, com idades entre 4 e 11 anos, enquanto o Colégio Estadual Piaget possui 986 alunos, na faixa etária de 11 a 18 anos, conforme informações fornecidas pelas diretoras das unidades escolares. Foram coletadas 546 respostas a questionários aplicados à comunidade escolar, composta por alunos, professores e funcionários. Os dados obtidos foram tratados por meio de estatística descritiva e submetidos à Análise Fatorial Exploratória (AFE).

A escolha do bairro Camping Club, onde estão localizadas as escolas, considerou: i) a existência de duas unidades escolares que abrangem desde a educação infantil até o ensino médio; e ii) o número expressivo de estudantes residentes na área de influência direta das instituições selecionadas.

Primeiramente, foi realizado um levantamento *in loco*, que permitiu mapear os principais pontos de conflito entre pedestres e veículos na área de influência direta das escolas (aqui considerada como um raio de 500 m, conforme Gehl, 2015). Foram identificados ainda problemas como excesso de velocidade veicular, ausência de sinalização, precariedade das calçadas, inexistência de ciclovias e intenso fluxo de pedestres. Na sequência, foram elaborados e aplicados questionários compostos por perguntas abertas e fechadas, estruturadas em blocos temáticos.

O primeiro bloco abordou características sociodemográficas e o vínculo dos respondentes com a escola. O segundo concentrou-se na percepção de segurança nos deslocamentos e na infraestrutura urbana do entorno escolar, conforme apresenta a Tabela 1. A utilização dos quatro blocos permitiu uma abordagem integrada e sistemática da percepção de segurança viária. Cada bloco contempla uma dimensão específica, porém inter-relacionada, contribuindo para uma compreensão mais ampla e contextualizada do tema. O padrão de viagem (bloco 3), por exemplo, é fortemente influenciado pelos dados socioeconômicos (bloco 2) e, por sua vez, pode impactar diretamente a percepção (bloco 4), conforme discutido por Oliveira (2023).

Tabela 1: Grupos que compõem o questionário.

Grupos	Descrição
Vinculo escolar	O vínculo escolar é composto por 2 perguntas, nas quais busca revelar a relação do entrevistado com a escola e o período de permanência.
Dados socioeconômicos	O grupo socioeconômico foi composto por 4 perguntas relacionadas às informações socioeconômicas. Dentre elas: Sexo, Idade, Renda e local de moradia.
Padrão de viagem	O grupo de padrões foi composto por 3 perguntas relacionadas ao deslocamento do entrevistado, modo de deslocamento, companhia e percurso realizado.
Percepção	Este grupo é composto por 15 perguntas que procuram revelar a percepção do entrevistado quanto à segurança no deslocamento.

O modelo proposto neste estudo envolve variáveis latentes, isto é, variáveis que não podem ser medidas diretamente, sendo inferidas a partir das relações entre variáveis observáveis (Damásio, 2012), como ocorre com a percepção de segurança viária. Para identificar padrões subjacentes entre as variáveis do questionário, aplicou-se a Análise Fatorial Exploratória (AFE), técnica estatística que permite reduzir um grande número de variáveis em conjuntos menores e mais significativos, denominados fatores (Urbina, 2007).

Essa análise foi adotada nesta pesquisa por ser adequada à identificação de fatores latentes que explicam padrões de resposta em variáveis subjetivas, como percepções sobre segurança viária. A AFE parte da premissa de que as variáveis observadas são reflexo de construtos subjacentes não diretamente mensuráveis (Damásio, 2012), o que se alinha ao objetivo desta investigação, centrada na percepção de segurança viária.

Os critérios utilizados para a extração dos fatores incluíram: autovalores superiores a 1 (critério de Kaiser, que avalia a adequação da amostra com base nas correlações entre variáveis), análise visual do scree plot e proporção da variância explicada, buscando-se modelos com variância acumulada superior a 50%. Para aprimorar a interpretabilidade dos fatores, utilizou-se a rotação ortogonal Varimax, que favorece a formação de agrupamentos mais claros entre variáveis, assumindo independência entre os fatores (Damásio, 2012). Os procedimentos foram realizados no software SPSS. A adequação da matriz de dados foi verificada pelos testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), esfericidade de Bartlett, Alfa de Cronbach e Confiabilidade do Construto (CR), os quais confirmaram a viabilidade da estrutura fatorial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados coletados, pode-se afirmar que o participante padrão da pesquisa é um estudante com idade entre 11 e 14 anos, matriculado majoritariamente na unidade escolar Piaget, no período vespertino. A maioria dos respondentes é do sexo feminino e pertence a famílias com renda entre 1 e 2 salários mínimos. A principal forma de deslocamento até a escola é a pé, sendo que cerca de 60% dos estudantes realizam esse trajeto acompanhados por um responsável.

A percepção do trânsito no entorno escolar é predominantemente negativa: 62,6% dos participantes consideram que os veículos trafegam em alta velocidade nas proximidades das escolas, e 69,4% apontam a falta de sinalização de trânsito. Além disso, 77,1% relataram ausência de vagas de estacionamento e 59,5% avaliaram como inadequadas as calçadas do entorno. A maioria (76,6%) afirmou que não há atividades educativas sobre trânsito na escola, embora mais da metade (53,3%) tenha apresentado sugestões para melhorar a segurança viária. Em relação à sensação de segurança nos deslocamentos, a travessia de ruas e o uso da bicicleta são amplamente percebidos como perigosos, enquanto o transporte escolar e o caminhar pelas calçadas são considerados mais seguros. Esse perfil revela que, apesar da pouca idade, os estudantes enfrentam desafios significativos relacionados à mobilidade urbana e à segurança no entorno escolar. Cabe destacar que as respostas corroboram a situação mapeada *in loco* (excesso de velocidade, ausência de sinalização, precariedade das calçadas e falta de ciclovias).

A adequação dos dados para a aplicação da Análise Fatorial Exploratória (AFE) foi verificada por meio de dois testes estatísticos: o índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e o teste de esfericidade de Bartlett. O valor obtido para o KMO foi de 0,776, indicando boa adequação amostral. Esse índice varia entre 0 e 1, sendo que valores acima de 0,7 são considerados satisfatórios para a realização da AFE. Um valor elevado sugere que os dados apresentam correlações parciais suficientemente baixas entre as variáveis, favorecendo a extração de fatores confiáveis. O teste de esfericidade de Bartlett apresentou significância estatística ($p < 0,001$), confirmando que a matriz de correlações entre as variáveis não é uma matriz identidade.

A partir dos dados analisados, foram extraídos três fatores principais com autovalores superiores a 1, conforme o critério de Kaiser para retenção de fatores relevantes. Esses três fatores explicaram, em conjunto, 51,07% da variância total dos dados, representando boa capacidade de síntese do conjunto de variáveis observadas. Assim, foram identificados três fatores denominados: Mobilidade ativa e percepção de risco na circulação, Transporte coletivo e infraestrutura de acesso e Perfil sociodemográfico e autonomia, conforme apresenta a Tabela 2.

O primeiro fator evidencia a vulnerabilidade na mobilidade ativa da comunidade escolar. O segundo, Transporte coletivo e infraestrutura de acesso, aponta a relação entre o transporte público coletivo e as condições de acesso aos pontos de embarque e desembarque. Já o terceiro fator, Perfil sociodemográfico e autonomia, revela a influência das condições socioeconômicas sobre a autonomia dos estudantes. Com base nos resultados obtidos, observa-se que o Fator 1 apresentou Alfa de Cronbach de 0,769, o que indica consistência interna substancial, considerando-se satisfatórios valores entre 0,61 e 0,80 (Landis e Koch, 1977). Além disso, a Confiabilidade do Construto (CR) desse fator foi de 0,822, superando o valor de referência de 0,70. Esses resultados demonstram que o conjunto de variáveis associadas ao Fator 1 é estatisticamente coerente, sendo o mais robusto entre os três avaliados.

O Fator 2 obteve Alfa de Cronbach de 0,593, classificado como moderado (entre 0,41 e 0,60), o que sugere consistência interna aceitável. Seu CR foi de 0,725, superando o limiar mínimo recomendado e indicando que, mesmo com um Alfa mais baixo, o construto apresenta confiabilidade adequada. O Fator 3 apresentou Alfa de Cronbach de 0,485, também dentro da faixa de consistência moderada, e CR de 0,725, confirmando boa confiabilidade do construto. Assim, embora os Fatores 2 e 3 tenham Alfas inferiores ao Fator 1, os valores de CR reforçam a estabilidade geral do modelo e a adequação das dimensões propostas.

Tabela 2: Descrição das variáveis correspondentes aos fatores identificados e suas respectivas cargas fatoriais.

Fatores	Descrição das variáveis	Carga Fatorial
Mobilidade ativa e percepção de risco na circulação (F1)	Segurança no trânsito	0,668
	Segurança em caminhar pela calçada	0,611
	Segurança em andar de bicicleta na rua	0,723
	Segurança em atravessar a rua	0,745
	Segurança em caminhar pela rua	0,716
	Segurança em caminhar pela calçada	0,348
Transporte coletivo e infraestrutura de acesso (F2)	Segurança em andar de transporte público (ônibus)	0,825
	Segurança em andar de bicicleta na ciclovia	0,354
	Segurança em andar de transporte escolar	0,825
Perfil sociodemográfico e autonomia (F3)	Idade	0,774
	Renda familiar	0,514
	Desloca-se sozinho ou acompanhado	0,750

Tabela 3: Índices de confiabilidade interna dos fatores identificados.

Fatores	Alfa de Cronbach	Confiabilidade do Construto (CR)
F1	0,769	0,822
F2	0,593	0,725
F3	0,485	0,725

No que se refere a uma discussão e análise dos fatores, cabe destacar:

- **O Fator 1** revela uma relação direta entre os modos ativos de deslocamento, como caminhar, atravessar ruas e pedalar, e a percepção de insegurança no entorno escolar. Embora a mobilidade ativa seja predominante entre os estudantes, conforme sugerem as altas cargas fatoriais para "andar de bicicleta na rua", "caminhar pela rua" e "atravessar a rua", a experiência cotidiana é marcada por obstáculos que comprometem a segurança. A presença de veículos em alta velocidade e a carência de infraestrutura adequada configuram um ambiente urbano hostil para pedestres e ciclistas. Estudos de Freitas et al. (2020) apontam que a percepção de risco no deslocamento é um dos principais fatores de desestímulo à mobilidade ativa, sobretudo entre crianças e adolescentes, gerando consequências diretas sobre sua autonomia, saúde e desenvolvimento social. Assim, esse fator evidencia uma contradição: a mobilidade ativa é desejada e muitas vezes necessária, mas as condições reais do espaço urbano a tornam arriscada e limitada;
- **O Fator 2** destaca a importância do transporte coletivo e escolar como alternativas que oferecem maior segurança e confiabilidade aos estudantes, especialmente em contextos onde a mobilidade ativa não é plenamente viável. A forte associação entre o uso do transporte público (ônibus) e do transporte escolar com aspectos da infraestrutura cicloviária e de circulação a pé sugere que a eficiência desses modos está diretamente condicionada à integração espacial com os demais sistemas de mobilidade urbana. A presença de calçadas bem dimensionadas e de ciclovias contínuas e seguras reforça a ideia de um sistema multimodal, no qual diferentes formas de deslocamento se complementam. Essa integração é fundamental para ampliar as opções de mobilidade segura e equitativa, conforme destacam Silva e Portugal (2010), ao defenderem o redesenho de áreas escolares como espaços de conexão entre modos sustentáveis;
- **No Fator 3** evidencia a influência de elementos do perfil sociodemográfico dos estudantes sobre sua autonomia nos deslocamentos. A idade aparece como a variável de maior peso, seguida pela renda familiar e pela presença ou não de um acompanhante no trajeto. Essa configuração indica que o desenvolvimento cognitivo e a condição econômica das famílias interferem significativamente na independência dos estudantes. Crianças mais velhas e oriundas de famílias com maior renda tendem a ter mais liberdade para se deslocar sozinhas. Isso sugere que políticas públicas de mobilidade e segurança viária precisam considerar as desigualdades estruturais e suas implicações no acesso à cidade;

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise revelou diferentes dimensões da percepção de segurança viária, possibilitando atingir o objetivo proposto e evidenciando a necessidade de intervenções estruturais no entorno escolar. Aspectos como calçadas, sinalização viária e velocidade dos veículos impactam diretamente o direito das crianças à mobilidade segura e acessível. Nesse contexto, a interação entre a comunidade escolar e o poder público mostra-se essencial.

A análise fatorial apontou altas cargas associadas a variáveis relacionadas à travessia de ruas, ao deslocamento a pé e ao uso da bicicleta, indicando que a mobilidade ativa está fortemente influenciada pela percepção de risco no entorno escolar. A presença de veículos em alta velocidade contribui significativamente para a sensação de insegurança nesses deslocamentos. Também foram observadas limitações na infraestrutura destinada a pedestres e ciclistas, afetando diretamente a qualidade desses trajetos. Outro fator identificado refere-se ao uso de ônibus e transporte escolar, associado à percepção da qualidade da infraestrutura de suporte a esses modos.

Já o terceiro fator agrupou variáveis sociodemográficas, como idade, renda familiar e autonomia no deslocamento, revelando que essas características influenciam diretamente a forma como as crianças acessam a escola. Além disso, destacam-se percepções recorrentes de riscos estruturais, como ausência de sinalização

adequada, falta de vagas para embarque e desembarque e excesso de velocidade nas imediações escolares. O presente estudo abre espaço para novas investigações, especialmente a partir da utilização dos resultados apresentados para sugerir intervenções no entorno das escolas, capazes de contribuir para a segurança e a percepção de segurança viária.

Agradecimentos
Agradecemos à Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte - SGG, do Governo de Goiás, pelo fornecimento dos dados necessários para esta pesquisa, que foram fundamentais para a análise e conclusão do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HARVEY, David. Capítulo 1 - O direito à cidade. In: Cidades rebeldes: do direito à cidade à revolução urbana. Tradução Jeferson Camargo. São Paulo: Martins Fontes, 2014. p. 27-67.

PARK, Robert. A cidade: sugestões para a investigação do comportamento humano no meio urbano. In Velho, Octávio Guilherme (org.). O fenômeno urbano. Guanabara: Rio de Janeiro, 4ª ed., p. 26 a 67, 1987.

SIMMEL, Georg. As metrópoles e a Vida Mental. In Fidelidade e Gratidão e Outros Textos. Relógio D'Água: Lisboa, p.75 a 94, 2004. O fenômeno urbano. Guanabara: Rio de Janeiro, 4ª ed., p. 90 a 113, 1987.

TONUCCI, F. Ciudades a escala humana: la ciudad de los niños. Revista de Educación, número extra, 2009.

MAYA, Juan Roberto Calderón. Propuesta de un plan de movilidad urbana para la Zona Metropolitana de Cancún (ZMC), México. Ciudade del México, Investigación Universitaria, 2019.

GEHL, J. Cidade para pessoas. São Paulo: Perspectiva, 2015.

URBINA, S. Fundamentos da testagem Psicológica. Porto Alegre: Artmed, 2007.

PORTUGAL, L. S., Flórez, J., Silva, A. N. R. Rede de pesquisa em transportes: um instrumento de transformação e melhora da qualidade de vida. Transportes, v. XVII (1): 6 – 16, 2010.

DAMÁSIO, B. (2021, 17 de maio). O que é análise fatorial exploratória? Blog Psicometria Online. https://www.blog.psicometriaonline.com.br/o-que-e-analise-fatorial-exploratoria/.

LANDIS, J.R., Koch, G.G. (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics. 33:159.

OLIVEIRA, Matheus Duarte de. Relação da estrutura urbana e o processo da escolha da bicicleta como modo de transporte. 2023. [Manuscrito] Dissertação (Mestrado em Projeto e Cidade) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Panorama: Águas Lindas de Goiás, GO. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/aguas-lindas-de-goias/panorama.

NCPI - Comitê Científico do Núcleo Ciência Pela Infância (2014). Estudo nº 1: O Impacto do Desenvolvimento na Primeira Infância sobre a Aprendizagem. Disponível em: http://www.ncpi.org.br. Acesso em: 21, set. 2025.

FREITAS, Carla et al. Fatores de Risco e Prevenção de Acidentes de Trânsito: Análise da Percepção das Crianças pelo Método Eduterapêutico. Sociedade de Pediatria de São Paulo (2020). http://dx.doi.org/10.1590/1984-0462/2020/38/2018281. Acesso em: 16 nov. 2023.

LOPES, J. M. M., ROLAND, D. V. M., COSTA, L. R. P. Infâncias Urbanas: O Espaço Público no Entorno de Escolas Infantis em São Luiz. São Luiz, Revista Projetar, v 8 n 1, janeiro de 2023.

Jean Damas da Costa (jean.damas@discente.ufg.br)
Universidade Federal de Goiás (UFG), Faculdade de Artes Visuais (FAV), Endereço: Av. Esperança, s/n - Campus Samambaia, Goiânia - GO, 74690-900, Brasil.
Matheus Duarte de Oliveira (Matheus.doliveira@goias.gov.br)
Secretaria-Geral de Governo (SGG), Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte, Endereço Antiga Chefatura de Polícia, Praça Cívica - Praça Dr. Pedro Ludovico Teixeira, 26 - St. Central, Goiânia - GO, 74003-010, Brasil.
Erika Cristine Kneib (erikakneib@ufg.br*)*
Universidade Federal de Goiás (UFG), Faculdade de Artes Visuais (FAV), Endereço: Av. Esperança, s/n - Campus Samambaia, Goiânia - GO, 74690-900, Brasil.

TRATAMENTO DE DEGRAU ENTRE A FAIXA DE TRÁFEGO E O ACOSTAMENTO EM LATERAL ADJACENTE: SOLUÇÕES GEOMÉTRICAS E MATERIAIS EMPREGADOS

Luiz Manoel Sousa, Rogério Lemos Ribeiro
Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO
A segurança viária é um aspecto fundamental a ser considerado na construção e conservação de rodovias. Um dos desafios enfrentados é o tratamento do desnível entre a pista de rolamento e o acostamento. Este desnível constitui causa crítica na perda de controle de veículos e pode causar sinistros. A queda de veículos no degrau entre a pista e o acostamento, nas rodovias, tem sido associada a muitos sinistros graves, incluindo colisões fatais. Este trabalho aborda como o degrau entre pavimento e acostamento impacta na ocorrência de sinistros, bem como, quais as soluções geométricas e materiais que possam ser empregados para a correção deste fator, visando a recuperação segura dos veículos. Através de revisões bibliográficas, é exposto a abordagem em outros países e o quanto a altura e a geometria dos desníveis podem impactar na perda de controle dos motoristas sobre os veículos.

1. INTRODUÇÃO

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), cita que, usualmente, não existem dados específicos para o dimensionamento estrutural dos acostamentos, uma vez que as solicitações de cargas diferem das faixas de rolamento, podendo inclusive, haver reduções de espessura na camada de revestimento, considerando a possiblidade de soluções estruturais distintas. Nesse contexto, para efeito de escolha do revestimento nos acostamentos, é adotado para seu dimensionamento o tráfego equivalente a 1% do tráfego da pista de rolamento. Tal prática resulta na possibilidade de que as estruturas entre a faixa de rolamento e o acostamento sejam diferentes, o que pode gerar um desnível na superfície entre a faixa de rolamento e o acostamento. O degrau, nesse contexto, é o desnível, ou diferença de altura, entre a faixa de rolamento onde os veículos trafegam e o acostamento, que é a faixa lateral da via destinada a paradas de emergência. Segundo os dados de sinistros monitorados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF, 2025), nos últimos cinco anos, 25% dos sinistros foram classificados como saídas de pista. A média anual do número de ocorrências vinculadas ao desnível em acostamentos, sobre as ocorrências totais, é de 0,32% neste mesmo período.

A instrução normativa nº 16, de 11 de maio de 2020, publicada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, estabelece no Art. 16. o degrau máximo entre pista e acostamento de 5 cm (cinco centímetros), a ser considerado nos orçamentos referenciais e procedimentos a serem utilizados na elaboração de projetos de Programas de Recuperação e Manutenção Rodoviária CREMA. Entretanto, em alguns casos, como em trechos curvos, recomenda-se que os acostamentos sejam nivelados com a pista para maior segurança. Um fator importante para o acostamento e a solução de adequação do degrau, é a inclinação transversal. Segundo o DNIT, a declividade transversal dos acostamentos é de 5%, sendo que, normalmente, a declividade das faixas de rolamento (ou abaulamento) é de 2%. No caso de trechos em curvas, é importante seguir a preconização do Manual de Projeto de Rodovias Rurais (DNER, 1999), especificamente o que está recomendado para lados internos e externos das curvas.

Este trabalho analisa o impacto do degrau entre o pavimento e o acostamento na ocorrência de sinistros, bem como apresenta soluções geométricas e alternativas de materiais que podem ser empregadas para a correção desse fator, com o objetivo de favorecer a recuperação segura de veículos caso saem da faixa de rolamento. Para isso, uma revisão sistemática da literatura foi realizada com o objetivo de identificar evidências técnicas e científicas sobre os efeitos do desnível entre faixa de rolamento e o acostamento na segurança viária, bem como reunir diretrizes, critérios de projetos e soluções.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando a revisão sistemática da literatura, utilizou-se a base de dados Scopus e Google Scholar para a identificação dos estudos relevantes. Na sequência, foram elaboradas diferentes combinações de palavras-chave, todas contendo o termo “shoulder”, associado a descritores relacionados ao degrau entre acostamento e pavimento e segurança viária. A busca foi restringida ao campo abstract, considerando os artigos que apresentassem os termos pesquisados nos resumos. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para cada combinação de palavras-chave, incluindo o número de artigos encontrados.

Tabela 1: Resultados das buscas por palavras-chaves

Base de dados	Pesquisar dentro	Palavras-chaves	Resultados
SCOPUS	Abstract	*"shoulder" AND "drop-off"*	10
		"shoulder" AND "road safety"	34
		"shoulder" AND "pavement"	164
GOOGLE SCHOLAR	Abstract	*"shoulder edge drop-off"*	34
		TOTAL	**242**

Fonte: Autor (2025)

Os critérios de inclusão restringiram-se a documentos do tipo artigos científicos de engenharia, publicados em língua inglesa. Não obstante, os critérios de exclusão abrangeram artigos duplicados ou que não abordassem diretamente o tema proposto. Em seguida, procedeu-se à leitura criteriosa dos artigos remanescentes, com o objetivo de selecionar apenas aqueles que tratassem do tema em epígrafe de forma direta e relevante. Também foram consultadas as principais regulamentações técnicas relacionadas ao assunto, visando complementar a análise e ampliar a compreensão sobre as diretrizes adotadas em diferentes países. Do total dos artigos pesquisados, foram utilizados 11 documentos que vinculavam diretamente o tema em epígrafe.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados dados relativos à influência do formato geométrico do degrau entre a faixa de rolamento e o acostamento, bem como, monitoramento de sinistros e quesitos técnicos para a correção.

3.1. Desnível entre acostamento e pavimento

A existência de desnível entre a faixa de rolamento e o acostamento, causa desconforto aos usuários que transpõem o limite da faixa de rolamento. A Figura 1 ilustra a simulação do movimento de um veículo, em pista simples, quando este passa com as rodas por um desnível localizado na borda da faixa de rolamento.

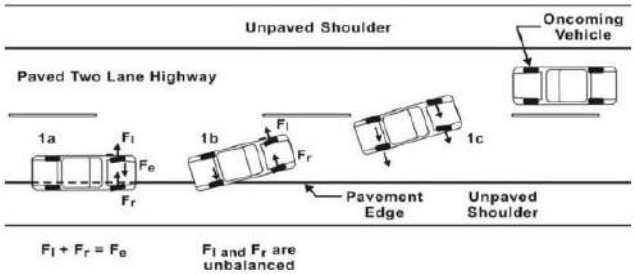


Figura 1: Influência da borda do pavimento na estabilidade do veículo. Fonte: IVEY et al. (1986).

Zimmer et al. (1983) realizaram, em 1981, um estudo aprofundado sobre a geometria das bordas dos desníveis, no qual foi desenvolvida uma escala subjetiva de níveis de risco relacionados à segurança viária. Esse estudo corroborou a hipótese de perda de controle do veículo em velocidades acima de 48 km/h. No entanto, foi identificado que este problema é minimizado quando a borda possui uma inclinação menor ou igual a 45º. Neste contexto, foi gerado o gráfico ilustrado na Figura 2, onde os dados contidos no eixo x (abscissa) são relativos à altura do desnível em polegadas e os valores no eixo y (ordenada) são graus relativos de segurança adotados.

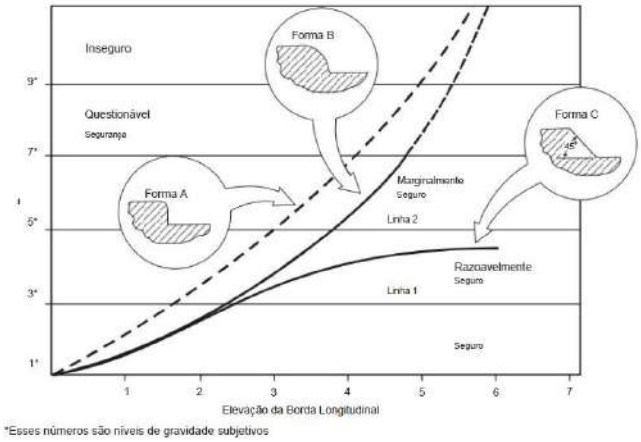


Figura 2: Graus relativos de segurança em função das condições de bordo. Fonte: adaptado de Zimmer et al. (1983).

Glennon (1987) realizou estudos e desenvolveu ábacos (Figura 3) que relacionam altura tolerável dos desníveis entre a pista e o acostamento, considerando a velocidade operacional e a geometria da via, em uma abordagem voltada à segurança viária. Elvik et al. (2009) cita que a situação de "degrau" na borda do acostamento pode apresentar riscos análogos de acúmulo de água e perda de controle. Nambisan et. al (2011) menciona que após um veículo transpor um desnível existente, o motorista tenta um retorno imediato, resultando em "tire scrubbing" (fricção da parede lateral do pneu contra a borda do pavimento), sendo que, quando o pneu finalmente atinge a superfície da faixa de rolamento, há uma perda súbita de fricção, levando à perda de controle. Abdi et al. (2015), realizou uma simulação com o software CarSim® que evidenciou que quedas em bordos de pista aumenta os incidentes de capotamento e cruzamento da pista. Bhawsar (2015) explica que o degrau na borda do pavimento representa um potencial risco à segurança, afetando a estabilidade do veículo e a capacidade do motorista de controlá-lo. Darma et. Al (2017), expõe que o degrau na borda do acostamento é o segundo maior contribuinte para mortes no trânsito da Malásia, respondendo por 15,4% das fatalidades. Sugiyanto et. al (2022) ressalta que a existência de desnível no bordo da pista é categorizada como de "risco extremo", exigindo correções imediatas, análogo a falta de sinalização de limite de velocidade ou sinais de advertência. Ferraz et al. (2023) cita que o acostamento em desnível contribui para a ocorrência de sinistros na via, correlacionando a um fator de risco com a premissa de um projeto geométrico inadequado.

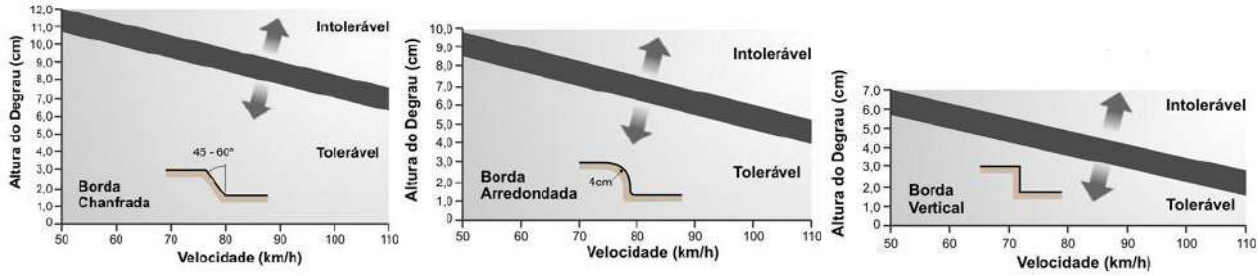


Figura 3: Alturas toleráveis em função da velocidade de forma do desnível. Fonte: Glennon (1987)

Hallmark et al. (2006) conduziram um estudo sobre desnível entre a pista e o acostamento, que incluiu a revisão de diretrizes nos Estados Unidos sobre alturas máximas aceitáveis. Os resultados indicaram que a porcentagem de sinistros vinculados a existência de desníveis variou de 0,14% a 1,24%, nos estados de Carolina do Norte, Illinois, Iowa e Missouri. Apesar dos dados, cada estado possui uma diretriz sobre as recomendações para a existência da altura do desnível entre a pista e o acostamento, não havendo uma convergência ou objetividade nos entendimentos. No Brasil, observa-se uma carência de padronização quanto ao uso de materiais, às soluções adotadas e aos critérios de transição geométrica e compatibilidade entre a faixa de rolamento e o acostamento. A Federal Highway Administration (FHWA) tem promovido a implementação da tecnologia SafetyEdge^{SM}, que consiste no tratamento das bordas do pavimento com ângulos de inclinação máximos de 30°, conforme ilustrado na Figura 4. Essa solução visa reduzir o risco de perda do controle dos veículos ao saírem da pista (FHWA, 2025).

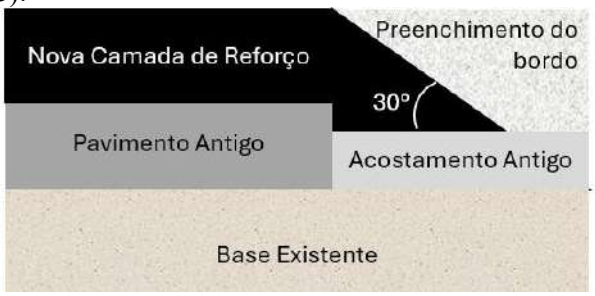


Figura 4: Detalhe da seção da solução SafetyEdge^{SM}. Fonte: adaptado de USDOT (2025).

O desnível entre as faixas de rolamento e o acostamento tem sido objeto de monitoração e análise nos contratos de concessões rodoviárias federais do Brasil. Caso a variável medida esteja fora dos parâmetros de contrato, o Manual não admite a adoção de “cunha” como solução de engenharia, ou seja, a solução de preenchimento deverá contemplar toda a largura do acostamento existente. Ao analisar os dados de sinistros monitorados pela Polícia Rodoviária Federal (PRF, 2025), é possível verificar o quanto a existência de desnível impacta com relação a sinistralidade. Conforme se verifica na Tabela 2, o registro da ocorrência de sinistros em virtude da existência de degrau se deu no início do ano de 2020. Ademais, também está representado na Tabela 2 o

percentual relativo perante as demais ocorrências registradas pelo órgão.

Tabela 2: Ocorrências de sinistros em virtude da existência de desnível entre a pista e o acostamento. Fonte: PRF.

Descrição	Quantidade de Ocorrências por Ano								
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (até março)
Acostamento em Desnível	0	0	0	19	1.560	1.901	2.050	1.680	281
Total Geral	342.497	316.638	324.192	384.641	436.524	507.204	571.052	603.215	133.268
Representatividade	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,36%	0,37%	0,36%	0,28%	0,21%

3.2. Materiais a serem empregados nos acostamentos

Cuidados devem ser tomados com relação a escolha dos materiais ou soluções a serem empregados para o tratamento com o preenchimento de acostamentos que possuem desníveis com a pista. De acordo com a Norma 151 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (IPR, 2010), considerando a viabilidade do emprego de materiais diferentes nas camadas estruturais do acostamento, deve-se garantir no mínimo que estas possuam a mesma permeabilidade das camadas equivalentes da pista de rodagem. Caso contrário, deve ser implantando um sistema de drenagem específico.

Segundo a Austroads (2021), o efeito da aplicação de uma solução com permeabilidade menor quando comparada com a dos materiais que constituem as faixas de rolamento, resulta em condições de elevada umidade nos materiais do pavimento interno, com provável aceleração da deterioração. Este confinamento pode surgir devido ao uso de materiais que foram submetidos a níveis mais altos de compactação ou pelo uso de novos materiais com menor capacidade de drenagem do que os materiais do pavimento existente. O contrário também pode ser prejudicial no caso de preenchimento de degrau em curvas externas com superelevação voltada ao bordo interno. Contudo, a permeabilidade dos materiais ou soluções a serem empregadas também deve ser objeto de análise perante as características do pavimento existente.

No Brasil, uma das soluções empregadas pelas concessionárias de rodovias federais tem sido misturas pré-misturadas a frio, utilizando usinas de microrrevestimento asfáltico para aplicação, seja em cunha ou com o preenchimento da largura completa do acostamento. Não há faixa granulométrica específica para este tipo de solução publicada em órgãos ou departamentos de controle. Inclusive, tem se utilizado o emprego de material fresado como reaproveitamento de agregados. Atenção especial deve ser dada com relação a estabilidade da mistura, onde a escolha do ligante asfáltico influi diretamente no desempenho. O emprego de emulsões asfálticas modificadas por polímero tem sido utilizado como solução nas misturas. Este procedimento fornece uma geometria de suavização do degrau existente, com ângulos que terão variação em função da altura do degrau e da largura de aplicação da solução. Cuidados devem ser tomados com relação a inclinação da solução, em atendimento aos limites previstos nas normas ou regulamentos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento do degrau entre faixas de tráfego e acostamento é um aspecto crucial para a segurança viária. As soluções geométricas e a escolha de materiais, junto com o uso de tecnologias de monitoramento representam um conjunto de estratégias que podem ser implementadas para reduzir os riscos associados a ocorrência de sinistros. Constata-se que nos Estados Unidos, houve pesquisas relevantes sobre o comportamento dos veículos quando há o traspasse de desníveis existentes entre a pista e o acostamento. Ademais, a geometria do degrau influi diretamente na recuperação segura dos movimentos. Já no Brasil, a legislação federal restringe apenas o limite de 5 cm. No entanto, em contratos de concessões de rodovias, há casos que está previsto o nivelamento completo da plataforma pavimentada, eliminando qualquer incidência de degrau nas novas obras de ampliação.

O desnível entre a borda do pavimento e o acostamento ou lateral da via, muitas vezes negligenciado, constitui um fator crítico na perda de controle de veículos, principalmente em situações de emergência ou tráfego em alta velocidade. Conforme os dados cadastrados pela Polícia Rodoviária Federal, verifica-se que os sinistros relacionados ao desnível entre a pista e o acostamento são monitorados e demandam atenção. A implementação de soluções para o tratamento não só melhora a segurança viária, mas também contribui para a infraestrutura existente. Assim, acostamentos nivelados com as faixas de tráfego promovem maior segurança ao tráfego dos usuários. Em resumo, o degrau entre a faixa de rolamento e o acostamento é um problema de segurança que deve ser evitado ou corrigido para garantir a segurança do trânsito, sendo um aspecto diretamente relacionado

à geometria e às características do pavimento. Por isso, sugere-se que a discussão sobre esse tema seja formalmente tratada em normas e manuais técnicos de pavimentação, com diretrizes claras e abordagem técnica aprofundada, tendo em vista as considerações geométricas, desempenho estrutural e materiais empregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Austroads 2021 Ltd. Level 9, 287 Elizabeth Street Sydney. Guide to Road Design Part 5A: Drainage – Road Surface, Networks, Basins and Subsurface. NSW 2000 Australia.

Bhawsar, U., Agarwal, P. K., T R, R. B., & Khan, A. B. (2015). Evaluation of Road Safety Hazardous Conditions in a Road Network. Civil and Environmental Research, 7(7), 1-10

Brasil (2023b). Policia Rodoviária Federal - Acidentes. Ministério da Justiça e Segurança Publica. [S. l.] Disponível em: https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-acidentes. Acesso em: 15 de maio de 2025.

Brasil. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. Manual de projeto geométrico de rodovias rurais – Rio de Janeiro, 1999. 195p. (IPR. Publ., 706).

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).

Brasil. Ministério Da Infraestrutura. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. Instrução Normativa Nº 16/Dnit Sede, De 11 De Maio De 2020.

Darma, Y., Karim, M. R., & Abdullah, S. (2017). An analysis of Malaysia road traffic death distribution by road environment. Sādhanā, 42(9), 1605-1615

ELVIK, Rune; HØYE, Alena; VAA, Truls; SØRENSEN, Michael. The Handbook of Road Safety Measures. 2. ed. Bingley, UK: Emerald Group Publishing Limited, 2009.

FHWA – Mitigating Edge Drop-offs with SafetyEdge℠ Technology

Glennon, J. C. Relationship Between Safety And Key Highways Features: Sate Of The Art: Effect Of Pavement/Shoulder Dropp-offs On Highway Safety. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1987. 110 p.

Hallmark, S. L., D. Veneziano, T. McDonald, J. Graham, K. Bauer, R. Patel and F. Council. Safety Impacts of

Pavement Edge Drop-offs. AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, D.C., 2006.

Ivey, DL e D. Sicking. Influence of Pavement Edge and Shoulder Characteristics on Vehicle Handling and Stability. Transportation Research Record 1084, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1986.

Lawson, W. D., and M. Shabbir Hossain. Best Practices for Pavement Edge Maintenance, Research Report, TxDOT Report No. FHWA/TX-04/0-4396-1, TechMRT: Multidisciplinary Research in Transportation, Lubbock, Tex., May 2004.

NAMBISAN, Shashi; HALLMARK, Shauna; FITZSIMMONS, Eric; MCDONALD, Tom; SPERRY, Bob; ANDERSON, David; VENCIL, Evan; ROCHE, Jerry. Lane Departure Safety Countermeasures: Strategic Action Plan for the Iowa Department of Transportation. Ames, IA: Institute for Transportation, Iowa State University, 2011. 84 p. (InTrans Project 09-349).

Sugiyanto, G., Suciningtyas, R., Indriyati, E. W., Yanto, B., Mulyono, B., & Santi, M. Y. (2022). Road Infrastructure Deficiency and Road Safety Audit at Black Spot Area in Rural Road. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1000(1), 012031.

Zimmer, RA e DL Ivey. Pavement Edges and Vehicle Stability: A Basis for Maintenance Guidelines. Transportation Research Record 946, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1983, pp. 48–56.

Luiz Manoel Sousa (luizmanoelsousa@gmail.com)
Rogério Lemos Ribeiro (rogerio.ribeiro@ufu.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia

Fatores de risco associados à Segurança Viária

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DE CONFLITO DE TRÁFEGO EM ROTATÓRIA URBANA: UM ESTUDO DE CASO

Luanna Oliveira Lima, Philippe Barbosa Silva
Instituto Federal Goiano – Rio Verde

RESUMO
Este estudo analisa conflitos de tráfego em uma rotatória urbana de Rio Verde – GO, em três dias consecutivos, nos períodos da manhã (P1) e tarde (P2). Os dados foram obtidos por meio de vídeos aéreos processados no software Data From Sky, com identificação de conflitos a partir do indicador Tempo para Colisão (TTC). Os resultados mostram que a sexta-feira concentrou a maior quantidade e gravidade de conflitos, especialmente no período da tarde. O domingo também apresentou elevados índices, com destaque para a presença de pedestres nos conflitos vespertinos. Em todos os dias e turnos, os carros foram os veículos mais envolvidos, seguidos pelas motocicletas. A participação de pedestres, embora menor, foi relevante em determinados turnos, indicando a necessidade de intervenções na infraestrutura viária para segurança de usuários vulneráveis.

1. INTRODUÇÃO

Os sinistros de trânsito seguem como uma das principais causas de morte no mundo (Organização Mundial da Saúde, 2023). Historicamente, as análises de segurança no trânsito têm se baseado em dados de sinistros já ocorridos. No entanto, essa abordagem apresenta limitações. Por se tratar de eventos raros, os sinistros exigem longos períodos de observação para gerar amostras estatisticamente representativas. Além disso, trata- se de análises reativas, uma vez que medidas de mitigação só são propostas após a ocorrência de sinistros (Mannering et al., 2020).

Nesse contexto, os estudos baseados em medidas alternativas de segurança, como os conflitos de tráfego, vêm ganhando destaque como alternativa mais sensível e proativa. Diferentemente dos sinistros, os conflitos ocorrem com maior frequência e permitem diagnósticos precoces dos riscos associados à operação viária (Tarko, 2019). O avanço das tecnologias de videomonitoramento e o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) possibilitaram a obtenção de dados visuais em alta resolução, os quais, quando combinados com algoritmos de visão computacional, permitem a extração automática das trajetórias dos veículos em interseções urbanas. Essa integração tecnológica viabiliza a identificação de conflitos de tráfego com maior precisão e em larga escala (Abdel-Aty et al., 2023).

Nesse contexto, embora os estudos baseados em conflitos de tráfego tenham avançado como alternativa complementar à análise de sinistros, ainda são pouco explorados em cidades brasileiras de médio porte. A adoção de métodos observacionais automatizados, especialmente com o uso de câmeras de videomonitoramento, pode contribuir significativamente para o diagnóstico precoce de riscos em interseções urbanas. Diante disso, este estudo tem como objetivo identificar e caracterizar os conflitos de tráfego em uma rotatória urbana da cidade de Rio Verde (GO), com base na extração automatizada das trajetórias veiculares a partir de imagens de videomonitoramento processadas por algoritmos de visão computacional. A análise considera a frequência e a severidade dos conflitos, utilizando indicadores como o Tempo para Colisão (TTC), com o propósito de subsidiar ações preventivas voltadas à melhoria da segurança viária.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O Tempo para colisão (TTC), refere-se ao indicador de conflito de tráfego mais tradicional, e refere-se ao tempo necessário para dois veículos colidirem com se continuarem na velocidade atual e no mesmo caminho (TA usado no TCT sueco é Tempo de colisão no momento em que a ação evasiva é iniciada). tomadas por um utente da estrada). Quanto menor o TTC, maior será a probabilidade de colisão. Um TTC mínimo durante uma interação (TTC min) de 1,5 s ou menos é considerado crítico; (LAURESHYN et al., 2017).

Um estudo realizado por Meirelles (2003) seguiu a abordagem sueca de análise de conflitos em cinco interseções críticas do Município de São Carlos-SP. O autor identificou os conflitos utilizando o indicador TTC. Para isso, foi realizado um processo de análise manual, medindo as velocidades por meio de um cronômetro digital. As verificações foram realizadas num período de 17 a 18 horas de estudo de tráfego, em cada interseção. Os cinco cruzamentos apresentaram dados elevados de conflitos, com destaque à interseção uma interseção com um total de 40 conflitos identificados durante esse tempo.

Já na Nigéria, (UZONDU; JAMSON e LAI, 2019) utilizaram o indicador TTC para analisar as estatísticas de

sinistros na cidade de Owerri, no estado de Imo. As verificações foram realizadas manualmente, por observadores treinados, em três cruzamentos diferentes. As análises foram realizadas por 21 horas, em cada interseção. Foi identificado 946 conflitos, sendo uma média de 45 conflitos por hora.

Na cidade de Cartagena – Colombia. Holman, Jiménez e López-Valdés (2023), realizaram o para processo observacional, para aplicação da técnica sueca de análise de conflitos de tráfego em dezessete interseções. Ao total, foram coletadas 36 horas de vídeos, em diferentes períodos do dia, no ano de 2019 e 2020. A média de conflitos de tráfego potenciais por hora foi de 242. Para o cálculo do PET (Tempo de Invadir Pós-Conflito), foi considerado um tempo de 2,09 a 2,10 segundos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma rotatória localizada em área residencial de Rio Verde (GO), nas imediações de um parque urbano com significativa circulação de pedestres. Os dias analisados foram escolhidos em função da disponibilidade de dados, correspondendo a três dias consecutivos (Dia 1, Dia 2 e Dia 3), o que possibilitou observar padrões distintos de tráfego entre dias úteis e de fim de semana. As gravações focaram nos horários de pico, definidos como Período 1 (P1) – 06h30 às 08h30 e Período 2 (P2) – 11h00 às 13h00, tais dias foram utilizados devido a disponibilidade de dados. Esses intervalos foram escolhidos por concentrarem os maiores volumes de tráfego diário.

As imagens foram processadas no software Data From Sky, que extraiu automaticamente dados de trajetória, velocidade, aceleração, além dos indicadores TTC e PET, os valores encontrados para o indicador TTC, e a severidade dos conflitos será classificada de acordo com os valores apresentados por (SAYED, 2000; SAYED; ZEIN, 1999), conforme mostrado na Tabela 01.

Tabela 1: Classificação de risco x

TTC (s)	Status
$1.5 < TTC \leq 2.0$	Baixo Risco (Potencial)
$1.0 \leq TTC \leq 1.5$	Risco Moderado (Leve)
< 1.0 segundo	Alto Risco (Grave)

Fonte: (SAYED, 2000; SAYED e ZEIN, 1999)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de risco ao decorrer dos dias pode ser vista na Figura 1.

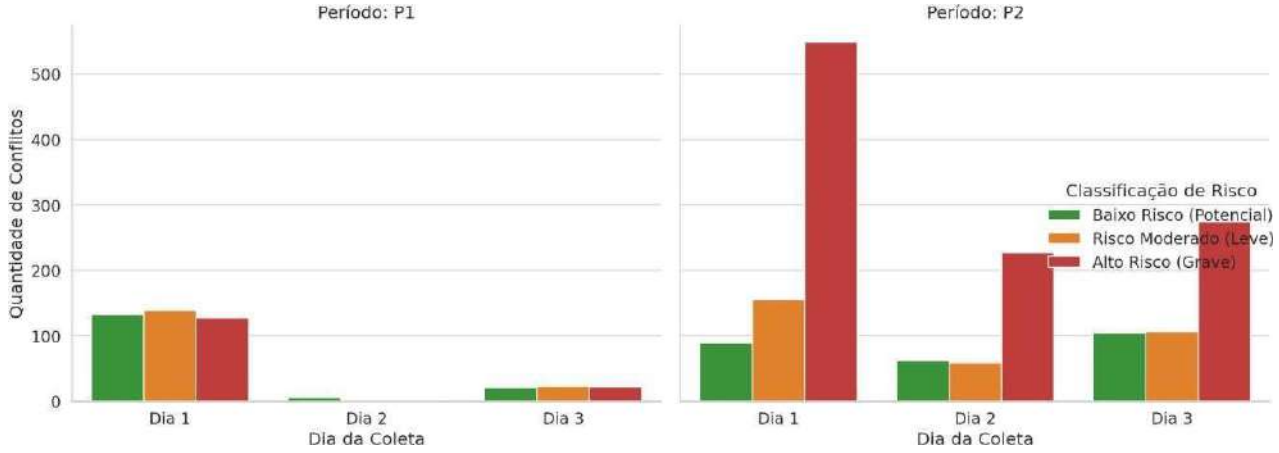


Figura 1: Gravidade dos Conflitos

Na sexta-feira (Dia 1), registrou-se o maior número de conflitos. No período da tarde, foram contabilizados 548 eventos de alto risco no sábado (Dia 2). Na manhã de sábado (Dia 2), registrou-se uma quantidade de conflitos bem inferior à observada nos outros dias, todos classificados como de baixo risco. À tarde, o número de eventos aumentou, com presença de TTCs mais curtos, porém em menor quantidade que na sexta-feira. No

domingo (Dia 3), houve aumento na gravidade, principalmente no período da tarde, com 274 conflitos classificados como de alto risco. O mapa de calor por dia e período (Figura 3) reforça esses padrões e apresentam os locais com maior incidência deconflitos.

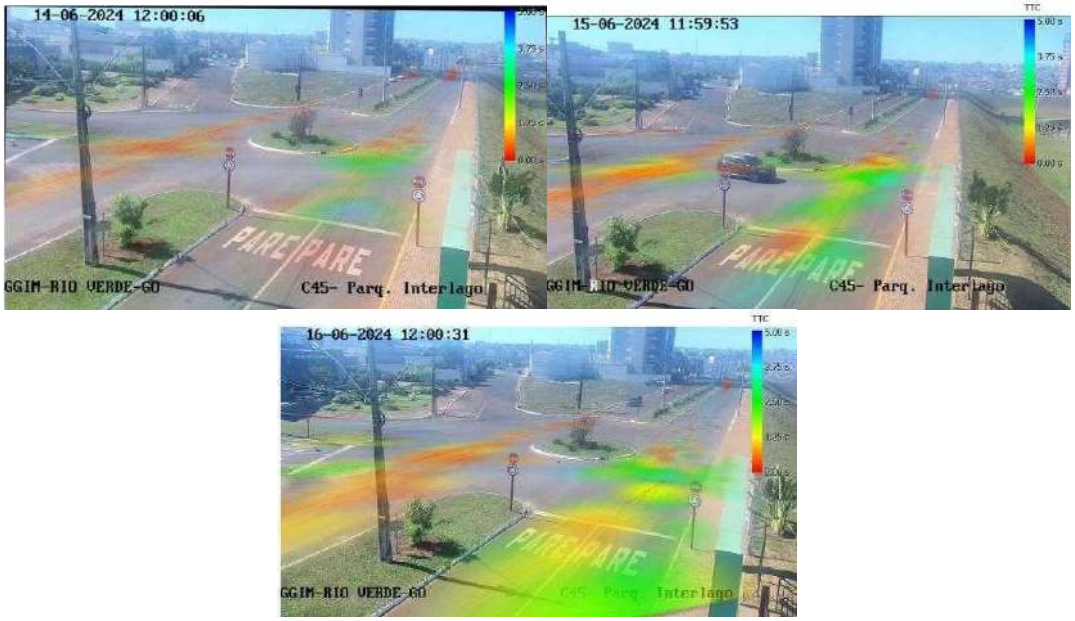


Figura 2: Mapa de calor

Quanto aos tipos de veículos envolvidos nos conflitos, em todos os horários e dias houve a predominância de conflitos entre carros, explicada pela maior proporção no fluxo da rotatória. no Dia 1, P2 81,44% ocorreram entre carros e 10,35% entre carros e motocicletas. Conflitos com pedestres não foram registrados de forma representativa neste dia.

No Dia 2, P1 os conflitos entre carros corresponderam a 82,76% dos casos, e entre carros e motocicletas, 10,63%. No domingo, Dia 3, o período da manhã contabilizou 65 conflitos, com 79,13% envolvendo carros, 9,30% entre carros e motocicletas e 7,44% com pedestres. No período da tarde, ocorreram 927 conflitos, dos quais 70,09% entre carros, 11,41% entre carros e motocicletas e 14,74% com pedestres. A presença de pedestres em conflitos no período da tarde foi superior aos demais turnos, possivelmente associada à movimentação urbana e uso de áreas públicas próximas.

Conflitos envolvendo motociclistas refletem comportamentos de risco observados, como desrespeito à sinalização e circulação em sentido contrário. O período da tarde concentrou maior número de conflitos e proporção de eventos classificados como de alto risco. Os dados indicam a necessidade de intervenções específicas para a segurança de usuários vulneráveis, especialmente em horários de maior circulação. A distribuição dos tipos de conflitos por turno e dia reforça a importância de estratégias de controle focadas na dinâmica local de tráfego.

5. CONCLUSÃO

Este estudo analisou conflitos de tráfego em uma rotatória urbana de Rio Verde – GO, ao longo de três dias, nos períodos da manhã (P1) e da tarde (P2). Os dados foram obtidos por meio de vídeos aéreos processados no software Data From Sky, com identificação dos conflitos a partir do indicador Tempo para Colisão (TTC). Os resultados mostraram que a sexta-feira concentrou a maior quantidade e gravidade de conflitos, especialmente no período da tarde. O domingo também apresentou índices elevados, com destaque para a presença de pedestres nos conflitos vespertinos. Em todos os dias e turnos, os carros foram os veículos mais envolvidos, seguidos pelas motocicletas. A participação de pedestres, embora menor, mostrou-se relevante em determinados turnos, o que indicou a necessidade de intervenções a necessidade de intervenções na infraestrutura viária para aumentar a segurança de usuários vulneráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Aty, M.; H. Yang; Y. Zhang e X. Yan (2023) Emerging technologies and methods for proactive traffic safetyanalysis: a review and future research directions. Accident Analysis & Prevention, v. 188, n. –, p. –.

Cunto, F. J. (2008) Análise de conflitos de tráfego em interseções urbanas utilizando simulação microscópica e técnicas de visão computacional. Tese (Doutorado). Programa de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo. São Carlos.

Hayward, J. C. (1972) Near-miss determination through use of a scale of danger. Highway Research Record, n. 384, p. 24–34.

Holman, D. G.; L. J. R. Jiménez e F. J. López-Valdés (2023) Evaluación de seguridad vial en intersecciones urbanas mediante la técnica de análisis de conflictos: Caso de estudio en Cartagena, Colombia. Transportation Research Procedia, v. 66, p. 352–359.

Laureshyn, A.; H. Thulin e A. Mårtensson (2017) Traffic conflict analysis using video processing: safety assessment of roundabouts. Accident Analysis & Prevention, v. 105, p. 132–139.

Mannering, F.; Q. Shi e S. Ghosh (2020) Machine learning methods for analyzing and predicting traffic accidents: a review. Accident Analysis & Prevention, v. 144, p. 105620.

Meirelles, J. R. (2003) Estudo de conflitos de tráfego em interseções urbanas com uso da técnica sueca de segurança viária. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

Organização Mundial da Saúde (2023) Relatório global sobre o estado da segurança viária 2023. Genebra: OMS.

Tarko, A. P. (2019) Use of traffic conflict techniques in road safety studies. In: Kumar, A. e P. Edara (eds.) Highway safety: fundamentals and applications. Boca Raton: CRC Press, p. 367–390.

Uzondu, A. C.; S. L. Jamson e F. C. H. Lai (2019) Application of surrogate safety measures for proactive traffic safety analysis in Nigeria. IATSS Research, v. 43, n. 3, p. 183–191.

Luanna Oliveira Lima (luanna.oliveira@estudante.ifgoiano.edu.br)
Philippe Barbosa Silva (philippe.silva@ifgoiano.edu.br)
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Rodovia Sul Goiana, km 01, S/N, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil

MONITORAMENTO DO EXCESSO DE VELOCIDADE EM VIAS DE SALVADOR E RECIFE NO ÂMBITO DA INICIATIVA BLOOMBERG PARA A SEGURANÇA VIÁRIA GLOBAL

Caio A. Torres[1], Amanda M. Conceição[1], Samille S. Rocha[1], Flávio J. C. Cunto[1], Manoel M. Castro-Neto[1], Lauren Bisi[2], Andres I. Vecino-Ortiz[2]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health

RESUMO
Este estudo apresenta uma análise do excesso de velocidade nas cidades de Recife e Salvador entre 2020 e 2024, com base em dados observacionais da Iniciativa Bloomberg para a Segurança Viária Global. Em Salvador, a prevalência caiu de 13,1% em 2020 para 5,4% em 2023, voltando a subir para 6,9% em 2024, com destaque para a redução entre motociclistas (de 24% para 16%). Em Recife, os índices variaram, caindo de 37% para 31% até 2022, mas voltando a crescer após 2023, chegando a 40% entre motociclistas. As vias coletoras concentraram os maiores percentuais de excesso de velocidade (76% acima de 30 km/h), enquanto a proporção de condutores acima dos limites recomendados pela OMS permaneceu alta em Recife. Os resultados destacam a importância do monitoramento contínuo e de intervenções sustentadas para a gestão da velocidade em ambientes urbanos.

1. INTRODUÇÃO

O excesso de velocidade é amplamente reconhecido como uma das principais causas de mortes e lesões graves no trânsito urbano (WHO, 2023). Estudos demonstram que a probabilidade de morte em um atropelamento cresce exponencialmente a partir dos 30 km/h (Tefft, 2013). A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que, em áreas urbanas, os limites de velocidade não excedam 50 km/h e que, em zonas com grande presença de pedestres, ciclistas e motociclistas, o ideal é que o limite seja de até 30 km/h (WHO, 2023).

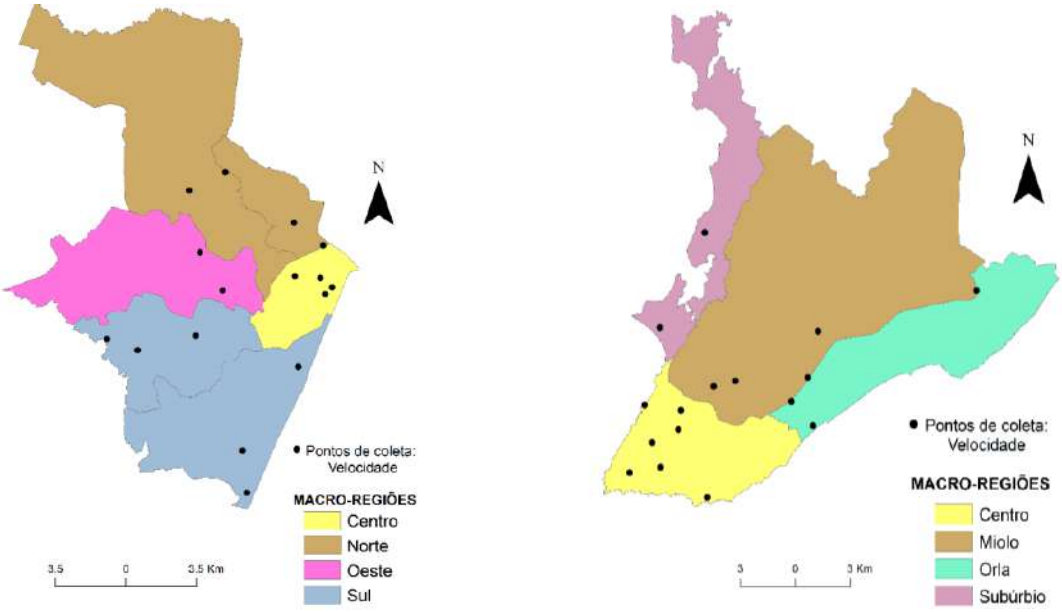
Experiências internacionais, como nas cidades de Oslo e Helsinque, demonstraram que políticas consistentes de redução de velocidade, associadas às intervenções urbanas e fiscalização eletrônica, podem levar à eliminação de mortes no trânsito (ETSC, 2022). Estratégias como a implementação de limites de velocidade mais baixos, fiscalização automatizada e o redesenho viário baseado nos princípios do urbanismo tático têm demonstrado eficácia na mitigação dos riscos da velocidade excessiva (ITF, 2022; WRI Brasil, 2023). No entanto, a implementação dessas estratégias enfrenta resistências sociais, políticas e institucionais, sobretudo em países como o Brasil, onde a priorização da fluidez veicular ainda se sobrepõe à proteção da vida (Vasconcellos, 2019).

A fim de minimizar os impactos causados no trânsito de grandes cidades em todo mundo, a *Bloomberg Philanthropies* lançou a Iniciativa Global para a Segurança Viária (BIGRS). Esse programa consiste no estabelecimento de uma rede de especialistas mundiais e líderes locais de países em desenvolvimento, dentre eles alguns países da América Latina, como o Brasil, visando a implementação de esforços para salvar vidas e proteger a população de lesões e mortes no trânsito. Em 2020, a BIGRS iniciou sua terceira fase e, até o ano de 2025, pretende promover e apoiar estratégias para a segurança no trânsito nas áreas onde o projeto vem sendo aplicado. Recife e Salvador estão entre as cidades brasileiras participantes nesta atual fase do projeto.

Esta comunicação técnica apresenta o resultado do monitoramento sistemático do excesso de velocidade nas cidades de Recife e Salvador, com base em dados observacionais. O estudo visa apoiar a formulação de políticas públicas, avaliando a eficácia de intervenções de segurança viária e identificando padrões de risco no comportamento do excesso de velocidade dos condutores de automóveis em ambas as cidades.

2. METODOLOGIA

O estudo compreendeu oito rodadas de medição da velocidade instantânea (*spot speed*) de veículos entre 2020 e 2024. Os dados foram obtidos em 30 pontos de observação distribuídos proporcionalmente à densidade de tráfego de cada cidade (Figura 1). São 16 locais em Salvador e 14 no Recife. Além disso, a segurança e o conforto dos pesquisadores de campo foi outro critério considerado, tendo sido evitados locais em áreas com problemas recorrentes de violência pública. Foram utilizados radares portáteis (*Traffic Radar™ PR1000*) para aferir as velocidades dos veículos motorizados trafegando em condições de velocidade em fluxo livre, atendendo a critérios como distância mínima para interseções, faixas de pedestre, equipamentos de fiscalização e curvas.



(a) Recife (b) Salvador

Figura 1: Localização dos pontos de pesquisa.

Os dados foram coletados em três dias da semana por ponto de coleta, sendo dois dias úteis e um no final de semana, com observações em dois turnos (manhã e tarde). Cada turno incluiu dois intervalos de contagem, totalizando 450 minutos de observação por dia. As variáveis observadas incluíram: local da coleta, dia da semana (útil ou final de semana), tipo de veículo e a velocidade registrada em km/h pelo radar portátil. Na sequência, os dados foram consolidados em planilhas de Excel para a análise exploratória e identificação de evidências. Entre as vias incluídas na amostra em Salvador, duas têm limite de velocidade de 80 km/h, duas de 70 km/h, sete de 60 km/h, três de 50 km/h e duas de 40 km/h. Nas vias incluídas na amostra do Recife, oito tem 60 km/h, uma tem 50 km/h, quatro tem 40 km/h e uma tem 30 km/h.

3. RESULTADOS

Devido às diferenças na quantidade de vias com distintos limites de velocidade regulamentados, os resultados e análises serão apresentados separadamente. Por esse mesmo motivo, a comparação direta entre os dados das duas cidades deve ser feita com cautela.

3.1 Salvador

Durante as oito rodadas de observação, foram registradas 341.912 medições de velocidade de veículos em Salvador. A prevalência geral de condutores trafegando acima dos limites regulamentares apresentou uma tendência de queda contínua até 2023, passando de 13,1% em 2020 para 5,4% na última rodada de 2023, como mostra a Figura 2. No entanto, observou-se um aumento nas duas rodadas subsequentes, em 2024, com a taxa alcançando 6,9% de excesso de velocidade.

A análise por tipo de veículo indica que os motociclistas, embora ainda liderem os percentuais de excesso, apresentaram redução de 24% para 16% ao longo do período. Entre os condutores de veículos leves, a prevalência caiu de aproximadamente 12% para 5%, enquanto os de veículos pesados permaneceram relativamente estáveis, com percentuais próximos de 3%. Os intervalos de confiança (I.C.s) de 95% das estimativas das proporções de desrespeito ao limite de velocidade em cada rodada apresentaram erros de até 0,3%, muito pequenos, devido ao grande tamanho das amostras (N).

Os dados ainda indicam que a proporção de condutores trafegando acima dos limites de velocidade recomendados pela OMS tiveram tendência geral de queda, seguida por um período de estabilização entre 2023 e 2024. Contudo, os dados evidenciam permanência de riscos significativos, sobretudo em vias coletoras, que apresentaram níveis elevados de condutores trafegando acima de 30 km/h. Os dados da última rodada por tipo de via indicam que 20% dos condutores trafegam acima de 50 km/h em vias arteriais e 76% dos condutores trafegando acima de 30 km/h em vias coletoras. Vias locais não foram observadas.

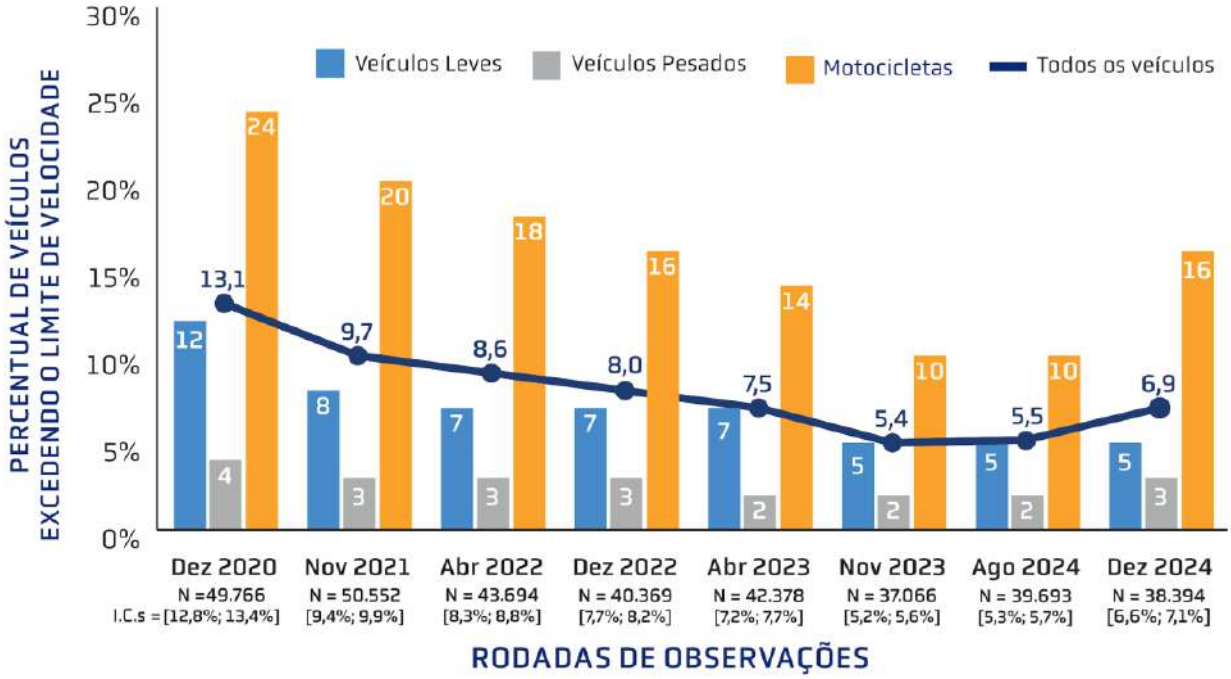


Figura 2: Resultados do monitoramento do excesso de velocidade em Salvador-BA.

3.2 Recife

No período, foram registradas 277.817 observações de velocidade de veículos na cidade do Recife. A série histórica revelou um padrão instável de excesso de velocidade, com redução entre 2020 e 2022, seguida por aumento a partir de 2023, especialmente entre veículos leves e pesados (Figura 3). A prevalência geral caiu de 37% para 31%, com flutuações ao longo das rodadas. A análise por tipo de veículo mostra que os motociclistas mantiveram os maiores índices de excesso de velocidade, variando de 31% a 49%, e alcançando 40% na última rodada de 2024. Já os veículos leves e pesados apresentaram oscilações, com tendência de alta nas rodadas finais. Assim como ocorreu em Salvador, os intervalos de confiança de 95% das estimativas das proporções de desrespeito ao limite de velocidade em cada rodada apresentaram erros de até 0,5%, muito pequenos, devido ao grande tamanho das amostras.

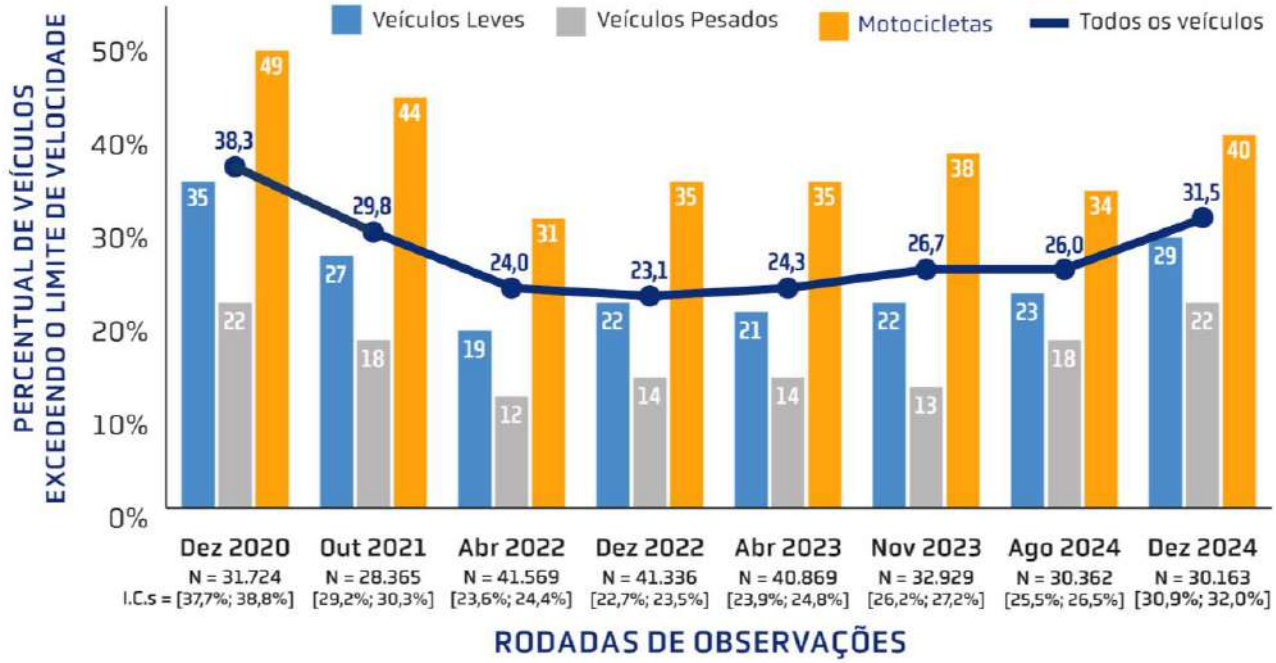


Figura 3: Resultados do monitoramento do excesso de velocidade no Recife-PE.

Apesar de uma redução inicial expressiva, a proporção de condutores trafegando acima das recomendações da OMS se manteve em patamares elevados, com variação de apenas 6 pontos percentuais (de 89% para 83%). Esse dado reforça a gravidade do problema estrutural relacionado à velocidade nas vias urbanas da cidade de Recife. A observação por tipo de via mostrou 62% acima de 50 km/h nas arteriais e 90% dos condutores trafegando acima de 30 km/h em vias coletoras ou locais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das séries históricas de excesso de velocidade observadas entre 2020 e 2024 permitiu identificar padrões relevantes de mudanças no comportamento dos condutores ao longo do tempo. Os dados revelam que, apesar de avanços, o excesso de velocidade continua representando um desafio significativo para a segurança no trânsito de Salvador e Recife, principalmente no último ano.

Em Salvador, verificou-se uma tendência de redução nos percentuais de condutores trafegando acima dos limites regulamentares e das recomendações da OMS até o final de 2023. Essa redução pode estar associada à implementação de políticas públicas voltadas à segurança viária, incluindo campanhas de comunicação, readequações de limites de velocidade e intervenções de desenho urbano, realizadas com o apoio técnico da BIGRS. Contudo, o aumento observado nas rodadas de 2024 sinaliza a necessidade de continuidade e reforço dessas ações, uma vez que os avanços obtidos podem ser comprometidos na ausência de estratégias sustentadas e continuadas no tempo.

No Recife, após uma redução inicial nos percentuais de excesso de velocidade, verificou-se um aumento dos indicadores a partir de 2023, mesmo diante do esforço de veiculação de campanhas de mídia e ações de urbanismo tático com apoio técnico da BIGRS. Essa tendência pode estar relacionada à diminuição da efetividade das ações de fiscalização ou a mudanças no uso do espaço viário. A prevalência de velocidades superiores às recomendações da OMS manteve-se elevada ao longo do período, especialmente em vias coletoras e locais, indicando limitações nas estratégias de enfrentamento adotadas. A ausência de reduções significativas aponta para a necessidade de reforço e continuidade das ações voltadas ao controle sistemático da velocidade no ambiente urbano.

Em ambas as cidades, a distribuição dos dados por tipo de veículo confirma a persistência do problema entre motociclistas, que concentraram os maiores percentuais de excesso de velocidade ao longo de todo o período em ambas as cidades. Essa condição reforça a necessidade de políticas específicas voltadas a esses usuários, dada sua vulnerabilidade e a recorrência de comportamentos de risco observados. Além disso, as vias coletoras e locais continuam apresentando índices elevados de condutores acima dos 30 km/h recomendados pela OMS, o que aponta para a urgência de intervenções estruturais nesses trechos, como implementação de medidas físicas de moderação de tráfego e reforço da sinalização vertical e horizontal.

De modo geral, os resultados reforçam a importância do monitoramento sistemático como instrumento para diagnóstico e planejamento de políticas públicas de segurança viária. A persistência do excesso de velocidade entre grupos específicos e em trechos críticos da malha urbana evidencia que, apesar de avanços pontuais, seu enfrentamento requer intervenções coordenadas, contínuas e baseadas em evidências

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e da *Johns Hopkins University.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ETSC (2022). Reducing speed-related road deaths in Europe. Brussels, Belgium: European Transport Safety Council

ITF (2022). Speed and Crash Risk. OECD Publishing. Paris, France. International Transport Forum.

Tefft, B. C. (2013). Impact speed and a pedestrian's risk of severe injury or death. Washington, D.C.: AAA Foundation for Traffic Safety.

Vasconcellos, E. A. (2019). Gestão do trânsito nas cidades brasileiras: desafios e perspectivas. Revista dos Transportes Públicos, v. 41, n. 1, p. 7–26.

WHO (2023). Global Status Report on Road Safety 2023. Genebra, Switzerland: World Health Organization.

WRI Brasil (2023). Guia para implementação de políticas eficazes de moderação de tráfego. Porto Alegre, Brasil: WRI.

Fatores de risco associados à Segurança Viária

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM INSTRUMENTO PSICOMÉTRICO PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MOTOCICLISTA EM RELAÇÃO AO RESPEITO À VELOCIDADE

Laura Gonçalves[1], Yurih Ribeiro Queiroz[1], André Luis Barcelos Matos[2], Flávio José Craveiro Cunto[2], Ingrid Luiza Neto[3]

[1] Universidade Federal do Ceará - Departamento de Psicologia, [2] Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia de Transportes, [3] Universidade Católica de Brasília.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo desenvolver um instrumento psicométrico para avaliar as crenças relacionadas ao comportamento de exceder ou respeitar os limites de velocidade nas vias. Utilizou-se como base a Teoria do Comportamento Planejado (TCP), acrescida de uma dimensão sobre percepção de risco. Inicialmente, foi desenvolvido um levantamento de crenças salientes, consistindo em um questionário aberto aplicado à 57 motociclistas. A partir dessas respostas, elaborou-se uma versão preliminar com 40 itens, submetida à validação de conteúdo em duas etapas. Os itens foram avaliados por meio do Coeficiente de Validade de Conteúdo (CVC). Após as reformulações, coletou-se uma amostra de 358 participantes. Os resultados demonstraram evidências de validade de conteúdo. Futuramente, pretende-se obter evidências de validade baseada na estrutura interna e estimativas de precisão, ao final do processo, espera-se dispor de um instrumento psicométrico válido e preciso para uso em pesquisas científicas no contexto brasileiro sobre comportamento no trânsito.

1. OBJETIVO

No Brasil, segundo o Boletim Epidemiológico do Ministério da Saúde (Brasil, 2023), 36,7% dos sinistros de trânsito ocorridos em 2023 foram motociclistas. No Ceará, de acordo com o Boletim Epidemiológico 01 (Ceará, 2023) entre 2009 e 2022 os sinistros de transporte com motociclistas representaram cerca de 62,5% dos óbitos por lesões de trânsito. Considerando a vulnerabilidade inerente ao tipo de veículo, o excesso de velocidade, quando praticado por motociclistas, destaca-se entre os demais fatores de risco (TUNNICLIFF, 2012; EYSSARTIER, 2017). Dessa forma, o fator humano, ou seja, as decisões individuais tomadas pelos condutores, é um elemento de destaque quando se busca investigar os motivos que levam os motociclistas a exceder ou respeitar a velocidade das vias. Este fator está diretamente relacionado a medidas de segurança viária e aos sinistros de trânsito. Contudo, para avaliar essa dimensão subjetiva, recorre-se a ferramentas da psicologia, especificamente da psicometria. Tais ferramentas se referem a questionários e escalas validadas com a função de avaliar construtos psicológicos de forma objetiva. Para a construção de um instrumento desse tipo, é necessário que haja um modelo teórico de base, a fim de que os resultados das medições possam ser interpretados. Nesse sentido, de modo a acessar essa dimensão tão importante para o comportamento dos motoristas, é fundamental que haja uma escala válida para o contexto brasileiro. Assim, o objetivo geral deste projeto foi elaborar um instrumento psicométrico capaz de avaliar as crenças relacionadas aos comportamentos de exceder ou respeitar a velocidade das vias de motociclistas.

2. METODOLOGIA

Antes de tudo, a pesquisa foi submetida ao Comitê de ética em Pesquisa da Universidade Federal do Ceará (CAAE: 80282024.3.0000.5054, Parecer: 6.971.904). Inicialmente, empregou-se como modelo conceitual a Teoria do Comportamento Planejado (TCP), tendo em vista sua ampla aplicação nesse contexto. A TCP avalia a intenção de emitir um comportamento a partir de um conjunto de crenças: atitude, norma subjetiva, percepção de controle e intenção. Além destas, incluiu-se também uma crença relacionada à percepção de risco, a fim de ampliar o estudo do fenômeno.

No levantamento as crenças salientes foram agrupadas nos segmentos: Crenças de Atitude, Crenças sobre Percepção de Risco, Crenças Normativas e Crenças de Controle, as respostas foram agrupadas por semelhança e padronizadas. Posteriormente foram consolidadas em tabelas de frequência, sistematizadas em grupos correspondentes aos construtos básicos da TCP e percepção de risco. As respostas com maior frequência no instrumento aberto serviram de subsídio para a elaboração dos itens questionários TCP.

O instrumento proposto na presente pesquisa manteve a mesma estratégia utilizada no instrumento aplicado por Velloso (2014), que incorporou ao estudo das crenças salientes os itens do modelo clássicos da TCP, baseando-se, também, no estudo realizado por Elliott et al. (2005). Dessa forma, seguiu-se com o levantamento do que corresponderia a cada crença para motociclistas profissionais e não profissionais. Foram realizadas aplicações de questionários de respostas abertas nos quais os respondentes deveriam informar até cinco respostas para cada item relacionado a alguma dessas crenças.

De posse da versão, iniciou-se a validação de conteúdo do questionário, a qual foi subdividida em duas

etapas. Na primeira, os itens foram avaliados por três psicólogos especialistas na área, os quais julgaram a clareza, a pertinência e a relevância desses. Esta avaliação foi feita com base na técnica desenvolvida por Hernández-Nieto (2002) utilizando o Coeficiente de Validade de Conteúdo (CVC), que é uma estimativa da concordância dos juízes tanto em relação à qualidade individual dos itens, quanto a do instrumento como um todo. Os valores do CVC variam de 0 a 1, sendo considerado o nível satisfatório de concordância os valores acima 0,80.

Na segunda etapa realizou-se o mesmo procedimento, com a avaliação realizada por 19 indivíduos da população alvo, de forma presencial, que aferiram a clareza da linguagem e entendimento dos itens. O instrumento foi respondido por meio de uma Escala Likert de sete pontos, que avalia o posicionamento do respondente através de afirmações do tipo: "concordo totalmente" a "discordo totalmente".

3. RESULTADO

Após a realização do levantamento das crenças, foi elaborada a versão preliminar do instrumento, baseada no estudo de Velloso (2014), que contém crenças salientes do contexto nacional, além de apresentar boas propriedades psicométricas. Esta proposta foi então adaptada aos motociclistas, utilizando ainda as pesquisas de Velloso (2018), Elliott (2003), Elliott et al. (2005) e Yang et al. (2019). Dos quarenta e nove itens iniciais, nove foram excluídos, oito foram adaptados e três novos itens sobre percepção de risco, com base em Yang et al. (2019), foram incluídos, conforme as crenças locais, resultando em 40 itens na versão submetida à etapa de validade de conteúdo.

Os resultados da primeira etapa da validação de conteúdo indicaram que 12 dos 40 itens apresentavam CVC < 0.80 para pelo menos uma das quatro dimensões avaliadas (Crenças de Atitude, Crenças sobre Percepção de Risco, Crenças Normativas e Crenças de Controle). Assim, esses 12 itens foram submetidos a revisão e reformulados. Em relação aos demais itens, o CVC foi > 0.80 para todas as dimensões. Na segunda etapa, apenas um item foi indicado para reformulação. A versão final do instrumento após a adaptação e validação para o contexto de circulação dos motociclistas de Fortaleza, foi aplicada a uma amostra de 358 motociclistas, cujos resultados fazem parte de uma dissertação de mestrado em andamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa efetivou o levantamento de crenças dominantes locais, elaboração e adaptação de itens, através da validação de conteúdo com especialistas e participantes da população-alvo, alcançando níveis satisfatórios de validade. O instrumento validado e proposto conta com 40 itens e apresentou evidências iniciais de validade de conteúdo, mostrando-se promissor para futuras pesquisas no contexto brasileiro sobre comportamento em relação a velocidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Elliott, M. A.; C. J. Armitage e C. J. Baughan (2005) Exploring the beliefs underpinning drivers' intentions to comply with speed limits. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 8, n. 6, p. 459–479. DOI: 10.1016/j.trf.2005.08.002

Hernandez-Nieto, R. (2002). Contributions to statistical analysis. Mérida, Venezuela: Los Andes University Press.
Velloso, M. S.; M. A. P. Jacques e C. V. Torres (2014) Estudo do comportamento do condutor em relação ao respeito à velocidade limite.

Kline, R. B. (2015). Principles and practice of structural equation modeling (4th ed.). Guilford Press.

Devellis, R. F. (2017). Scale development : theory and applications. Fourth edition ed. [s.l.] : SAGE.

Brasil, M. da S. (2023) Boletim_epidemiologico_SVSA_6_2023.pdf. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2023/boletim-epidemiologico-volume-54-no-06/view (acesso em 09/07/2025).

Ceará, S. da S. (s.d.) Boletim_Epidemiologico_ACIDENTES-DE-TRANSPORTE-2024.pdf – 1ª Edição. Disponível em:<www.saude.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/9/2018/06/Boletim_Epidemiologico_ACIDENTES-DE-TRANSPORTE-2024.pdf> (acesso em 09/07/2025).

Tunnicliff, D. J.; B. C. Watson; K. M. White; M. K. Hyde; C. C. Schonfeld e D. E. Wishart (2012) Understanding the factors influencing safe and unsafe motorcycle rider intentions. Accident Analysis & Prevention, v. 49, p. 133–141.

Laura Gonçalves (lauragoncalves@alu.ufc.br), Yurih Ribeiro Queiroz (yurih123.queiroz@gmail.com), André Luís Barcelos Matos (andreluis.matos@det.ufc.br), Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br), Ingrid Luiza Neto (ingridluizaneto@gmail.com). Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, s/n – Bloco 703 – CEP. 60455-760 – Fortaleza, CE, Brasil.

Fatores de risco associados à Segurança Viária

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ESTUDO NATURALÍSTICO DO PERFIL DE CONDUÇÃO MOTOCICLISTAS POR APLICATIVO EM FORTALEZA

Daniel Martins Carneiro , Flávio Cunto
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
A crescente popularização das motocicletas impulsionou seu uso no transporte de produtos e pessoas, combinando a mobilidade economicamente acessível com a maior vulnerabilidade desse modal no trânsito. No entanto, apesar de sua ampla utilização, ainda não há um método eficaz para descrever o comportamento natural dos motociclistas nas vias com ênfase na segurança viária. Nesse contexto, técnicas de coleta de dados naturalísticos permitem uma análise mais precisa do perfil de condução desses usuários. Esta pesquisa tem como objetivo analisar o perfil habitual de condução de motociclistas em viagens com diferentes finalidades, sob a perspectiva dos Sistemas Seguros, identificando variáveis que caracterizam esse comportamento, coletando-as de forma natural e comparando-as de acordo com o propósito da viagem. Espera-se, assim, contribuir para a definição de ações efetivas de natureza comportamental para melhorar a segurança viária dos motociclistas de acordo com seu perfil de uso.

1. PROPOSTA DE PESQUISA

A crescente demanda por mobilidade e conforto a baixo custo tornou a motocicleta um meio de transporte cada vez mais popular. Inicialmente voltadas ao lazer ou transporte pessoal, as motocicletas passaram a ser utilizadas também por entregadores de aplicativos. Segundo o Cebrap (2023), mais de 385 mil entregadores atuavam no país em 2023, sendo que para 52% deles esse era o único meio de renda. Como a remuneração é determinada pelas rotas realizadas, o incentivo à agilidade e ao maior número de entregas pode estimular comportamentos mais arriscados no trânsito.

Apesar de suas vantagens econômicas, as motos são veículos estruturalmente frágeis, com menor estabilidade e baixa proteção ao condutor. Por isso, motociclistas têm 34 vezes mais chances de morrer em sinistros do que motoristas (Lin e Krauss, 2009), liderando as estatísticas de fatalidades e gerando custos superiores a R$10 bilhões entre os anos de 1998 e 2011 (Vasconcellos, 2013).

Pesquisas mais frequentes se concentram no pós-acidente ou em simulações de condução (Espiè, 2013), sem abordar diretamente o desempenho real dos condutores. Embora formulários sejam comumente usados para essa coleta, apresentam limitações por viés de memória (Ferreira, 2014). Nesse contexto, os Estudos de Condução Naturalística (NDS) surgem como alternativa eficaz, permitindo avaliar o comportamento dos motociclistas em condições reais, por meio de veículos instrumentados (Borguezani *et al*., 2020).

A partir dessa introdução, o objetivo geral deste estudo é desenvolver uma análise do perfil habitual de condução de motociclistas em viagens com diferentes finalidades, sob a perspectiva dos Sistemas Seguros. Para tal, estão definidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir, com base na segurança viária, um conjunto de variáveis capaz de caracterizar o perfil natural de condução de diferentes tipos de motociclistas.
- Descrever o estilo de pilotagem a partir do comportamento habitual do condutor de motocicleta, de forma naturalística, considerando o contexto de condução, a dinâmica do veículo e as ações do motociclista.
- Avaliar comparativamente o estilo de pilotagem entre categorias de motociclistas para identificação das diferenças no comportamento de condução de acordo com o propósito da viagem

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O avanço das plataformas digitais intensificou o fenômeno da "uberização" (Abílio, 2019), criando uma legião de trabalhadores autônomos que arcam com os riscos e custos de suas atividades. No Brasil, este contingente já ultrapassava 1,5 milhão de pessoas em 2022, entre motoristas e entregadores (Cebrap, 2023), cuja renda depende diretamente da produtividade. Impulsionados pelo desemprego (Silva, 2008), muitos transformaram seus veículos em ferramentas de trabalho, com a motocicleta se destacando por sua economia financeira e agilidade no trânsito (Espiè, 2013; Silva, 2008). Contudo, a natureza da viagem distingue fundamentalmente o motociclista profissional do não profissional. Para o primeiro, a viagem é uma atividade de produção,

governada pela lógica de "produzir mais em menor tempo", herdeira dos modelos *just-in-time* (Diniz *et al*, 2005). Essa constante pressão por rapidez, repassada dos clientes aos condutores, resulta em fatores psicológicos adversos, como atitudes negativas em relação às leis e uma maior intenção de violá-las, o que eleva o risco de acidentes de forma mais acentuada neste grupo (Pervez *et al*., 2025).

Como resultado direto dessas pressões, emerge um comportamento paradoxal. Estudos observacionais demonstram que, embora entregadores possam apresentar maior conformidade com regras visíveis, como o uso do capacete, eles simultaneamente adotam manobras de risco para otimizar o tempo, como o *zigzagging* (Charef e Jarir, 2025) entre veículos e o uso de celular. Esse modo operatório traduz-se em riscos físicos diretos: a busca por velocidade aumenta a energia cinética de um potencial impacto, enquanto as mudanças de faixa abruptas geram acelerações laterais que elevam a probabilidade de sinistros (Diop, 2020). Essa dicotomia comportamental evidencia que o comportamento de risco pode não ser um traço de personalidade, mas uma estratégia para conciliar as demandas do trabalho com as limitações do ambiente urbano. Para compreender a fundo esse fenômeno, métodos de pesquisa tradicionais como questionários (sujeitos ao viés do respondente) ou análises de acidentes (que não capturam os fatores pré-colisão) mostram-se limitados.

Nesse contexto, os Estudos de Condução Naturalísticos (NDS) surgem como a metodologia mais adequada, permitindo a coleta de dados objetivos e contínuos sobre o piloto, o veículo e o ambiente, sem a interferência do pesquisador. Apesar de sua eficácia em captar o comportamento real dos condutores, sua aplicação em motocicletas ainda é baixa e carece de uma metodologia mais clara e padronizada (Diop, 2020). Mesmo assim, pesquisas recentes demonstram o poder desta abordagem. Em Taiwan, Hsu *et al*. (2023) usaram veículos instrumentados para mostrar que entregadores sob pressão exibem acelerações e frenagens mais bruscas. Por sua vez, Zhang *et al*. (2024), na China, concluíram que a pressão por eficiência leva os entregadores a avançarem o sinal vermelho. Juntos, esses estudos confirmam que a metodologia naturalística é capaz de registrar objetivamente como as pressões do trabalho se traduzem em comportamentos de risco específicos e mensuráveis, abrindo caminho para uma análise mais precisa do perfil de condução.

3. MÉTODO

Visando atingir os objetivos definidos, o método posposto está dividido nas seguinte quatro etapas:

3.1. Planejamento do Estudo: A primeira etapa consiste em definir de um conjunto de variáveis capaz de caracterizar o perfil natural de condução com base na segurança viária a partir da revisão da literatura, bem como determinar e validar um instrumento capaz de coletar tais variáveis de forma satisfatória. Nessa etapa também é determinado o tamanho da amostra (número de motociclistas). Além disso, o projeto é submetido ao Comitê de Ética para a liberação do início da coleta de dados.

3.2. Instrumentação e Coleta de dados: Para teste dos equipamentos, uma coleta preliminar foi realizada em um circuito controlado dentro da universidade, com o próprio pesquisador conduzindo a motocicleta, utilizando duas câmeras: uma GoPro Hero 3 posicionada para capturar a imagem do condutor e uma Hero 5 voltada para a frente da motocicleta. Durante essa coleta, foram obtidos dados de aceleração, velocidade angular, velocidade escalar e localização via GPS. Após aprovação do comitê de ética, serão escolhidos os voluntários por meio de formulários de intenção, e instrumentado seu veículo, dados registrando as variáveis de interesse durante suas rotas habituais. Para conseguir ponderar unicamente a agressividade, serão escolhidos motociclistas com padrões pessoais semelhantes (número de filhos, casamento, idade, entre outros)

3.3. Tratamento dos Dados: Os dados coletados, serão filtrados, suavizados e organizados em um banco de dados para mensurar o comportamento dos motociclistas com base em seus padrões de pilotagem.

3.4. Análise Comparativa: Por fim, as informações coletadas serão comparadas entre si para determinar suas diferenças de acordo com o propósito da viagem no contexto da segurança viária. Serão avaliadas diferenças entre o perfil de velocidade, padrão de aceleração, inclinação da motocicleta, dentre outras variáveis. Deverão ser empregadas técnicas estatísticas como Clustering Hierárquico Aglomerativo para agrupar pilotos com base em suas similaridades (Bartolozzi *et al*. 2023), acrescidos de Modelos Lineares de Efeitos Mistos para comparar a performance de frenagem (Huertas-Leyva *et al*.,2019), entre outras técnicas estatísticas.

4. RESUTADOS PRELIMINARES

Os resultados do estudo piloto, conduzido em um percurso experimental de 6 km em circuito fechado com 21

curvas no Campus do Pici – UFC, revelaram distinções dinâmicas entre os perfis de condução. O modo de pilotagem "Agressivo" registrou uma velocidade escalar média superior (38 km/h contra 28 km/h) e uma faixa de aceleração longitudinal substancialmente mais ampla (-2,5 em frenagens a 6 m/s² em acelerações), em comparação com o modo "Calmo" (-1 a 3 m/s²). Essa diferença se manifestou na aceleração resultante sobre o condutor: o perfil "Agressivo" gerou 321 instantes com valores superiores a 0,5g, atingindo um pico de 1,63 g, enquanto o perfil "Calmo" registrou 194 desses momentos, com um valor máximo de 0,97g.

Adicionalmente, observou-se uma diferença nas estratégias de abordagem de curvas. Em curvas em alta, ou maior raio, o perfil "Agressivo" tendeu a contorná-las sem frenagem, resultando em maior força centrípeta e, consequentemente, em mais eventos de alta aceleração resultante. Em contraste, nas curvas de raio reduzido, ou em baixa, este mesmo perfil apresentou frenagens mais intensas que o modo "Calmo", o que também elevou a ocorrência de picos de força G. Em ambos os tipos de curva, a condução agressiva foi caracterizada por uma menor utilização do guidão (menor ângulo de esterçamento) e um maior ângulo de inclinação da motocicleta, indicando uma pilotagem que prioriza a dinâmica corporal do piloto para realizar as manobras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abílio, L. C. (2019) Uberização: Do empreendedorismo para o autogerenciamento subordinado. *Psicoperspectivas*, v. 18, n. 3, p. 41–51. DOI: 10.5027/psicoperspectivas-vol18-issue3-fulltext-1674

Bastos, J. T.; J. R. Borguezani; P. A. B. dos Santos e F. dos S. Osório (2020) Plataforma de coleta de dados naturalísticos de segurança viária. In *Anais do 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. 100% Digital: ANPET, p. 2610–2617.

Bartolozzi, M.; A. Boubezoul; S. Bouaziz; G. Savino e S. Espié (2023) Understanding the behaviour of motorcycle riders: An objective investigation of riding style and capability. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*.

Cebrap (2023) *Mobilidade urbana e logística de entregas: um panorama sobre o trabalho de motoristas e entregadores com aplicativos*. São Paulo: Centro Brasileiro de Análise e Planejamento.

Charef, A. e Jarir, Z. (2025) Impact of delivery and private Riders' roles on safety behavior in Marrakech Morocco. *Results in Engineering*, v. 26, p. 105371. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105371

Diop, M.; A. Boubezoul; L. Oukhellou e S. Espié (2020) Powered Two-Wheeler Riding Profile Clustering for an In-Depth Study of Bend-Taking Practices. *Sensors*, v. 20, n. 22, p. 6696. DOI: 10.3390/s20226696

Diniz, E. P. H.; A. Á. Assunção e F. de P. A. Lima (2005) Por que os motociclistas profissionais se acidentam? Riscos de acidentes e estratégias de prevenção. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 30, n. 111. DOI: 10.1590/S0303-76572005000100005

Espié, S.; A. Boubezoul; S. Aupetit e S. Bouaziz (2013) Data collection and processing tools for naturalistic study of powered two-wheelers users' behaviours. *Accident Analysis and Prevention*, v. 58, p. 330-339. DOI: 10.1016/j.aap.2013.03.012

Ferreira, P. C. P.; M. P. de S. Santos e C. D. Nassi (2014) Análise comportamental de motociclistas brasileiros no trânsito urbano. In *Anais do XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Curitiba: ANPET, p. 1-11.

Huertas-Leyva, P.; M. Nugent; G. Savino; M. Pierini; N. Baldanzini e S. Rosalie (2019) Emergency braking performance of motorcycle riders: skill identification in a real-life perception-action task designed for training purposes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 63, p. 93-107.

Hsu, C.-K.; T.-C. Lee e K. I. Wong (2023) Kinematic characterization of risky riding behavior of on-demand food-delivery motorcyclists in Taiwan. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2677, n. 12, p. 543-559. DOI: 10.1177/03611981231168837

Lin, M.-R. e J. F. Kraus (2009) A review of risk factors and patterns of motorcycle injuries. *Accident Analysis and Prevention*, v. 41, n. 4. DOI: 10.1016/j.aap.2009.03.010

Pervez, A.; D. Q. Nguyen-Phuoc; N. X. Mai; D. Q. N. Vo e J. J. Lee (2025) Understanding motorcycle crash involvement: Insights from regular motorcyclists and food delivery riders in Vietnam. *Accident Analysis and Prevention*, v. 216, p. 108024. DOI: 10.1016/j.aap.2025.108024

Silva, D. W. da; S. M. de Andrade; D. A. Soares; E. de F. P. de A. Nunes e R. Melchior (2008) Condições de Trabalho e Riscos no Trânsito Urbano na Ótica de Trabalhadores Motociclistas. *Physis: Revista de Saúde Coletiva*, v. 18, n. 2, p. 339-360. DOI: 10.1590/S0103-73312008000200009

Vasconcellos, E. A. (2013) *Risco no trânsito, omissão e calamidade: impactos do incentivo à motocicleta no brasil*. Barueri: Manole.

Zhang, Z.; Z. Liu e J. Chen (2024) Exploration of riding behaviors of food delivery riders: A naturalistic cycling study in Changsha, China. *Sustainability*, v. 15, n. 23, p. 16227. DOI: 10.3390/su152316227

Daniel Martins Carneiro (daniel.carneiro@det.ufc.br)
Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, s/n – Bloco 703 – CEP. 60455-760 – Fortaleza, CE, Brasil

MODELAGEM E MICROSSIMULAÇÃO ESPACIAL HÍBRIDA NA AVALIAÇÃO DE RISCOS PARA USUÁRIOS VULNERÁVEIS (VRUS) DE VIAS URBANAS

Pedro Henrique Valentim Cezar, Josiane Palma Lima
Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
O escopo deste trabalho é estudar os riscos aos usuários vulneráveis (VRUs) das vias urbanas. A modelagem e simulação computacional é uma ferramenta importante para a análise comportamental dos usuários e para o entendimento dos riscos que estão sujeitos. O objetivo do trabalho é desenvolver um modelo computacional híbrido para avaliar os riscos de usuários vulneráveis (VRUS) de vias urbanas. Adotando uma abordagem quantitativa baseada em dados reais de tráfego e infraestrutura, e utilizando técnicas computacionais, este estudo busca desenvolver um modelo para evidenciar as interações de pedestres e ciclistas com o ambiente de fluxo motorizado em vias urbanas. Será utilizada a microssimulação espacial híbrida com abordagem baseada em agentes (SBA) com foco na análise de dados reais em cruzamentos críticos selecionados. O modelo será calibrado com indicadores de desempenho e ajustado conforme a literatura. A validação do modelo envolve testes de sensibilidade estatística e experimentos de cenários que analisam intervenções futuras, quantificando os riscos dos usuários. A técnica se mostra promissora para diagnósticos de segurança viária e suporte à decisão para o setor de mobilidade urbana.

1. PROPOSTA DE PESQUISA

A investigação sobre a segurança viária, especialmente em cruzamentos das vias urbanas, é uma questão central nas discussões sobre a promoção da mobilidade urbana e do desenvolvimento sustentável nas cidades, especialmente quando se considera a proteção dos usuários vulneráveis das vias urbanas ou 'VRUs' (do inglês, *Vulnerable Road Users*), que incluem pedestres, ciclistas e motociclistas. Esses grupos são particularmente suscetíveis a acidentes devido à falta de proteção física em comparação com os ocupantes de veículos motorizados (NATIONAL ROAD SAFETY STRATEGY, 2021). No Brasil, estima-se que 60% dos acidentes que envolvem atropelamentos em áreas urbanas ocorram em interseções (CONAS, 2024). Para Hultkrantz *et al.* (2006), o sistema de trânsito deve ser projetado de modo a prevenir acidentes quando estes levarem a fatalidades ou ferimentos graves. Além disso, iniciativas que promovem o uso compartilhado de outros modais de transporte, como bicicletas e *scooters* elétricas, devem ser acompanhadas por estratégias adequadas que possam garantir que esses novos modais sejam integrados com segurança à rede viária existente (Sacchi *et al*., 2015).

Diante do contexto, propõe-se o desenvolvimento de um modelo computacional híbrido de microssimulação espacial, com utilização de lógica de tomada de decisões baseada em simulação por agentes (SBA), que buscará maximizar métricas de segurança viária para VRUs. Para alcançar os resultados, o objetivo do trabalho é desenvolver um modelo computacional híbrido para avaliar os riscos de usuários vulneráveis (VRUS) de vias urbanas. Este estudo busca desenvolver um modelo para evidenciar as interações de pedestres e ciclistas com o ambiente de fluxo motorizado em vias urbanas. Como objetivos específicos têm-se:

- Caracterizar os cenários de riscos em cruzamentos selecionados, por meio de análise de métricas como, tempo para colisão, tempo após interação potencialmente perigosa e invasões de áreas críticas;
- Avaliar intervenções através de experimentos de validações estatísticas, como análises de sensibilidade, comparando cenários atuais e propostos, qualificando os possíveis riscos para VRUs;
- Verificar a eficácia da técnica de simulação híbrida para estudo de comportamentos de usuários vulneráveis.

2. REFERENCIAL

Por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL), é identificado o crescimento da utilização de ferramentas computacionais na análise da segurança viária urbana. *Softwares* de microssimulação do tráfego, são frequentemente utilizados para modelar fluxos complexos e avaliar cenários de intervenção (Abideen *et al*., 2020; Cui *et al*., 2024). Além disso, técnicas de inteligência artificial, especialmente redes neurais e visão computacional, vêm sendo aplicadas para prever riscos de colisões no trânsito e detectar comportamentos inseguros no ambiente viário (Wang *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2023).

O ambiente construído e sua interação com o fluxo de pedestres são abordados em pesquisas desenvolvidas de

forma a entender como a existência de infraestrutura adequada impacta na possibilidade de ocorrer acidentes de trânsito em determinados cruzamentos mais do que em outros. As formas geométricas das vias, a existência de calçadas, ciclovias e ciclofaixas, iluminação pública, tipos de pavimentos, entre outros, estão relacionados aos riscos diversos que os usuários vulneráveis das vias urbanas (VRUs) estão expostos, dentro do contexto de segurança das vias (Okaidjah *et al*., 2022; Pan *et al*., 2022; Castro *et al*., 2018; Wang *et al*., 2019; Sacchi *et al*., 2018). No entanto, nota-se que ainda são escassos os estudos que integram essas tecnologias de forma híbrida, associando percepção automatizada em tempo real a modelos comportamentais em ambientes simulados, por exemplo (Ma *et al*., 2022). Outras lacunas identificadas na literatura também persistem no que diz respeito à representação adequada do comportamento de pedestres e ciclistas, muitas vezes tratados de forma genérica ou secundária em relação ao tráfego motorizado (Sacchi *et al*., 2015; Wang *et al*., 2021). Nesse sentido, estudos recentes como o de Silva *et al.* (2023), que demonstra a eficácia de microssimulações híbridas para análises de conflitos pedestres-veículos, bem como o de Gonzalez *et al.* (2025) que propõe métricas adaptativas de riscos para ciclistas em interseções multifuncionais, podem servir de base metodológica para o desenvolvimento da presente proposta de pesquisa.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Com base em dados primários e secundários coletados no município de Itajubá-MG, por meio de análises de imagens de câmeras de segurança pública, são selecionados os cruzamentos a serem estudados. Dentre os critérios para determinação dos locais de estudo, destaca-se que os cruzamentos selecionados devem apresentar elevado fluxo de VRUs (pedestres e ciclistas) e veículos motorizados, além de deficiências que possam ser visíveis existentes na infraestrutura das travessias. As contagens de tráfego são realizadas em dias úteis (segunda à sexta-feira), nos períodos de pico, sendo na parte da manhã das 07:00h às 10:00h e na parte da tarde das 16:00h às 19:00h, utilizando-se dados reais de imagens de câmeras de monitoramento, disponibilizados pelo departamento de segurança da Guarda Civil Municipal. A Figura 1 apresenta o fluxograma base para o desenvolvimento do modelo computacional.

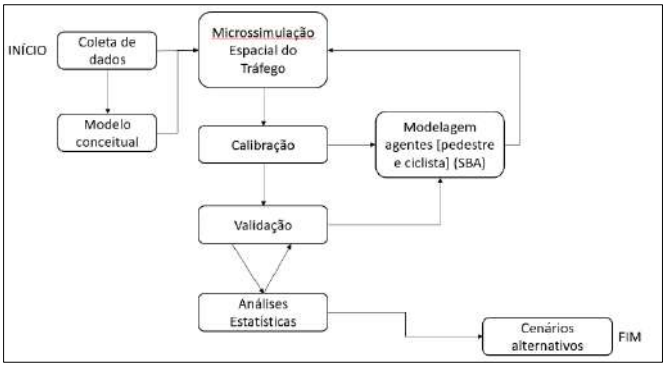


Figura 1 – Etapas para o desenvolvimento do modelo computacional de simulação.

A modelagem computacional é elaborada em ambiente virtual dedicado à microssimulação de tráfego, com base na geometria real do local e parâmetros ajustados conforme observações empíricas durante a análise das imagens de câmera dos cruzamentos estudados. A abordagem da metodologia apresenta caráter híbrido, escolhido justamente por possibilitar que o modelo computacional considere o comportamento de pedestres e ciclistas por meio de regras comportamentais e psicofísicas, realizada por meio do 'modelo de força social' de Helbing e Mölnar (1995), com o fluxo veicular motorizado sendo controlado pelo modelo de Wiedemann 99, além de lógica de tomada de decisão baseada em simulação por agentes (SBA), ambas abordagens presentes em ambientes virtuais dedicados à microssimulação de tráfego. São simulados cenários com diferentes tempos de sinalização e volume de tráfego para avaliar os efeitos sobre indicadores como tempo de espera, número de travessias inseguras e interações de risco que possam ocasionar colisões. A validação do modelo computacional desenvolvido é realizada através de análises estatísticas de sensibilidade, que conforme identificado na RSL, pode ser uma técnica promissora e valiosa, quando em complemento com a microssimulação, para gestores do tráfego e tomadores de decisão sobre segurança viária.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Ao propor uma representação de forma mais realista do comportamento de pedestres e ciclistas, é possível que

o modelo computacional híbrido desenvolvido contribua de forma eficaz para o desenvolvimento de políticas públicas mais sensíveis às necessidades desses grupos. A integração futura com técnicas de visão computacional representa um avanço metodológico relevante, ampliando a capacidade preditiva e adaptativa de modelos computacionais simulados. Com isso, a presente proposta de tese avança na direção do desenvolvimento de sistemas urbanos mais seguros e responsivos, contribuindo com a promoção da mobilidade urbana sustentável local.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DETRAN-SP. Dados viários Portal Infosiga. *Departamento de Trânsito de São Paulo*. São Paulo: Detran-SP, 2024.

CONAS - Conselho Nacional de Secretários de Saúde. *Dados sobre acidentes no Brasil*. Disponível em: https://www.conas.org.br/.

Cui, P., Yang, X., Abdel-Aty, M., Zhang, J., & Yan, X. (2024). Advancing urban traffic accident forecasting through sparse spatio-temporal dynamic learning. *Accident Analysis and Prevention*, 200, 107564.

Hultkrantz, L., Lindberg, G. & Andersson, C. O valor da segurança rodoviária melhorada. *J Risk Uncertainty* 32, 151–170 (2006). https://doi.org/10.1007/s11166-006-8291-z.

Gonzalez, Ana C.; Martins, Pedro S.; Rocha, Bruno T. Adaptive Risk Metrics for Cyclists at Multifunctional Intersections. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL URBAN PLANNING AND URBAN MANAGEMENT (CUPUM), 13, 2025, Manchester. *Proceedings…* Manchester: AMPS Press, 2025. p.78–89.

Jiang, X. G., et al. (2017). Safety assessment of signalized intersections with through-movement waiting area in China. *Safety Science*, 95, 28–37. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.01.013.

Li, Y., Abdel-Aty, M., Yuan, J., Cheng, Z., & Lu, J. (2020). Analyzing traffic violation behavior at urban intersections: A spatio-temporal kernel density estimation approach using automated enforcement system data. *Accident Analysis & Prevention*, 141, 105509. https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105509.

Ma, Y., Liu, Y., & Wang, J. (2022). Pedestrian detection in low-resolution and occluded scenes via super-resolution GAN. *Multimedia Tools and Applications*, *81*(18), 25893–25910. https://doi.org/10.1007/s11042-022-12628-9.

NATIONAL ROAD SAFETY STRATEGY. *Statistics on road safety and vulnerable road users*. Disponível em: https://www.nationalroadsafetystrategy.ca/.

Okaidjah, D., Haddad, M., Day, C., & Das, B. (2023). Spatial Analysis of Relationships Between Intersection Safety, the Urban Built Environment, and Average Income Level: A Case Study of Des Moines. *Transportation Research Record*, 2677(2), 803–817. https://doi.org/10.1177/03611981221108392.

Pan, H., Wang, Y., & Szűcs, G. (2022). Occupational road traffic accidents and aberrant driving behaviors among taxi and full-time transport drivers: A comparative study. *Transportation Letters*, 15(10), 1366–1375. https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2157075.

Sacchi, E., Sayed, T., Osama, A. (2015). Developing crash modification functions for pedestrian signal improvement. *Accident Analysis and Prevention*, 83, 47–56. https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.07.009.

Silva, João F.; Pereira, Maria L.; Santos, Lucas R. Pedestrian–Vehicle Conflict Analysis Through Hybrid Microsimulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL URBAN PLANNING AND URBAN MANAGEMENT (CUPUM), 12, 2023, Delft. *Proceedings…* Delft: TU Delft, 2023. p.45–56.

Tageldin, A., Sayed, T., & Shaaban, K. (2017). Comparison of time-proximity and evasive action conflict measures: Case studies from five cities. *Transportation Research Record*, 2661(1), 19–29.

Ui Abideen, Z., Sun, H., Yang, Z., & Ali, A. (2020). The Deep 3D Convolutional Multi-Branching Spatial-Temporal-Based Unit Predicting Citywide Traffic Flow. *Applied Sciences*, 10(21), 7778. https://doi.org/10.3390/app10217778.

Vuong, X. C., Mou, R. F., Vu, T. T., Tran, V. H., & Nguyen, C. T. (2021). A Safety Evaluation Model of Intersections under Mixed Traffic Conditions Using Traffic Conflicts and Cloud Model. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 5899673. https://doi.org/10.1155/2021/5899673.

Wang, F., Li, K., Shao, C., Zhang, J., Li, B., & Han, N. (2022). Optimisation of signal timing at intersections with waiting areas. *Promet – Traffic & Transportation*, *34*(2), 195–209.

Zhang, L., Wang, Q., & Li, B. (2023). A comparative study of deep learning models for multi-class road user detection. *Journal of Real-Time Image Processing*, *20*(4), 81–98. https://doi.org/10.1007/s11554-023-01314-8.

Zhao, M., Liu, C., Li, W., & Sharma, A. (2017). Multivariate Poisson-lognormal model for analyzing accidents at signalized urban intersections. *Journal of Transportation Safety & Security*, 10(3), 251–265. https://doi.org/10.1080/19439962.2017.1323059.

Zhou, S.; Sun, J.; An, X.; Li, K. (2011). The development of a conflict hazardous assessment model for evaluating urban intersection safety. *Transport*, 26(2), 216–223.

Pedro Henrique Valentim Cezar (pedrohvalentim@unifei.edu.br)
Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-MG, Brasil.

Josiane Palma Lima (jplima@unifei.edu.br)
Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-MG, Brasil.

QUEIMADAS E INCÊNDIOS FLORESTAIS COMO FATORES TELEACOPLADOS DE RISCO CLIMÁTICO NA SEGURANÇA VIÁRIA

Anelise Schmitz [1, 2], Tatiana Maria Cecy Gadda [2]
[1]Universidade Federal do Paraná, [2]Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO
A pesquisa tem como objetivo analisar as queimadas e os incêndios florestais como fatores teleacoplados de risco climático que impactam diretamente a segurança viária. A intensificação de eventos extremos, como incêndios, tem gerado desafios logísticos, ambientais e de segurança viária, especialmente devido à redução da visibilidade e ao aumento de atropelamentos de fauna. A metodologia integra revisão bibliográfica, simulações e análises estatísticas e espaciais para mapear áreas críticas, quantificar os impactos e estabelecer relações causais entre a presença de fumaça e a ocorrência de sinistros de trânsito. Os resultados esperados incluem um diagnóstico espacial detalhado, contribuições teóricas sobre teleacoplamentos e recomendações para políticas públicas de mitigação de riscos ambientais e de segurança viária.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transportes, essencial para a mobilidade e o abastecimento, enfrenta desafios crescentes diante de eventos extremos, resultantes das alterações climáticas, como inundações, secas, ondas de calor e incêndios florestais (Silva *et al.*, 2023). Tais eventos comprometem a integridade das vias, elevam os custos operacionais e aumentam o risco de sinistros de trânsito. Embora fatores ambientais como chuva e neblina sejam fatores que reconhecidamente afetam a segurança viária (Shahid & Minhans, 2016), os efeitos de fenômenos extremos, ainda precisam ser mais explorados, especialmente em regiões que historicamente não enfrentavam esses problemas.

As florestas, por sua conexão com dinâmicas humanas e mudanças globais, são vulneráveis a riscos emergentes, como incêndios e alterações climáticas (Liu, 2013; Moreno-Fernández *et al.*, 2021). Nesse sentido, o conceito de teleacoplamento oferece uma estrutura útil para analisar sistemicamente essas interações em múltiplas escalas (Sun *et al*., 2017), revelando como eventos locais, como incêndios, podem gerar impactos logísticos e de segurança em regiões distantes (Liu, 2013; Simpson *et al*., 2021). Assim, a compreensão dos teleacoplamentos permite analisar esses impactos globais, identificar lacunas de recursos e promover estratégias sustentáveis (Qi *et al*., 2023). O desmatamento possui padrões espaciais que impactam de forma diversa diferentes regiões (Trigueiro *et al.*, 2020). Queimadas às margens de rodovias reduzem a visibilidade, comprometem a fauna e prejudicam cadeias logísticas. Incêndios, agravados pela seca e falta de fragmentação do material combustível, se propagam com facilidade na ausência de barreiras naturais (Martínez-Valderrama *et al*., 2021). Além dos danos à biodiversidade e ao ar, causam fuga e morte de animais, inclusive por atropelamento (Breder *et al*., 2020; Keller & Lima, 2018). A fumaça reduz a visibilidade, aumenta os riscos de colisões, afeta o estado físico dos motoristas e pode danificar o pavimento e sinalizações, além de comprometer a aderência dos pneus à pista (Hossain *et al*., 2024).

Durante incêndios, uma malha viária conectada facilita evacuações seguras (Niu *et al*., 2022). No entanto, a resiliência da infraestrutura rodoviária ainda é pouco considerada, apesar de sua relevância em situações críticas (Arango *et al*., 2023). Estudos recentes têm investigado evacuações em cenários de incêndios. Por exemplo, Rohaert *et al*., (2025) observaram que a baixa visibilidade reduz a velocidade, mas não altera o espaçamento entre veículos; Kalogeropoulos *et al*., (2025) propuseram limites críticos de evacuação; Ohi & Kim, (2024) desenvolveram modelos para otimizar o acolhimento de comunidades afetadas. Estudos específicos sobre a fumaça de incêndios florestais e seu impacto no comportamento de condução indicam que ela reduz a velocidade de evacuação (Intini *et al*., 2022; Rohaert *et al*., 2025; Wetterberg *et al*., 2021). Ma & Lee, (2025) propuseram uma modelagem baseada em agentes para simular evacuações em redes rodoviárias afetadas.

A dispersão espacial e temporal da fumaça (Freitas *et al*., 2009) e seus derivados, como fuligem, impactam a qualidade do ar e a visibilidade mesmo após o fim dos incêndios (Di Virgilio *et al*., 2021). No Brasil, a Polícia Rodoviária Federal (PRF) tem alertado sobre os riscos de queimadas às margens das rodovias durante os períodos de estiagem, destacando a redução da visibilidade, danos à sinalização e atropelamentos de fauna (PRF, 2024). Isso reforça a necessidade de considerar a formulação de políticas de segurança à luz destas

tendências. Desta forma, o objetivo proposto é analisar as queimadas e incêndios florestais como fatores teleacoplados de risco climático que impactam a segurança viária, destacando a importância dos teleacoplamentos para uma compreensão integrada das vulnerabilidades e interdependências regionais.

2. ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem metodológica foi dividida em três partes: (i) exploração dos aspectos relacionados ao teleacoplamento, em áreas de queimadas e incêndios florestais e sua influência negativa na segurança viária, buscando definições e exemplos, por intermédio de pesquisa bibliográfica, assim criando uma framework com a relação do conceito de teleacoplamento, os eventos extremos e sua causa-efeito, especialmente no aspecto segurança viária; (ii) simulação de impactos para o meio ambiente desses eventos extremos e que representam risco não só ao meio ambiente, mas também desencadeiam as causas de sinistros de trânsito por fumaça que influencia diretamente a segurança viária, caracterizada pela projeção de áreas e ocorrências, mapeando essas áreas próximas às rodovias e área de influência de fogo e fumaça; (iii) simulação em softwares e determinação de áreas críticas, com associação das técnicas espaciais de análise de sinistros de trânsito, análise estatística descritiva, multicritério e espacial de dados de forma a avaliar as ocorrências de sinistros de trânsito, especialmente as causadas por fumaça e atropelamento de fauna em rodovias e explorar as áreas de queimadas e incêndios florestais e suas causas e consequências teleacopladas.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se realizar um diagnóstico aprofundado das áreas com risco de queimadas e incêndios florestais. Pretende-se identificar zonas críticas, caracterizar os padrões espaciais e temporais das queimadas e compreender os fatores que contribuem para a sua distribuição e a interferência na ocorrência de sinistros de trânsito. Nesse contexto, a contribuição da tese para o avanço do estado da arte se dará por meio da geração de evidências científicas que articulam os conceitos de risco, vulnerabilidade, teleacoplamentos, ocorrências e impactos, aplicados à problemática das queimadas e incêndios florestais. A investigação também terá um foco específico na análise dos efeitos indiretos das queimadas sobre a segurança viária, com ênfase na relação entre a presença de fumaça nas rodovias e a ocorrência de sinistros de trânsito. A partir da obtenção de dados da PRF, com recorte para registros que indiquem a fumaça e atropelamento de fauna como fator causal ou contribuinte, para identificar padrões de ocorrência, frequência, tipos de sinistros, gravidade e número de vítimas envolvidas. Por fim, serão criados mapas temáticos que representarão a evolução temporal e espacial das áreas queimadas, os focos de fumaça e os pontos de maior incidência de sinistros de trânsito associados. Esses produtos analíticos contribuirão para uma compreensão mais ampla dos impactos locais e globais das queimadas, demonstrando como ações antrópicas localizadas podem desencadear efeitos locais, em escala regional e nacional. Em síntese, a tese visa produzir subsídios técnicos e científicos que possam orientar políticas públicas de prevenção, mitigação de riscos ambientais e promoção da segurança viária. A pesquisa apresenta limitações quanto às bases de dados, restritas às ocorrências da PRF em rodovias federais, dificultando análises em rodovias estaduais. Há também limitação temporal, já que a causa “fumaça” só passou a ser registrada a partir de 2020. Antes disso, os registros eram genéricos, descritos apenas como “restrições à visibilidade”.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq”, chamada pública CNPq Nº 18/2024 e à “Fundação Araucária”, chamada Pública 23/2024.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arango, E., Nogal, M., Sousa, H. S., Matos, J. C., & Stewart, M. G. (2023). GIS-based methodology for prioritization of preparedness interventions on road transport under wildfire events. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *99*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104126

Breder, A. D., Lobosco, A. A. F., & Moura, H. R. D. (2020). Os incêndios florestais na área rural da RJ 130 de 2014 a 1017 / Forest fires in the rural area from RJ 130 of 2014 to 1017. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, *3*(4), 3147–3153. https://doi.org/10.34188/bjaerv3n4-034

Di Virgilio, G., Hart, M. A., Maharaj, A. M., & Jiang, N. (2021). Air quality impacts of the 2019–2020 Black Summer wildfires on Australian schools. *Atmospheric Environment*, *261*. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118450

Freitas, S. R., Longo, K. M., & Rodrigues, F. (2009). MODELAGEM NUMÉRICA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ATMOSFERA E SEUS IMPACTOS NO TEMPO, CLIMA E QUALIDADE DO AR. In *Revista Brasileira de Meteorologia* (Issue 2). http://wrf-model.org

Hossain, S., Maggi, E., & Vezzulli, A. (2024). Factors influencing the road accidents in low and middle-income countries: a systematic literature review. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, *31*(2), 294–322. https://doi.org/10.1080/17457300.2024.2319618

Intini, P., Wahlqvist, J., Wetterberg, N., & Ronchi, E. (2022). Modelling the impact of wildfire smoke on driving speed. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *80*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103211

Kalogeropoulos, N., Mitchell, H., Kuligowski, E., Ronchi, E., & Rein, G. (2025). Quantifying dire evacuations in case of wildfire using trigger boundaries and case study of the 2018 Mati wildfire in Greece. *Safety Science*, *181*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106691

Keller, M. S., & Lima, J. (2018). Acidentes em rodovias tradicionais e estradas parques. *Revista Científica ANAP Brasil*, *11*(23).

Liu, J. (2013). *Forest Sustainability in China and Implications for a Telecoupled World*. https://doi.org/10.1002/app5.17

Ma, F., & Lee, J. Y. (2025). Analyzing wildfire evacuation dynamics with agent-based modeling in damaged road networks. *Safety Science*, *187*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106835

Martínez-Valderrama, J., Sanjuán, M. E., Del Barrio, G., Guirado, E., Ruiz, A., & Maestre, F. T. (2021). Mediterranean landscape re-greening at the expense of south american agricultural expansion. *Land*, *10*(2), 1–15. https://doi.org/10.3390/land10020204

Moreno-Fernández, D., Zavala, M. A., Madrigal-González, J., & Seijo, F. (2021). Resilience as a moving target: An evaluation of last century management strategies in a dry-edge maritime pine ecosystem. *Forests*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/f12091151

Niu, C., Nair, D. J., Zhang, T., Dixit, V., & Murray-Tuite, P. (2022). Are wildfire fatalities related to road network characteristics? A preliminary analysis of global wildfire cases. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *80*. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103217

Ohi, S. J., & Kim, A. M. (2024). Identifying a network of wildfire evacuation host communities. *Safety Science*, *179*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106622

PRF. (2024, November 22). *PRF alerta sobre o risco de queimadas às margens das rodovias federais*. Https://Www.Gov.Br/Prf/Pt-Br/Noticias/Estaduais/Bahia/2024/Novembro/Prf-Alerta-Sobre-o-Risco-de-Queimadas-as-Margens-Das-Rodovias-Federais.

Qi, J., He, B. J., Cao, Y., Dong, J., & Lin, E. S. (2023). Risk assessment of terrestrial protected areas to extreme wind hazards: A case study in Queensland, Australia. *Landscape and Urban Planning*, *240*. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104888

Rohaert, A., Berthiaume, M., Kinateder, M., Wahlqvist, J., & Ronchi, E. (2025). The impact of wildfire smoke on traffic evacuation dynamics. *Safety Science*, *186*, 106812. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106812

Shahid, S., & Minhans, A. (2016). Climate change and road safety: A review to assess impacts in Malaysia. *Jurnal Teknologi*, *78*(4), 1–8. https://doi.org/10.11113/jt.v78.7991

Silva, R. M. da, Lopes, A. G., & Santos, C. A. G. (2023). Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, *326*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116664

Simpson, N. P., Mach, K. J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempert, R. J., Muccione, V., Mackey, B., New, M. G., O'Neill, B., Otto, F., Pörtner, H. O., Reisinger, A., Roberts, D., Schmidt, D. N., Seneviratne, S., Strongin, S., … Trisos, C. H. (2021). A framework for complex climate change risk assessment. In *One Earth* (Vol. 4, Issue 4, pp. 489–501). Cell Press. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005

Sun, J., TONG, Y. xin, & Liu, J. (2017). Telecoupled land-use changes in distant countries. *Journal of Integrative Agriculture*, *16*(2), 368–376. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61528-9

Trigueiro, W. R., Nabout, J. C., & Tessarolo, G. (2020). Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management*, *275*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111243.

Wetterberg, N., Ronchi, E., & Wahlqvist, J. (2021). Individual Driving Behaviour in Wildfire Smoke. *Fire Technology*, *57*(3), 1041–1061. https://doi.org/10.1007/s10694-020-01026-5

Anelise Schmitz (anelise.schmitz@gmail.com)
Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Departamento de Transportes, Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Cidade Industrial De Curitiba, PR, Brasil
Tatiana Maria Cecy Gadda (tatianagadda@utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Cidade Industrial De Curitiba, PR, Brasil

Gestão e modelagem da Segurança Viária

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO HIGHWAY SAFETY MANUAL E APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA ESTIMATIVA DE FREQUÊNCIA DE SINISTROS

Rodrigo Aguiar dos Santos[1], **Adelino Ferreira**[1], **Álvaro Pinheiro**[2],
[1]Universidade de Coimbra, [2]Universidade de Pernambuco

RESUMO
Este estudo comparou a capacidade preditiva do modelo tradicional do Highway Safety Manual (HSM) com diferentes algoritmos de Aprendizado de Máquina (AM) aplicados à BR-101 em Pernambuco, Brasil. Utilizando dados de sinistros ao longo de seis anos, foram testados modelos mais presentes na literatura, como Árvores de Decisão (AD), Máquinas de Vetores de Suporte (MVS) e Redes Neurais Artificiais (RNA). As previsões foram avaliadas por métricas como MSE, RMSE, MAE e R^2. Os resultados demonstraram que o modelo de AD superara significativamente os demais, ficando um pouco superior ao HSM, após aplicação do método de Bayes. A superioridade dos modelos de AM se deve à sua capacidade de capturar padrões complexos e não lineares nos dados. Esses achados reforçam o potencial do AM como ferramenta complementar para análise de segurança viária, oferecendo maior precisão na estimativa de sinistros e subsidiando melhores decisões na gestão do risco rodoviário.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A segurança viária é uma preocupação global diante do elevado número de sinistros de trânsito registrados anualmente, especialmente em países em desenvolvimento. A busca por métodos eficazes de previsão de sinistros tem sido central para a formulação de políticas públicas, intervenções de engenharia e estratégias de mitigação de riscos em rodovias. Entre as abordagens tradicionais, destaca-se o *Highway Safety Manual* (HSM), que fornece modelos estatísticos empíricos baseados em variáveis geométricas e operacionais, amplamente utilizados para estimativas de freqüência de sinistros.

Publicado em 2010 pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o HSM tornou-se uma ferramenta fundamental para inúmeros estudos de segurança viária. Sua principal relevância reside na capacidade de quantificar como alterações nas características das vias afetam a segurança no trânsito.Apesar da relevância do HSM, estudos recentes vêm destacando limitações desses modelos generalistas, especialmente em contextos específicos como rodovias brasileiras (Silva, 2012; Barbosa *et. al*., 2014; Cunto *et. al*., 2015; Waihrich, 2016; Silva, 2017; Thomasi, 2018, Santos, 2018; Mendes, 2022). As características operacionais e a heterogeneidade geométrica nem sempre são bem representadas pelos parâmetros originalmente desenvolvidos para a realidade norte-americana. Além disso, os modelos do HSM muitas vezes assumem relações lineares entre variáveis, o que pode comprometer a acurácia das estimativas em cenários mais complexos.Nesse cenário de busca por maior acurácia e adaptabilidade na modelagem de segurança viária, as inovações no campo da Inteligência Artificial (IA) oferecem um caminho promissor.

O conceito de Inteligência Artificial (IA), conforme discutido por Russell e Norvig (2013), define um campo multifacetado que engloba o projeto e a implementação de sistemas capazes de realizar tarefas que normalmente requerem inteligência humana. Isso inclui raciocínio lógico, aprendizado e resolução de problemas.Com o avanço das técnicas de IA, algoritmos de Aprendizado de Máquina (AM) têm sido cada vez mais explorados como alternativas promissoras para modelagem de segurança viária. Entre os modelos mais recorrentes na literatura destacam-se as Redes Neurais Artificiais (RNA)(Chang, 2005; Xie *et al*., 2007; Çodur e Tortum, 2015; Zeng*et al.*, 2016a; Zeng*et al*., 2016b), as Árvores de Decisão (AD), especialmente a árvore de classificação e regressão (CART) (Chang e Chen, 2005; Ali *et al*., 2021;Wen *et al*. 2021; e Wen *et al.* 2022); e as Máquinas de Vetores de Suporte (MVS) (Li *et al*., 2008). Esses métodos têm-se mostrado eficazes na captura de padrões não lineares e interações entre múltiplos fatores, proporcionando maior flexibilidade na modelagem.

Este estudo aborda uma comparação entre o modelo tradicional do HSM e os três algoritmos de aprendizado de máquina mencionados, aplicados a segmentos homogêneos de rodovias rurais de múltiplas faixas, sem interseções ou retornos no Brasil. O objetivo é avaliar o desempenho preditivo de cada abordagem quanto à estimativa da frequência de sinistros, utilizando métricas de erro e análise de correlação. Espera-se, com isso, identificar o potencial das técnicas de IA para subsidiar decisões mais precisas e localizadas no planejamento

da segurança viária.

2. METODOLOGIA

A via analisada é a BR – 101, uma Rodovia Federal, localizada no Estado de Pernambuco, que liga a cidades de Recife àPalmares, pavimentada, com pista dupla. Foram analisados dados de sinistros durante 6 anos (2014 até 2019). A rodovia foi dividida em 55 segmentos homogêneos de diferentes comprimentos e características geométricas. A partir disso, modelos preditivos foram desenvolvidos e comparados.

2.1. Modelo do HSM para previsão de sinistros em trechos rurais de múltiplas faixas

O Capítulo 11 – Rodovia Rural Multifaixas do HSM engloba estradas rurais de várias faixas sem controle de acessos, interseções de três e quatro ramos com controle de parada da estrada secundária e interseções sinalizadas com quatro ramos em todas as seções transversais da estrada às quais se aplica. Consiste na aplicação das seguintes etapas:

- Calcular o número de sinistros previstos para as condições básicas, conforme equação 1:

$$Ncb = e^{(a + b \times \ln (VMDA) + \ln (L))} \quad (1)$$

Onde:
Ncb = Frequência Anual de sinistros previstos para condição de base específica;
VMDA = Veículo Médio Diário Anual;
L = Extensão do segmento em milhas
a,b = Coeficientes de regressão, número total de sinistros.

- Determinar o Número de Sinistros Previstos para cada segmento homogêneo utilizando a equação 2:

$$Nprev = Ncb \times (FMA1 \times FMA2 \times FMA3 \times FMA4 \times FMA5) \times Cx \quad (2)$$

Onde:
Nprev = Frequência anual de sinistros previstos para uma determinada seção "x";
Ncb = Frequência anual de sinistros previstos para uma condição de base específica;
FMAxy = Fator de modificação de sinistros para uma seção "x" de geometria e controle de tráfego "y";
Cx = Fator de calibração para as condições na seção "x".

- Aplicar Fator de Calibração: relação entre os sinistros previstos e os sinistrosreais, demonstrada na equação 3.

$$Cx = Nreal / Nprev \quad (3)$$

Onde:
Cx = Fator de calibração para as condições na seção "x";
Nreal = Número de sinistros ocorridos para uma determinada seção "x";
Nprev = Frequência anual de sinistros previstos para uma determinada seção "x".

- Aplicar o Método Empírico de Bayes (EB) específico: O Método EB pode ser usado para estimar a frequência de sinistros média esperada para períodos passados e futuros, e usado no nível específico do local ou no nível específico do projeto (onde os dados observados podem ser conhecidos para uma instalação particular, mas não no local - Nível específico) (AASHTO, 2010). Calculado utilizando a equação 4 a seguir:

$$Nesperado = w \times Nprev + (1-w) \times Nreal \quad (4)$$

Onde:
Nesperado = Frequência anual de sinistros esperado para o período de análise;
Nprev = Frequência anual de sinistros previstos para uma determinada seção "x";
Nreal = Número de sinistros ocorridos para uma determinada seção "x";

w = Fator de ponderação referente às condições básicas da rodovia.

2.2. Aprendizado de Máquina (AM)

O processo iniciou-se com a coleta de dados históricos de sinistros fornecidos pela Polícia Rodoviária Federal (PRF). As variáveis utilizadas para a construção dos modelos foram as mesmas consideradas no modelo preditivo do HSM, garantindo uma base comparativa justa entre ambos. Isso inclui características categóricas geométricas da via, tais como:traçado (reta/curva), tipo do pavimento, largura do acostamento, presença de barreiras e defensas; e informação numérica, volume médio diário anual (VMDA).Como alvo, o total de sinistros é o valor numérico a ser obtido (Tabela 1). A padronização dessas variáveis assegura que as diferenças de desempenho observadas entre os modelos resultem das técnicas analíticas empregadas, e não da entrada de dados divergentes.

Tabela 1: Variáveis Utilizadas

Variável	Tipo	Definição	Regra
Largura_faixa	Categórico	Largurada faixa de rolamento (m)	Característica
Largura_Acostamento	Categórico	Largurado acostamento (m)	Característica
Largura_Central	Categórico	Largura do canteiro central (m)	Característica
Traçado	Categórico	Curva / Reta	Característica
Barreira_Central	Categórico	Sim / Não	Característica
Extensão	Categórico	Comprimento do segmento (km)	Característica
Defensa	Categórico	Sim / Não	Característica
Tipo_pavimento	Categórico	Asfalto / Concreto	Característica
VMDA	Numérico	Valor anual (nº de veículos ao ano)	Característica
Total de Sinistros	Numérico	Total de sinistros por segmento	Alvo

Esses dados foram submetidos a um rigoroso pré-processamento para tratar valores ausentes e outliers (ruídos), além de serem normalizados e padronizados conforme necessário. Em seguida, os dados foram divididos em conjuntos para treinamento e teste (80%) e validação (20%), assegurando a representatividade aleatória dos dados.

A seguir, três modelos foram testados: Multilayer Perceptron (MLP), Máquina de Vetor de Suporte(MVS) e Árvores de Decisão (AD), sendo o primeiro um modelo de Rede Neural Artificial (RNA), o segundo de aprendizado estatístico, e o terceiro um modelo de árvores. Cada modelo foi treinado como o conjunto de dados pré-processado (retirada dos ruídos e normalizado) e com os hiperparâmetros ajustados via validação cruzada (treinamento e teste) para otimizar o desempenho. Após a validação, os modelos foram avaliados com o subconjunto de dados separado (dados não vistos no treinamento e teste) para conferir a regularidade das métricas obtidas na etapa de treinamento e teste.

Para avaliar o melhor modelo, foram utilizadas as seguintes métricas: Erro Quadrático Médio (MSE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e Coeficiente de Determinação (R^2). O MSE e RMSE forneceram uma visão geral da magnitude dos erros de previsão, enquanto o MAE mediu a magnitude média dos erros. O R^2 indicou a proporção da variabilidade explicada pelo modelo.

Com isso, os resultados de cada modelo foram comparados com base nas métricas de avaliação mencionadas. A análise do desempenho permitiu identificar o modelo com melhor precisão e robustez na predição dos sinistros.

3. RESULTADOS

Ao longo de seis anos, foram registrados 439 sinistros na via analisada. O modelo inicial do HSM previu 290 sinistros, resultando em um Fator de Calibração (Cx) de 1,51. Após a aplicação desse fator, o modelo calibrado do HSM demonstrou uma previsão mais precisa, estimando 462 sinistros. Aplicando o Método de Bayes, o número de sinistros previstos pelo modelo caiu para 400.Embora o modelo calibrado (Nprev) aproxime-se dos valores reais em diversos segmentos, ainda apresenta variações substanciais, especialmente em trechos com alta sinistralidade. A aplicação do Método de Bayes proporcionou uma suavização nas estimativas, reduzindo oscilações extremas e resultando em uma curva mais estável e ajustada. Essa abordagem é especialmente útil em segmentos com baixa contagem de sinistros, onde a variabilidade

estatística pode comprometer a precisão do modelo. A análise demonstra que, mesmo com a calibração, o modelo HSM necessita de ajustes adicionais, sendo o Empírico-Bayes uma ferramenta eficiente para refinar as previsões e mitigar incertezas em dados dispersos.

Em relação aos modelos preditivos de AM os resultados das métricas de desempenhos podem ser avaliados e comparados ao HSM na Tabela 2, em ordem crescente de resultados, sendo a de melhor valor obtido (menor quantidade de erros) em negrito:

Tabela 2:Métricas de Desempenho

Modelo	MSE	RMSE	MAE	R^2
AD	11,622	**3,409**	**1,124**	**0,920**
HSM (Esperado)	11,643	3,412	1,679	0,897
RNA	17,035	4,127	3,167	0,883
MVS	42,772	6,540	5,221	0,706
HSM (Previsto)	55,429	7,445	4,536	0,664

Os resultados da Tabela 2 revelam que o AD superou os demais em termos de desempenho, apresentando os menores valores de MSE (11,622), RMSE (3,409) e MAE (1,124), além do maior coeficiente de determinação R^2 (0,920). Esses indicadores sugerem que o modelo AD é o mais preciso e com menor erro médio em suas previsões. Em contrapartida, os modelos de RNA e MVS demonstraram desempenho inferior ao anterior, com o MVS exibindo os piores resultados em todas as métricas de erro (MSE de 42,772, RMSE de 6,540 e MAE de 5,221) e o menor R^2 (0,706). Ao comparar os resultados HSM (Esperado) e HSM (Previsto), nota-se uma discrepância significativa. O HSM (Esperado) representa o desempenho do modelo HSM (Previsto) após a aplicação do método de Bayes, o que o aproxima das métricas de erro do modelo AD. Por outro lado, o HSM (Previsto), antes da otimização Bayesiana, assemelha-se mais ao desempenho do SVM, indicando que a predição inicial do modelo HSM não atingiu o desempenho esperado e que a aplicação do método de Bayes foi crucial para sua melhoria. Isso ocorre porque o Método de Bayes suaviza as estimativas, aproximando-as da média regional, o que reduz a variabilidade dos dados e, conseqüentemente, aumenta o R^2. No entanto, essa suavização compromete a precisão pontual das previsões, resultando em maiores erros absolutos em comparação aos modelos de AM, que conseguem capturar padrões locais e relações não lineares com maior eficácia.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou que os modelos de aprendizado de máquina, como as Árvores de Decisão, apresentam desempenho preditivo superior ao modelo tradicional do Highway Safety Manual (HSM) para estimativa da frequência de sinistros na BR-101, Pernambuco. Essa superioridade decorre principalmente da capacidade desses algoritmos de capturar padrões complexos e relações não lineares entre variáveis, características frequentes em dados de segurança viária em contextos específicos como o contexto brasileiro.
No entanto, uma limitação significativa identificada no estudo refere-se ao tamanho restrito da amostra, com registros de 439 sinistros ao longo de seis anos. O volume limitado de dados pode comprometer a estabilidade e a generalização dos modelos preditivos, impactando diretamente na confiabilidade das estimativas e elevando a variabilidade dos resultados. A aplicação do Método Empírico-Bayes tem sido útil para suavizar estimativas e mitigar efeitos decorrentes da dispersão dos dados, especialmente em segmentos com baixa contagem de sinistros.

Diante disso, recomenda-se, para estudos futuros, o emprego de técnicas de *ensemble* entre modelos de aprendizado de máquina, que combinam previsões de múltiplos algoritmos para melhorar a robustez e a precisão dos resultados. Essa abordagem tem potencial para reduzir os erros absolutos e ampliar a capacidade de captar relações complexas em diferentes níveis de dados, compensando limitações decorrentes do tamanho da amostra e aumentando a confiabilidade das estimativas para apoio à gestão do risco rodoviário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, Y., Haque, M.M., Zheng, Z., Bliemer, M.C.J., (2021). Stop or go decisions at the onset of yellow light in a connected environment: A hybrid approach of decision tree and panel mixed logit model. *Anal. Methods*

Accident Res. 31, 100165. DOI:10.1016/j.amar.2021.100165

AASHTO – American Association of State Highway Transportation Officials. Highway Safety Manual (HSM). Washington-DC: Federal Highway Administration. 2010.

Barbosa, H.; Cunto, F., Bezerra, B.; Nodari, C., e Jacques, M.A (2014). Safety performance models for urban intersections in Brazil. Accident Analysis and Prevention, v.70, p. 258 – 266. DOI: 10.1016/j.aap.2014.04.008

Cunto, F.; Sobreira, L. e Ferreira, S. (2015). Assessing the transferability of the highway safety manual predictive method for urban roads in Fortaleza City, Brazil. Journal of Transportation Engineering, v.141. Doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000734

Chang, L. (2005) Analysis of freeway accident frequencies: negative binomial regression versus artificial neural network. *Safety Science,* v. 43, p. 541-557. DOI: 10.1016/j.ssci.2005.04.004

Chang, L.; Chen, W. (2005) Data mining of tree-based models to analyze freeway accident frequency. *Journal of Safety Research*,v. 36, p. 365-375. DOI: 10.1016/j.jsr.2005.06.013

Çodur, Y.; Tortum, A. (2015) An artificial neural network model for highway accident prediction: a case study of Erzurum, Turkey.*Promet – Traffic&Transportation*, v. 27(3), p. 217-225. DOI: 10.7307/ptt.v27i3.1551

Li, X.; Lord, D.; Zhang, Y; Xie, Y. (2008) Predicting motor vehicle crashes using support vector machine models. *Accident Analysis and Prevention*, v. 40(4), p. 1611-1618. DOI: 10.1016/j.aap.2008.04.010

Russell, S.; Norvig, P. (2013) Inteligência artificial (3º ed.) Rio de Janeiro: Elsevier.

Xie, Y.; Lord, D.; Zhang, Y. (2007) Predicting motor vehicle collisions using Bayesian neural network models: An empirical analysis. Accident *Analysis and Prevention*, v. 39, n. 5, p. 922–933. DOI: 10.1016/j.aap.2006.12.014

Wen, X.; Xie, Y.; Wu, L.; Jiang, L. (2021) Quantifying and comparing the effects of key risk factors on various types of roadway segment crashes with LightGBM and SHAP. *Accident Analysis & Prevention* n.159, 106261. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106261

Wen, X.; Xie, Y.; Jiang, L.; Li, Y.; Ge, T. (2022) On the interpretability of machine learning methods in crash frequency modeling and crash modification factor development. *Accident Analysis &Prevention* n. 168. 106617 DOI: 10.1016/j.aap.2022.106617

Zeng, Q.; Huang, H.; Pei, X.; Wong, S. C.; Gao, M. (2016a) Rule extraction from an optimized neural network for traffic crash frequency modeling. *Accident Analysis and Prevention*, v. 97, p. 87–95. DOI: 10.1016/j.aap.2016.08.017

Zeng, Q.; Huang, H.; Pei, X.; Wong, S. C. (2016b) Modeling nonlinear relationship between crash frequency by severity and contributing factors by neural networks. *Analytic Methods in Accident Research*, v. 10, p. 12–25. DOI: 10.1016/j.amar.2016.03.002

Silva, K.C.R (2012). Aplicação do modelo de previsão de acidentes do HSM em rodovias de pista simples do Estado de São Paulo (Universidade de São Paulo).DOI: 10.11606/D.18.2012.tde-15022012-172539

Silva, K.C.R (2017). Assessing the transferability of crash prediction models for two Lane highways in Brazil (Universidade de São Paulo). DOI: /10.11606/T.18.2017.tde-10112017-215500

Waihrich, D. R. L. S. (2016) Calibração do Método de Previsão de Acidentes do Highway Safety Manual (HSM) para Trechos Rodoviários de Pista Dupla noBrasil. Dissertação de Mestrado em Transportes.Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132 p.

Santos, R.A. (2018) Avaliação do Impacto das Medidas Construtivas na Segurança Viária: Estudo de Caso na Rodovia BR 101-PE, Publicação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 151 p. https://pecpoli.com.br/dissertacoes-e-teses

Thomazi, K. R. (2018). Elaboração de Modelos de Previsão de Acidentes de Trânsito em Rodovias Rurais de Pista Simples do Estado de Santa Catarina com base no Highway Safety Manual (HSM). Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis. https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/191122

Mendes, O.B.B. (2022). Avaliação da trasnferabilidade do modelo preditivo de colisões do HighwaysSafety Manual para rodovias de múltipistas rurais no Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Planejamento e operação de sistemas de transporte. DOI: 10.11606/D.18.2023.tde-19092023-101215

ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE DE RADARES DE VELOCIDADE EM VIAS URBANAS DO RIO DE JANEIRO

Gabriel Nakalski Farias, Filipe Mendes Gonçalves Machado, Jéssica Wanderley Souza do Nascimento, Ana Carolina de Barros Pamplona, Anderson Marden de Sousa Silva, Matheus de Souza e Silva, Marina Leite de Barros Baltar, Glaydston Mattos Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

RESUMO

Este estudo propõe uma metodologia multicritério para apoiar a definição de pontos estratégicos de fiscalização eletrônica em vias urbanas no Rio de Janeiro. Para isso, foram estabelecidos critérios técnicos a partir da aplicação de questionários com especialistas (pesquisadores e funcionários da Prefeitura), análise das características da via e dos aspectos urbanísticos do entorno. A abordagem metodológica empregou o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) com o objetivo de identificar os segmentos homogêneos mais propensos ao desenvolvimento de altas velocidades em uma via. A Autoestrada Lagoa-Barra foi adotada como estudo de caso, através da divisão em segmentos homogêneos nos dois sentidos. Os resultados permitiram hierarquizar os segmentos com maior potencial de risco, orientando a alocação eficiente de radares de velocidade. O modelo contribuiu para otimizar os recursos públicos e os efeitos da fiscalização na redução de sinistros, reforçando o papel do planejamento urbano na segurança viária em ambientes complexos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o aumento do número de sinistros de trânsito associados, principalmente, ao excesso de velocidade e avanço indevidos, estudos sobre a segurança viária em áreas urbanas vem crescendo gradualmente (Lenné, 2013). A fiscalização eletrônica implementada nos grandes centros urbanos representa apenas uma das inúmeras tentativas de redução não apenas da velocidade dos veículos, assim como da prevenção de sinistros contribuindo diretamente para a melhoria do tráfego (Abdulmawjoud, Jamel & Al-Taei, 2020). Para garantir sua eficácia, esses sistemas de fiscalização eletrônica, especialmente os radares de velocidade e de avanço, devem estar estrategicamente localizados (Farias *et al*., 2024).

Segundo os dados publicados pelo IPEA (2024), a quantidade de óbitos e a taxa de mortalidade no Brasil em decorrência do trânsito aumentou em, aproximadamente, 3% em 2023, apresentando 35.938 vítimas fatais em sinistros de transportes terrestres. Nesse mesmo período, mortes decorrentes de sinistros de trânsito representaram em torno 3,2% do total registradas no país. Em outros estudos, em parceria com o Fórum Brasileiro de Segurança Pública (FBSP), mostrou a violência no trânsito, mesmo com a adoção de campanha de conscientização, distante de alcançar as metas estabelecidas pela OMS (2021) no projeto da "Década de Ação pela Segurança no Trânsito", campanha global tem como objetivo reduzir as mortes e lesões no trânsito em pelo menos 50% até 2030 (IPEA & FBSP, 2025). De maneira equivalente, no contexto carioca, com o aumento dos sinistros de trânsito, a prefeitura divulgou, em 16 de maio de 2025, seu novo Plano Municipal de Segurança Viária, estabelecendo novas diretrizes para a segurança no trânsito, especialmente para motocicletas, e reorganizou o sistema de mobilidade na antiga capital federal.

Diante desse cenário, a abordagem de alocação de radares de velocidade no contexto da cidade do Rio de Janeiro não adota estratégias eficazes que otimizem a localização desses equipamentos (Farias *et al*., 2024). Este estudo, portanto, tem como objetivo identificar segmentos homogêneos mais propensos ao desenvolvimento de altas velocidades em uma via. A abordagem metodológica empregou o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para hierarquizar segmentos na Autoestrada Engenheiro Fernando Mac Dowell, também conhecida como Autoestrada Lagoa-Barra, no Rio de Janeiro, nos dois sentidos da via. Foram estabelecidos critérios técnicos por meio da aplicação de questionários com especialistas representados por pesquisadores acadêmicos e funcionários do setor de transportes da Prefeitura do Rio de Janeiro, com base na análise das características da via e nos aspectos urbanísticos da região, contribuindo para uma alocação mais criteriosa, eficiente e orientada à segurança viária dos radares de velocidade.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo baseia-se em uma abordagem quantitativa e multicriterial de apoio à decisão, possibilitando não apenas a padronização técnica do processo decisório, como também uma alocação mais eficiente dos equipamentos de controle de velocidade, com base em evidências empíricas e critérios estruturados voltados à segurança viária urbana.

2.1. Coleta e estruturação dos dados

Inicialmente, com base em uma revisão da literatura especializada, em normas técnicas pertinentes (como manuais de segurança viária e diretrizes de fiscalização eletrônica) foram definidos os critérios e subcritérios para a análise e a relevância de cada um foi obtida a partir da aplicação de questionários para especialistas. Os fatores selecionados priorizam características físicas, de sinalização e ambientais que favorecem o desenvolvimento de velocidades elevadas pelos condutores, condição esta reconhecida como potencialmente associada ao aumento do risco e da gravidade dos sinistros viários.

2.2. Segmentos homogêneos

Conforme o *Highway Capacity Manual* – HCM (2016), segmentar vias expressas em trechos homogêneos é essencial para garantir acurácia analítica, eficiência nas decisões técnicas e melhor segurança viária. O HCM recomenda que, para elaborar critérios para segmentação, é importante considerar tanto características físicas da via quanto aspectos operacionais e funcionais. Esses critérios precisam ser técnicos e voltados para garantir que cada segmento identificado apresente características similares quanto à geometria, operação, funcionalidade e infraestrutura.

Sendo assim, a Autoestrada Lagoa-Barra, objeto deste estudo de caso, se enquadra principalmente como *Freeway*, embora em alguns pontos possa ter características de *Multilane Highway* (em zonas urbanas com interferências). Os principais critérios utilizados para segmentar trechos homogêneos tipo *Freeway*, divididos em categorias para orientar essa segmentação são: número de faixas; características geométricas (curvas, rampas, túneis); volume e composição do tráfego; controle de acesso e interferências laterais; e velocidade e regulamentações. Recomenda-se que os trechos devem ser segmentados antes e depois de: entradas e saídas (rampas de acesso ou retorno); interseções com controle (se houver, mesmo que indireto); mudança no número de faixas; mudança significativa de volume de tráfego (ex.: após entradas/saídas para Rocinha, São Conrado, Gávea); e túneis e viadutos devem ser considerados trechos distintos. A segmentação proposta da Autoestrada Lagoa-Barra, com base nesses critérios, é apresentada na Figura 1. Foram definidos 17 segmentos para o Sentido Barra da Tijuca na Figura 1a e 16 segmentos para o Sentido Lagoa na Figura 1b. Cada segmento é compreendido entre dois pontos na figura.

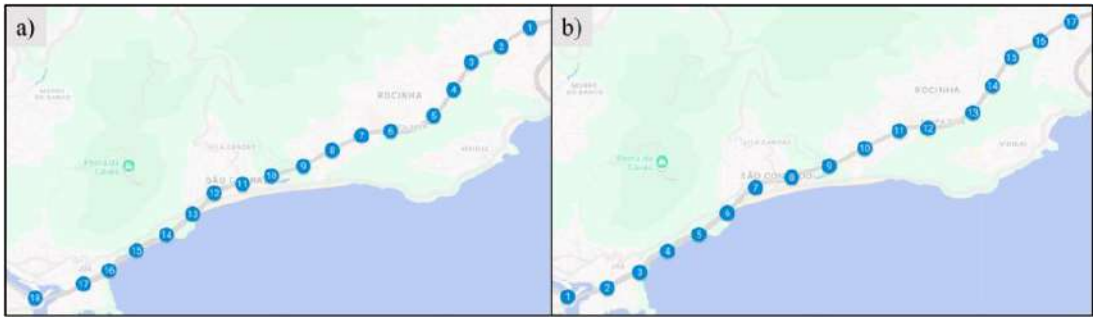


Figura 1: Segmentação proposta nos sentidos (a) Barra da Tijuca e (b) Lagoa.

2.3. Aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Para hierarquizar os critérios e obter os pesos relativos, foi aplicado o método AHP desenvolvido por Saaty (1995). O AHP foi escolhido por sua robustez na resolução de problemas complexos que envolvem múltiplos critérios de decisão (Farias, 2024). Essa estrutura permite que a priorização de locais estratégicos para a implantação dos radares de fiscalização eletrônica seja baseada em rigor matemático e técnico, considerando múltiplos critérios simultaneamente e garantindo a consistência dos julgamentos executados. A estrutura de decisão foi organizada em três níveis: objetivo, critérios e alternativas (locais candidatos à instalação dos radares).

O processo iniciou-se com a construção da matriz de comparação par a par $A = [a_{ij}]$, onde cada elemento a_{ij} representa a importância relativa do critério i em relação ao critério j (valores de 1 a 9, onde 1 = igual importância e 9 = extrema importância). A matriz A é uma matriz bilateral positiva de ordem $n \times n$, estruturada conforme a Equação 1.

$$a_{ij} > 0, \;\; a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \;\; e \;\; a_{ii} = 1 \tag{1}$$

Em seguida, foi executado a normalização da matriz pela soma das colunas e o vetor de prioridade $w =$

$[w_1, w_2, \ldots, w_n]^T$ foi calculado, cujos elementos representam os pesos relativos de cada critério (Equação 2). Após obter w, a consistência foi verificada por meio do cálculo do índice de consistência (CI) e do índice de razão de consistência (CR). Primeiramente, foi estimado o maior valor próprio da matriz λ_{max} (Equação 3).

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} a_{kj}} \quad (2)$$

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} ((A \times w)_i / w_i)/n \quad (3)$$

Com isso, foi calculado o índice de consistência (Equação 4). Por fim, o índice de razão de consistência (CR) foi obtido conforme a Equação 5. Recomenda-se que o $CR < 0{,}10$ (10%).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

A seguir, é apresentado o significado de cada elemento do método AHP apontados anteriormente. Onde: a_{ij} é o grau de importância relativa do critério i em relação ao critério j; A é a matriz de comparações par a par; w_i é o peso do critério i; w é o vetor com todos os pesos; λ_{max} é o autovalor máximo da matriz A usado para verificar consistência; CI é o índice de consistência; RI é o índice aleatório de Saaty (depende do número de critérios); e CR é o índice de razão de consistência.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Por meio da aplicação de questionários, foram identificados os critérios e subcritérios a serem empregados no método AHP e seus respectivos pesos com base em comparações par a par. Em seguida, foram coletados e tratado os dados referentes às características de cada segmento da via, com o objetivo de estabelecer a classificação hierárquica segundo os parâmetros definidos.

3.1. Definição de critérios e subcritérios

Com base na revisão da literatura e aplicação dos questionários, foram identificados quinze critérios que influenciam o comportamento dos condutores no que diz respeito à propensão ao aumento da velocidade. A fim de reduzir a quantidade de comparações no questionário par a par na etapa seguinte, os subcritérios foram organizados em três grupos de influência: física, de sinalização e de ambiente. O grupo das influências físicas compreendeu oito subcritérios; o de sinalização, três; e o de ambiente, quatro.

A avaliação comparativa par a par entre os subcritérios foi realizada por meio de um segundo questionário aplicado a 17 especialistas, utilizando a escala de prioridades proposta por Saaty (1991). A partir das respostas obtidas, foram construídas as matrizes de comparação e verificado o índice de consistência de cada uma. A estrutura hierárquica do modelo, chamada árvore de decisão, contendo os três critérios, os 15 subcritérios e seus respectivos pesos, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Árvore de decisão desenvolvida após realização de questionários com especialistas.

Critérios	Peso	Subcritérios	Peso
Influências físicas	0,497	Ausência de acessos entradas / saídas	0,042
		Ausência de cruzamentos semaforizados	0,063
		Ausência de lombadas / quebra-molas	0,083
		Largura de faixas de rolamento / largura vias	0,060
		Quantidade de faixas de rolamento	0,056
		Presença de trechos retilíneos	0,063
		Presença de trechos com declividade	0,051
		Pavimento de boa qualidade	0,078
Influências de sinalização	0,255	Ausência de radares de velocidade e lombadas eletrônicas	0,161
		Ausência de faixas de segurança semaforizados	0,047
		Ausência de sinalização horizontal e vertical	0,047
Influências de ambiente	0,249	Ausência de PGVs	0,052
		Ausência de pontos de ônibus	0,031
		Ausência de segurança pública no local	0,082
		Baixo fluxo de veículos	0,084

3.2. Levantamento dos dados e análise hierárquica dos segmentos

A coleta de dados foi estruturada em duas abordagens complementares: análises quantitativas, baseadas em dados objetivos como medições, contagens e cálculos automatizados; e qualitativas, obtidas a partir de avaliações visuais e perceptivas de aspectos físicos da via. A Tabela 2 apresenta os subcritérios definidos e os métodos de coleta adotados para tratamento dos dados para aplicação da análise AHP.

Tabela 2: Métodos empregados para mensuração de cada subcritério e tratamento dos dados para aplicação na AHP.

Subcritérios	Método de coleta dos dados e tratamento para aplicação na AHP
Ausência de acessos entradas / saídas	Contagem direta por segmento.
Ausência de cruzamentos semaforizados	Contagem direta por segmento.
Ausência de lombadas / quebra-molas	Contagem direta por segmento.
Largura de faixas de rolamento / largura vias	Consulta aos dados públicos fornecidos pelo DNIT.
Quantidade de faixas de rolamento	Contagem direta por segmento.
Presença de trechos retilíneos	Análise da geometria por segmento via API Google.
Presença de trechos com declividade	Análise de altimetria por segmento via API Google.
Pavimento de boa qualidade	Avaliação visual por imagens.
Ausência de radares de velocidade e lombadas eletrônicas	Dados fornecidos pela CET-Rio.
Ausência de faixas de segurança semaforizados	Contagem direta por segmento.
Ausência de sinalização horizontal e vertical	Contagem direta por segmento. Posterior atribuição de diferentes categorias de peso de acordo com o tipo de sinalização vertical e horizontal.
Ausência de PGVs	Análise por segmento via API Google. Posterior atribuição de diferentes categorias de peso de acordo com o tipo de PGV.
Ausência de pontos de ônibus	Contagem direta por segmento.
Ausência de segurança pública no local	Consulta aos dados públicos fornecidos pelo ISP.
Baixo fluxo de veículos	Dados fornecidos pela CET-Rio.

Concluído o levantamento dos dados, foi possível estruturar as matrizes de comparação par a par entre os segmentos individualmente para cada critério. Com o intuito de viabilizar essas comparações e manter a consistência dos julgamentos, foram utilizadas escalas categóricas padronizadas, ajustadas à natureza de cada variável observada. A partir das comparações realizadas, a aplicação do método AHP permitiu a determinação dos pesos relativos de cada segmento em relação a cada critério. Em seguida, os pesos foram agregados, considerando a importância relativa de cada critério, previamente definida na etapa de construção da árvore de decisão. O resultado final desse processo é apresentado na Figura 2, na qual constam os valores normalizados obtidos por critério e a pontuação total agregada de cada segmento. Com o intuito de facilitar a visualização, é apresentado um mapa de calor com a classificação hierárquica dos segmentos da Autoestrada Lagoa-Barra, destacando em tons mais intensos aqueles com maior propensão ao excesso de velocidade. A Figura 2a apresenta o sentido para a Barra da Tijuca enquanto a Figura 2b apresenta o sentido para a Lagoa.

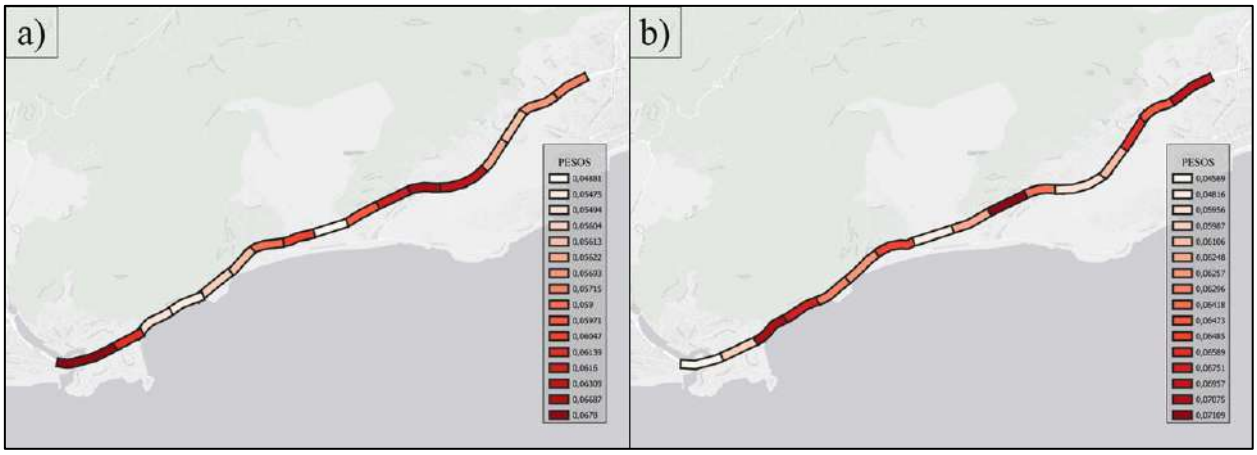


Figura 2: Mapa de calor nos sentidos (a) Barra e (b) Lagoa.

Conforme os princípios estabelecidos pela técnica AHP, foi realizada a verificação do CR para todas as matrizes de comparação par a par entre os segmentos, considerando individualmente cada critério. Em todas as matrizes, os valores do CR permaneceram abaixo do limite recomendável de 0,10, o que indica que os

julgamentos foram consistentes e os resultados obtidos são confiáveis do ponto de vista metodológico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo contribui para o planejamento urbano ao oferecer uma metodologia estruturada e replicável para identificação de trechos prioritários para fiscalização eletrônica e atingiu seu objetivo principal ao propor uma metodologia baseada no método AHP, para identificar segmentos candidatos à implantação de fiscalização eletrônica em vias urbanas. A aplicação da abordagem na Autoestrada Lagoa-Barra permitiu hierarquizar os segmentos mais propensos ao desenvolvimento de altas velocidades, considerando múltiplos critérios definidos com o apoio de especialistas. Os segmentos que receberam os maiores pesos apresentaram desempenho consistente ao longo de toda a análise, de forma que um critério isoladamente não foi responsável pela pontuação final destes. Por outro lado, os segmentos com menor pontuação coincidem com trechos onde já há presença de radares. Isto ocorre pois este é o critério que recebeu maior peso dos especialistas.

Apesar dos resultados consistentes, reconhecem-se limitações importantes, especialmente relacionadas à coleta de dados. Algumas variáveis dependeram de análises qualitativas ou estimativas visuais, o que pode comprometer a precisão dos resultados. Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se: automatizar o processo de coleta e tratamento de dados, a fim de evitar avaliações subjetivas; aplicar a metodologia em outras vias urbanas com características distintas; integrar técnicas complementares, como álgebra de mapas com *softwares* de georreferenciamento ou comparar os resultados com soluções obtidas a partir de modelos matemáticos de localização, a fim de enriquecer a análise decisória. Por fim, é sugerido comparar os resultados da análise multicritério AHP com as metodologias existentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPERJ e ao OPTGIS da COPPE/UFRJ pelo apoio institucional, financeiro e técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulmawjoud, A. A.; Jamel, M. G. e Al-Taei, A. A. (2020) Traffic flow parameters development modelling at traffic calming measures located on arterial roads. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 12, n. 1, p. 437-444. DOI: 10.1016/j.asej.2020.04.014

DNIT (2010). *Manual de Projeto Geométrico de Rodovias – DNIT 134/2010-ES*. Brasília.

Farias, G. N. (2024) Vltzação do brt rio: estudo de viabilidade técnica de conversão do corredor de brt transcarioca do Rio de Janeiro para um sistema vlt. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Farias, G. N. *et al*. (2024) Implementação de modelo matemático para otimizar a localização de radares de velocidade em vias urbanas no Rio de Janeiro. In Anais do 21º Congresso Rio de Transportes. Rio de Janeiro: RDT, p. 1-12.

GLOBAL PLAN (2021) Decade of Action for Road Safety 2021–2030. Disponível em: <https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>. Acesso em: 27 jun. 2025.

INSTITUTO DE SEGURANÇA PÚBLICA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. *ISPConecta: Sistema de informações estatísticas da segurança pública fluminense*. Disponível em: <https://ispconecta.rj.gov.br>. Acesso em: 13 jun. 2025

Lenné, M. G. (2013) The contribution of on-road studies of road user behaviour to improving road safety. *Accident Analysis & Prevention*, v. 58, p. 158-161. DOI: 10.1016/j.aap.2013.06.012

PORTAL DO TRÂNSITO (2025). Atlas da Violência 2025: violência no trânsito cresce e mortes de motociclistas disparam no Brasil. Disponível em: <https://www.portaldotransito.com.br/noticias/fiscalizacao-e-legislacao/estatisticas/atlas-da-violencia-2025-violencia-no-transito-cresce-e-mortes-com-motocicletas-disparam-no-brasil>. Acesso em: 28 jun. 2025.

Saaty, T. L. (1991) *Método de análise hierárquica*. São Paulo: McGrawHill Pub. Co., p. 367.

Saaty, T. L. (1995) Transport planning with multiple criteria: The analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of Advanced Transportation*, v. 29, n. 1, p. 81-126. DOI: 10.1002/atr.5670290109

TRB (2016) *Highway Capacity Manual* (6ª ed.). Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Gabriel Nakalski Farias (gabriel.farias@pet.coppe.ufrj.br)
Filipe Mendes Gonçalves Machado (filipemgm@pet.coppe.ufrj.br)
Jéssica Wanderley Souza do Nascimento (jessica.souza@ufrj.br)
Ana Carolina de Barros Pamplona (carolpamplona@poli.ufrj.br)
Anderson Marden de Sousa Silva (anderson.marden@poli.ufrj.br)
Matheus de Souza e Silva (matheus.souza@poli.ufrj.br)
Marina Leite de Barros Baltar (mabaltar@pet.coppe.ufrj.br)
Glaydston Mattos Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufrj.br) Laboratório de Otimização e Sistemas de Informações Geográficas (OPTGIS) do Programa de Engenharia de Transporte (PET) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Avenida Horácio Macedo, 2030, Bloco I, Sala 244, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Cíntia Machado de Oliveira (cintia.oliveira@cefet-rj.br) Departamento de Engenharia de Produção, CEFET/RJ – Unidade Itaguaí. Rod. Gov. Mário Covas, BR-101, s/n – Santana, Itaguaí - RJ, 23812-101

ANÁLISIS GEOGRÁFICO DEL IMPACTO DE LA PANDEMIA POR COVID-19 EN LA MORTALIDAD POR SINIESTROS VIALES URBANOS

Jackeline Murillo[1], Ribka Soracipa[2], Daniel Guzmán[1] y Ciro Jaramillo[1]
[1]Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle. [2]Harmony Research Group, Hanami Center for Research and Psychosocial Care

RESUMEN
La investigación identificó patrones espaciales en la mortalidad por siniestros viales en Santiago de Cali durante 2019-2021, analizando el impacto del confinamiento por COVID-19. Mediante registros oficiales depurados y georreferenciados por comunas, se emplearon estadísticas descriptivas y mapas de cajas para detectar anomalías territoriales. Los resultados revelaron una transición espacial significativa: las zonas atípicas se desplazaron del occidente (2019) hacia el centro (2020) y posteriormente al oriente (2021), utilizando el distrito central de negocios como referencia. El año 2021 mostró comportamiento no normal con menor rango intercuartílico respecto a 2019. Las correlaciones de Spearman evidenciaron relaciones fuertes a moderadas entre períodos consecutivos, sin autocorrelación espacial. Los clústeres Alto-Alto persistentes cerca del CBD sugieren que la influencia laboral en la movilidad se mantuvo incluso durante restricciones. Estos hallazgos contribuyen al diseño de políticas públicas de movilidad urbana para enfrentar eventos extraordinarios similares.

1. INTRODUCCION

Según el informe anual de seguridad vial del Foro Internacional de Transporte (ITF, 2020), las muertes en carreteras disminuyeron globalmente durante 2020 debido a las medidas pandémicas implementadas. Sin embargo, el análisis detallado de estos datos evidenció una situación paradójica: la reducción de fatalidades no guardó proporción con la marcada disminución del tráfico vehicular registrada durante los confinamientos. Esta disparidad indica que factores adicionales, diferentes a la mera reducción del flujo vehicular, incidieron en los patrones de siniestralidad vial.

Santiago de Cali figura entre los municipios colombianos con mayores problemáticas de seguridad vial, manteniendo históricamente elevados índices de siniestros y mortalidad por lesiones de tránsito. Durante la crisis sanitaria, las restricciones de movilidad y confinamiento, implementados por las autoridades en diferentes fechas durante 2020 y 2021, transformaron significativamente los patrones habituales de desplazamiento urbano. Estos cambios afectaron la distribución territorial del riesgo vial en la ciudad, reflejándose en alteraciones en la distribución espacial de las muertes por lesiones del tránsito.

En este contexto, la presente investigación se propuso identificar y caracterizar las concentraciones espaciales de alta incidencia (puntos calientes) y las anomalías territoriales en las frecuencias de mortalidad vial urbana en Santiago de Cali. El análisis abarca tres momentos temporales: antes, durante y después del confinamiento establecido por las autoridades municipales para mitigar los efectos de la pandemia de COVID-19.

2. REVISION DE LITERATURA

A partir de marzo de 2020, la mayoría de los países implementaron medidas restrictivas de confinamiento como respuesta a la pandemia de COVID-19, transformando drásticamente los patrones globales de movilidad. El Foro Internacional de Transporte documentó en su informe anual de seguridad vial (ITF, 2020) una reducción considerable en las fatalidades viales durante los primeros meses de 2020, llegando a registrar disminuciones de hasta 80% en diversas naciones durante los períodos de confinamiento más estrictos.

Si bien inicialmente se atribuyó esta reducción principalmente a las medidas de contención sanitaria, el examen pormenorizado de los datos reveló una incongruencia preocupante: la disminución de muertes no correspondía proporcionalmente con la reducción del volumen de tráfico observado. Esta discrepancia se hizo evidente al analizar el incremento en las velocidades promedio de circulación y la mayor gravedad de los siniestros viales reportados por los países participantes en el estudio. Tales hallazgos sugieren que, aunque circulaban menos vehículos, las condiciones de riesgo se intensificaron debido a comportamientos de conducción más peligrosos.

Esta complejidad del fenómeno hace necesario desarrollar análisis más específicos que consideren la duración particular de las medidas restrictivas en cada territorio y su impacto diferenciado sobre los flujos de tráfico local. Un claro ejemplo de estos cambios fue el incremento notable en el uso de bicicletas y motocicletas en

múltiples países, fenómeno que surgió como consecuencia directa de las limitaciones impuestas a la capacidad del transporte público durante la crisis sanitaria (ITF, 2020; Scorrano M, y Danielis R, 2021).

3. METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTOS

Los registros oficiales de mortalidad por siniestros viales urbanos fueron sometidos a un riguroso proceso de tratamiento de datos que incluyó depuración, normalización, geocodificación y georreferenciación espacial. Este procedimiento garantizó la calidad y consistencia de la información utilizada en el análisis. Posteriormente, se estimaron estadísticas descriptivas para caracterizar la mortalidad por lesiones de tránsito durante el período comprendido entre 2019 y 2021, abarcando así las etapas previas, durante y posterior al confinamiento por COVID-19.

Para la identificación de zonas con comportamientos atípicos en cada período temporal, se empleó la técnica de representación cartográfica mediante mapas de cajas, siguiendo la metodología propuesta por Buzai, G. y Baxendale, C. (2012). Esta herramienta permitió visualizar espacialmente las áreas que presentaban valores inusuales respecto al comportamiento general de cada año analizado.

Dado que las pruebas estadísticas confirmaron la ausencia de distribución normal en los datos, se optó por aplicar métodos no paramétricos para evaluar las relaciones entre las frecuencias de siniestros. Específicamente, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para examinar las asociaciones entre los diferentes períodos temporales estudiados.

El análisis de dependencia espacial se desarrolló mediante la aplicación del Índice Global de Moran, el cual permitió examinar las condiciones de autocorrelación espaciotemporal de las frecuencias de siniestros a lo largo de la ventana temporal establecida. Complementariamente, se implementó el Indicador Local de Autocorrelación Espacial-LISA (Talen, E., y Anselin, L., 1998) para detectar agrupamientos espaciales univariados específicos en cada año, identificando así patrones locales de concentración y dispersión de la mortalidad vial.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Los indicadores estadísticos descriptivos mostraron patrones relativamente consistentes entre los tres años analizados, con la notable excepción del rango intercuartílico (IQR), que presentó una variabilidad considerablemente mayor en 2019. Específicamente, este parámetro alcanzó valores aproximadamente del doble en comparación con los registrados durante 2020 y 2021, sugiriendo una mayor dispersión en la distribución de la mortalidad vial durante el período prepandémico.

El año 2021 exhibió características particulares que lo distinguieron claramente de los períodos anteriores. Este año se caracterizó por presentar un comportamiento estadísticamente atípico, alejándose significativamente de los patrones de distribución normal observables en los datos. Esta anomalía estadística refleja posiblemente los efectos prolongados y las adaptaciones en los patrones de movilidad urbana durante la fase de recuperación postconfinamiento.

La diferencia en el comportamiento estadístico entre 2021 y los años precedentes resulta especialmente relevante para comprender la evolución temporal de la siniestralidad vial en el contexto de la pandemia. Mientras que 2019 mostró mayor variabilidad entre comunas, 2021 presentó una distribución más homogénea, pero con desviaciones respecto a la normalidad estadística esperada.

Los detalles específicos de estos hallazgos estadísticos, incluyendo los valores exactos de cada medida descriptiva y sus comparaciones temporales, se presentan de manera comprehensiva en la Tabla 1.

El análisis espacial reveló patrones territoriales diferenciados en cada período temporal, evidenciando una clara migración geográfica de las zonas con comportamientos inusuales de mortalidad vial. Durante 2019, las áreas con mayor concentración de anomalías se ubicaron predominantemente en la región occidental de la ciudad, estableciendo un patrón de referencia previo a la pandemia.

Con la llegada del confinamiento en 2020, se observó un desplazamiento notable hacia la zona central de

Santiago de Cali, sugiriendo que las restricciones de movilidad influyeron en la redistribución espacial del riesgo vial. Este cambio puede atribuirse a las modificaciones en los patrones de desplazamiento urbano, donde ciertas actividades esenciales mantuvieron la concentración de flujos vehiculares en áreas centrales de la ciudad.

Tabla 1. Estadística descriptiva de la mortalidad por lesiones del tránsito urbano en Santiago de Cali, 2019-2021

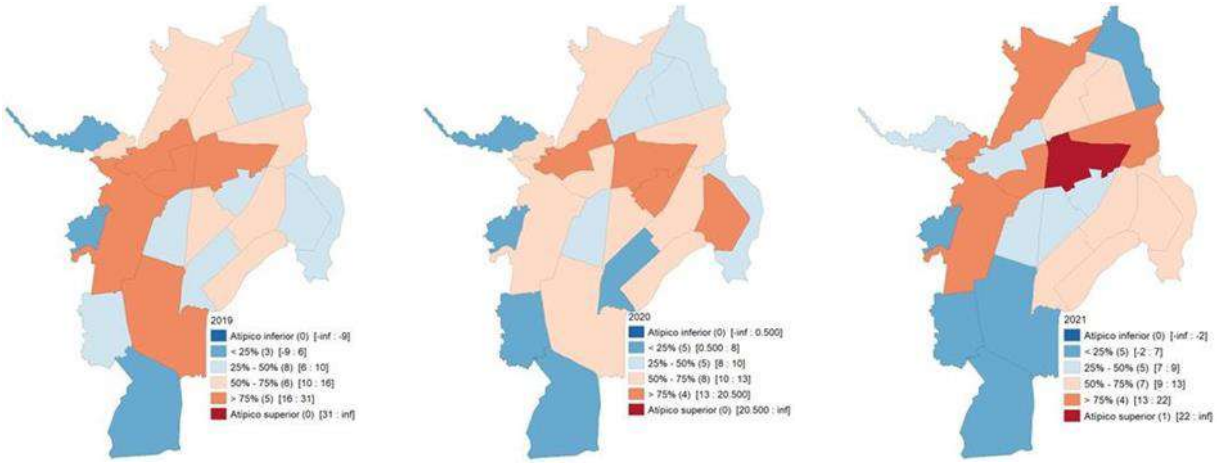
Estadístico	2019	2020	2021
Mediana	10	10	9
Q1	6	8	7
Q3	16	13	13
IQR	10	5	6
Mínimo	1	4	3
Máximo	29	19	29
Rango	28	15	26
Shapiro-Wilk	0,953*	0.965*	0.879
Significancia	0.366	0.584	0.011
Total	254	228	229
N° observaciones	22	22	22

*Se acepta Ho, distribución normal

El año 2021 marcó una nueva transición espacial, caracterizada por el desplazamiento de las anomalías hacia el sector oriental de la ciudad. Este movimiento hacia el oriente presentó características particularmente atípicas que lo diferenciaron de los patrones observados en años anteriores. La zona oriental mostró comportamientos estadísticamente inusuales que requieren atención especial en términos de políticas de seguridad vial.

A lo largo de estos tres períodos, el distrito central de negocios (CBD) se mantuvo como punto de referencia geográfico constante, permitiendo establecer comparaciones espaciales coherentes entre los diferentes años analizados. Esta progresión espacial oeste-centro-oriente refleja las dinámicas cambiantes de la movilidad urbana durante las diferentes fases de la pandemia.

La representación cartográfica de estos patrones espaciales y su evolución temporal se presenta detalladamente en la Figura 1.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 1. Mapas de caja de la distribución espacial de la mortalidad por lesiones del tránsito urbano en Santiago de Cali. (a) 2019, (b) 2020 y (c) 2021

El análisis de correlación mediante el coeficiente de Spearman arrojó resultados que permiten comprender las relaciones estadísticas entre los diferentes períodos temporales estudiados. Los hallazgos revelaron la existencia de asociaciones significativas entre las frecuencias de mortalidad vial registradas en los distintos

años, aunque con intensidades variables según el período comparado.

Específicamente, la comparación entre las frecuencias de 2019 y 2020 evidenció correlaciones de magnitud fuerte, sugiriendo que, a pesar del impacto inicial de la pandemia y las medidas restrictivas implementadas, los patrones espaciales de siniestralidad mantuvieron cierta continuidad territorial. Este resultado indica que las zonas históricamente problemáticas conservaron, en gran medida, su condición de riesgo durante el primer año de la crisis sanitaria.

Por otra parte, las correlaciones observadas entre 2019-2020 y 2020-2021 se ubicaron en el rango moderado, reflejando una progresiva transformación en los patrones espaciales de la mortalidad vial. Esta disminución en la intensidad de la correlación sugiere que los efectos prolongados de la pandemia, junto con los procesos de adaptación y recuperación gradual de las actividades urbanas, generaron modificaciones más pronunciadas en la distribución territorial del riesgo vial.

Los valores específicos de estos coeficientes de correlación, junto con sus respectivos niveles de significancia estadística y intervalos de confianza, se detallan comprehensivamente en la Tabla 2, proporcionando el sustento cuantitativo de estos hallazgos.

Tabla 2. Matriz de correlación de Spearman de la mortalidad por lesiones del tránsito urbano en Santiago de Cali

	2019	**2020**	**2021**
2019	1,000	0,743 (0,000)	0,589 (0,004)
2020		1,000	0,507 (0,016)
2021			1,000

Entre paréntesis, la significancia

El análisis del Índice de Moran no reveló evidencia estadísticamente significativa de autocorrelación espacial en ninguno de los escenarios temporales examinados. Esta ausencia de dependencia espacial global sugiere que los patrones de mortalidad vial no presentan una estructura espacial sistemática a nivel de toda la ciudad, indicando que las concentraciones de siniestros responden más a factores locales específicos que a procesos de difusión espacial.

Sin embargo, el examen mediante indicadores locales (LISA) permitió identificar agrupamientos espaciales de alta concentración que mantuvieron una notable persistencia temporal. Estos clústeres Alto-Alto exhibieron una localización consistente en las proximidades del distrito central de negocios (CBD), manteniendo esta característica a lo largo de los tres años analizados. Esta persistencia espacial sugiere una relación estructural entre la centralidad urbana y la concentración de riesgo vial.

La continuidad de estos patrones de concentración cerca del CBD puede atribuirse a la naturaleza de las actividades económicas que caracterizan esta zona. Como epicentro de actividades laborales formales e informales, esta área genera flujos de movilidad constantes que se mantuvieron activos incluso durante las restricciones pandémicas. Los trabajadores del sector informal, en particular, continuaron sus desplazamientos hacia y desde esta zona central debido a la naturaleza presencial de sus actividades económicas.

Esta dinámica laboral explica parcialmente por qué los conglomerados de alta mortalidad vial persistieron en el entorno del CBD, evidenciando que ciertos patrones de movilidad urbana mantuvieron su vigencia a pesar de las medidas de confinamiento implementadas.

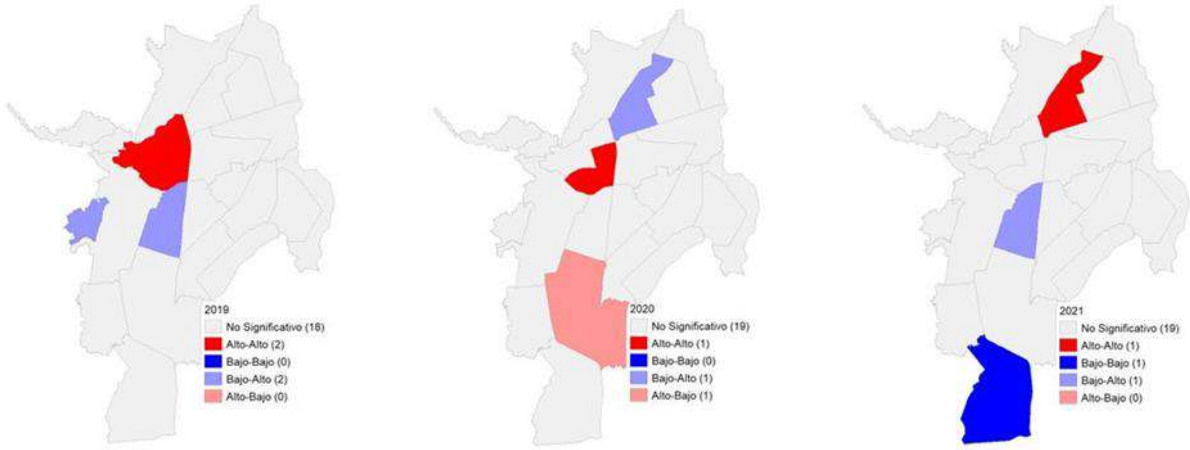
La distribución espacial de estos agrupamientos y su relación con el CBD se ilustra comprehensivamente en la Figura 3.

5. CONCLUSION Y TRABAJO FUTURO

Los resultados de esta investigación ofrecen elementos fundamentales para el diseño y formulación de políticas

públicas de movilidad urbana que respondan eficazmente ante eventos extraordinarios de gran escala, tal como fue la pandemia de COVID-19. La evidencia empírica generada proporciona bases sólidas para que las autoridades locales puedan anticipar y gestionar los cambios en los patrones de siniestralidad vial durante crisis similares.

La comprensión de las dinámicas espaciales y temporales de la mortalidad vial durante diferentes fases de emergencia sanitaria resulta crucial para desarrollar estrategias de intervención más precisas y territorialmente focalizadas. Los hallazgos sobre la migración de zonas críticas y la persistencia de ciertos focos de riesgo cerca del CBD sugieren la necesidad de implementar medidas diferenciadas según las características específicas de cada sector urbano.



(a) **(b)** **(c)**

Figura 2. Mapas del Indicador Local de Asociación Espacial-LISA de la distribución espacial de la mortalidad por lesiones del tránsito urbano en Santiago de Cali: (a) 2019, (b) 2020 y (c) 2021

Adicionalmente, la identificación de patrones atípicos durante el período de recuperación postconfinamiento señala la importancia de mantener sistemas de monitoreo continuo que permitan detectar cambios emergentes en la seguridad vial urbana. Esto cobra especial relevancia para la planificación de la movilidad en escenarios de normalización gradual tras eventos disruptivos.

Como perspectiva futura, se contempla el desarrollo de modelos confirmatorios que permitan validar estadísticamente las relaciones identificadas en este análisis exploratorio. Estos modelos avanzados contribuirán a fortalecer la base científica para la toma de decisiones en políticas de seguridad vial y movilidad urbana sostenible. Es importante señalar que la potencial previsibilidad de las zonas de alta mortalidad se fundamenta en la identificación de patrones espaciales, y no constituye predicciones directas; por lo tanto, se requieren análisis complementarios futuros para establecer capacidades predictivas precisas.

Agradecimientos
Los autores expresan su reconocimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle por el respaldo económico brindado para el desarrollo de esta investigación. El apoyo financiero se enmarcó en el proyecto institucional de convocatoria interna identificado con el código CI 21190, el cual hizo posible la ejecución de las diferentes fases metodológicas del estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

International Transport Forum-ITF. (2020). *Road Safety Annual Report*. Disponible en: https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2020_0.pdf

Scorrano M. y Danielis R. (2021). Active mobility in an Italian city: Mode choice determinants and attitudes before and during the Covid- 19 emergency. *Research in Transportation Economics*; 86: 101031. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101031

Talen, E., y Anselin, L. (1998). Assessing spatial equity: an evaluation of measures of accessibility to public playgrounds. *Environment and planning A*, 30(4), 595-613. https://doi.org/10.1068/a300595

Buzai, G. y Baxendale, C. (2012). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica Ordenamiento territorial. Temáticas de base vectorial (Tomo 2)*. Lugar Editorial S.A.

*Jackeline Murillo (*jackeline.murillo@correounivalle.edu.co*)*
Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Ciudad Universitaria Meléndez, Valle del Cauca, Colombia

Ribka Soracipa (sitaroch@gmail.com)
Harmony Research Group, Hanami Center for Research and Psychosocial Care, Bogotá, Colombia)

*Daniel Guzman (*daniel.eduardo.guzman@correounivalle.edu.co*)*
Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Ciudad Universitaria Meléndez, Valle del Cauca, Colombia

*Ciro Jaramillo (*ciro.jaramillo@correounivalle.edu.co*)*
Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Ciudad Universitaria Meléndez, Valle del Cauca, Colombia

DESAFIOS DO USO DA REALIDADE VIRTUAL EM INSPEÇÕES DE SEGURANÇA VIÁRIA

Djalmo Dutra dos Santos Neto[1], Laura Beatriz Silva Rössler[1], Christine Tessele Nodari[1], Ana Margarita Larrañaga Uriarte[1], Bruno Braga Batista[2]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]WRI Brasil

RESUMO
O aumento de fatalidades no trânsito impulsiona agendas nacionais e internacionais com metas para sua redução. As Inspeções de Segurança Viária (ISV) buscam identificar fatores de risco em rodovias, mas sua aplicação em campo enfrenta desafios operacionais, especialmente em vias com infraestrutura precária. Este estudo avalia o uso da realidade virtual na aplicação do método ISP (Índice de Segurança Potencial), em trecho da rodovia RS-020, Serra Gaúcha, no estado do Rio Grande do Sul. Dois avaliadores aplicaram o método presencial e virtualmente. Os resultados indicam que a realidade virtual pode mitigar limitações operacionais e favorecer maior padronização em características objetivas, enquanto a abordagem presencial contribui para a percepção de aspectos subjetivos e sensoriais. As principais diferenças entre os resultados são mais associadas ao perfil dos avaliadores do que ao formato aplicado. Conclui-se que as abordagens são complementares e fortalecem a efetividade das inspeções de segurança viária de forma híbrida.

1. INTRODUÇÃO

A insegurança viária ocupa posição central nas agendas nacionais e internacionais, devido ao crescente aumento de fatalidades no trânsito. Estima-se que, globalmente, 1,19 milhão de pessoas morrem por ano devido a sinistros viários (WHO, 2023). Ademais, os sinistros de trânsito são a principal causa de morte entre crianças, adolescentes e jovens de 5 a 29 anos no mundo. Para modificar esse cenário, destacam-se iniciativas da Organização das Nações Unidas (ONU) como a Primeira Década de Ação pela Segurança no Trânsito (2011–2020) e, atualmente, a Segunda Década de Ação (2021–2030) (ONU, 2020), que reforçam a importância de ações estratégicas e preventivas para reduzir as mortes e lesões decorrentes de sinistros viários. Recentemente, a Reunião Ministerial Global de Segurança Viária de 2025 resultou na Declaração de Marrakech, que enfatiza a necessidade de implementar abordagens baseadas em evidências para atingir as metas internacionais de redução das fatalidades no trânsito (MARRAKECH DECLARATION, 2025). No cenário nacional, o Brasil enfrenta desafios na promoção da segurança viária. O Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS) estabelece a meta de reduzir em 50% as fatalidades no trânsito até 2030 (BRASIL, 2024). Entretanto, dados recentes indicam um aumento nas fatalidades: Segundo o Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV), em 2023, foram registrados 34.937 óbitos em ocorrências de transporte terrestre no país, um acréscimo de 987 mortes em relação a 2022, segundo dados do DATASUS compilados pelo ONSV (ONSV, 2025).

Nesse contexto, Inspeções de Segurança Viária (ISVs) se mostram uma estratégia promissora, permitindo a identificação prévia de riscos nas rodovias e evitando intervenções corretivas tardias. Estudos apontam que investimentos em segurança viária podem gerar retornos significativos, justificando economicamente a implementação dessas medidas (WORLD BANK, 2022). Dentre as abordagens disponíveis para ISVs, tem-se o Índice de Segurança Potencial (ISP), desenvolvido originalmente por Nodari (2003). O ISP é uma ferramenta preventiva que avalia o nível de segurança de segmentos rodoviários com base em características físicas, sem exigir dados de sinistros ou volumes de tráfego. O método ISP é estruturado em um checklist que avalia características da infraestrutura viária divididas em 9 construtos: Superfície, Curvas, Interseções, Sinalização Horizontal e Vertical, Elementos Longitudinais, Seção Transversal, Usuários Vulneráveis, Laterais da Via e Aspectos Gerais. Cada construto é avaliado por meio de itens que recebem notas conforme a severidade dos problemas encontrados. O ISP é calculado a partir de três níveis: primeiramente, obtêm-se os índices parciais de cada construto com base na média ponderada das notas atribuídas aos seus itens; em seguida, esses índices são combinados por meio da média geométrica para compor o $ISP_{global/segmento}$. Por fim, é possível calcular o ISP_{global} a partir da média geométrica dos valores do $ISP_{global/segmento}$. Contudo, para ampliar a aplicabilidade do método, especialmente em contextos operacionais adversos, torna-se necessário adaptá-lo para o uso de novas tecnologias, como a realidade virtual. Este artigo, portanto, tem como objetivo avaliar o uso da realidade virtual como ferramenta de aplicação do método ISP em ISVs em rodovias. Trata-se de um estudo exploratório, envolvendo análises qualitativas e observacionais, com a realização de observações em campo e virtuais.

2. METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em três macro etapas: (i) adaptação do método ISP para aplicação virtual, (ii)

coleta de dados e (iii) análise dos resultados. Inicialmente, o método ISP original foi adaptado através de ajustes no checklist, buscando garantir maior clareza e consistência na aplicação híbrida. A adaptação foi validada experimentalmente, com ajustes adicionais baseados nas percepções dos avaliadores. A segunda etapa consistiu na escolha do trecho a ser auditado presencial e virtualmente, considerando sua relevância em termos de segurança viária e complexidade geométrica. Além disso, nessa etapa foi feita a coleta de dados por meio da inspeção presencial realizada por dois avaliadores no trecho selecionado, concomitantemente houve a gravação de vídeos em 360º, que posteriormente foram editados para sua utilização em inspeção virtual pelos mesmos avaliadores que participaram presencialmente. A gravação dos vídeos 360º ao mesmo tempo que se realiza a inspeção presencial, permite simular as mesmas condições ambientais para a posterior comparação dos resultados dos dois formatos. A inspeção virtual foi então conduzida a partir dos vídeos gravados, e visualizados com óculos de realidade virtual, permitindo uma análise detalhada e controlada dos aspectos físicos da via. Por fim, a etapa de análise dos dados compreendeu comparações qualitativas das avaliações realizadas nos formatos presencial e virtual, utilizando como ferramenta complementar uma adaptação da Matriz de Slack (Slack, 1996) para visualização das divergências observadas.

3. RESULTADOS

Os resultados deste estudo são apresentados conforme as três macro etapas descritas na metodologia. Cabe destacar que não foram realizadas análises estatísticas, pois o estudo possui caráter exploratório e envolve uma amostra reduzida.

3.1. Adaptação do Método ISP

As adaptações do checklist original foram feitas por meio da aplicação do método ISP com vídeos 360º gravados em um trecho experimental de 10 km. Quatro auditores aplicaram o método de ISP no trecho e discutiram modificações que poderiam tornar o checklist mais aplicável no ambiente virtual. Essas discussões resultaram na remoção de um item, na reformulação de outro e na inclusão de oito novos itens distribuídos em 3 construtos. Essas mudanças buscaram tornar o método aplicável presencial e virtualmente.

3.2. Coleta de Dados

O segmento selecionado para aplicação do método adaptado foi o trecho da rodovia RS-020 situado entre os municípios de Taquara e São Francisco de Paula, no estado do Rio Grande do Sul. Este segmento possui aproximadamente 35 km e foi escolhido por sua complexidade geométrica, com presença de curvas acentuadas e variações altimétricas significativas, fatores que ampliam os riscos de sinistros viários e tornam a inspeção relevante. A gravação dos vídeos em 360° foi realizada simultaneamente à inspeção presencial, utilizando a câmera Insta360 X4. A câmera foi posicionada externamente ao veículo utilizado na inspeção, permitindo capturar imagens detalhadas e estáveis do trecho percorrido. Além disso, o equipamento possibilitou o georreferenciamento dos vídeos, facilitando o controle preciso de informações como velocidade e localização.

3.3. Comparação entre inspeções

A comparação entre a realização dos dois formatos de inspeção revelou diferenças operacionais e perceptivas importantes. A aplicação presencial enfrentou limitações logísticas, como a ausência de acostamento ao longo do trecho, o que inviabilizou paradas a cada quilômetro para avaliação detalhada de cada segmento. Isso levou à realização da inspeção com o veículo em movimento, exigindo que os avaliadores observassem a via e preenchessem o checklist simultaneamente. Essa dinâmica gerou desconforto físico para um dos avaliadores, que precisou parar a atividade, e a coleta foi interrompida após 12 quilômetros. Já a inspeção virtual, realizada com auxílio dos vídeos em 360° e visualização por óculos de realidade virtual, proporcionou maior controle do processo de avaliação. Os avaliadores puderam pausar, retomar e revisar os vídeos quantas vezes fosse necessário, favorecendo uma análise mais detalhada e compatível com a estrutura proposta no método ISP. No entanto, a ausência da experiência física da via reduziu a percepção de alguns aspectos sensoriais, como o desconforto em curvas e frenagem do veículo, o que pode afetar o julgamento de certos critérios. Ainda assim, os resultados indicaram que, para diversos construtos, como Superfície e Sinalização, as avaliações foram consistentes entre os formatos, o que reforça o potencial da inspeção virtual como ferramenta complementar. A análise dos construtos avaliados ao longo do trecho revelou diferenças relevantes entre os avaliadores, com destaque para o impacto da subjetividade na aplicação do método. Os construtos "Curvas", "Elementos Longitudinais" e "Laterais da Via" concentraram as maiores divergências de notas, tanto no formato presencial quanto no virtual, indicando que esses elementos são mais suscetíveis à interpretação individual. Essas

variações, observadas especialmente nos construtos mais subjetivos, indicam que o método pode ser sensível a diferentes interpretações mesmo quando aplicado em condições controladas. Em contraste, construtos como "Superfície", "Sinalização Horizontal e Vertical", "Usuários Vulneráveis" e "Seção Transversal" apresentaram maior estabilidade nos resultados, com consistência entre os avaliadores e entre os formatos de aplicação. Isso demonstra que, em construtos de interpretação mais objetiva, a aplicação virtual do método é tão eficaz quanto a presencial, oferecendo inclusive mais controle sobre o processo avaliativo.

Esses padrões são evidenciados na Figura 1, que apresenta o ISP_{global} por segmento quilométrico. A análise do gráfico permitiu identificar quatro tendências centrais: o Avaliador 1, de modo geral, atribuiu notas mais altas que o Avaliador 2; as notas do Avaliador 1 foram mais baixas na versão virtual, indicando maior criticidade diante da possibilidade de revisão; o Avaliador 2 apresentou pouca variação entre os formatos; e, por fim, a diferença entre os avaliadores foi menor na aplicação virtual, sugerindo que esse formato pode favorecer maior padronização entre profissionais com perfis distintos. Dessa forma, os resultados indicam que o principal fator de variação está mais relacionado ao perfil do avaliador, do que ao formato da inspeção.

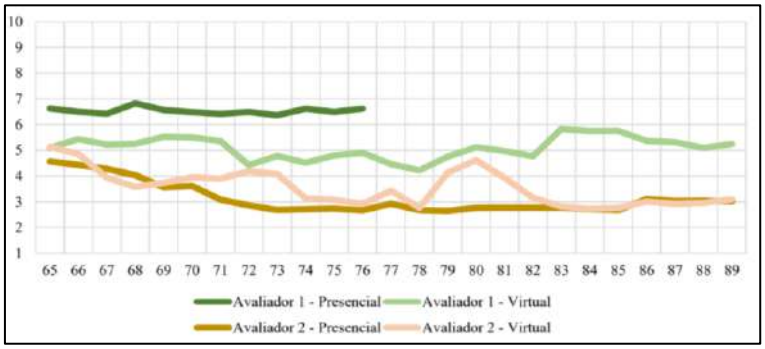


Figura 1: Comparação das notas $ISP_{global/segmento}$ dos Avaliadores 1 e 2 nos formatos presencial e virtual, por segmento quilométrico.

Além das análises para cada segmento, também foram calculados os $ISP_{globais}$ de cada construto para todo o trecho. Para sistematizar e comparar as variações observadas entre os diferentes construtos avaliados, foi utilizada uma adaptação da lógica da Matriz de Slack. A matriz foi reformulada neste estudo para representar graficamente as diferenças de notas atribuídas nas inspeções. Foram consideradas quatro dimensões principais: diferença entre avaliadores no formato presencial, diferença entre avaliadores no formato virtual, diferença entre os formatos para o Avaliador 1 e diferença entre os formatos para o Avaliador 2. Como a matriz original representa apenas duas dimensões, optou-se por calcular médias representativas para posicionar cada construto nos eixos da matriz. O eixo das abscissas expressa a média das diferenças absolutas entre avaliadores (1 e 2), enquanto o eixo das ordenadas representa a média das diferenças absolutas entre os métodos (presencial e virtual). Cada ponto do gráfico corresponde a um construto e está acompanhado por uma elipse, cuja extensão indica a variação real observada em cada dimensão, ou seja, os limites da elipse representam as menores e maiores diferenças registradas para aquele construto. A matriz resultante é dividida em quatro quadrantes, que ajudam a interpretar a estabilidade dos construtos.

O Quadrante I reúne construtos com alta diferença tanto entre avaliadores quanto entre métodos, gerando resultados inconclusivos. No Quadrante II estão os construtos avaliados de forma consistente entre auditores, mas sensíveis ao formato de aplicação, o que recomenda o uso de auditorias híbridas. Já o Quadrante III agrupa os construtos com baixa variação entre avaliadores e entre métodos, ou seja, aqueles cuja avaliação é mais objetiva e que não apresentam perdas significativas de qualidade quando analisados apenas virtualmente. Por fim, o Quadrante IV é composto por construtos com alta diferença entre avaliadores, mas baixa diferença entre métodos, o que evidencia sensibilidade à interpretação individual e demanda por maior padronização ou capacitação dos auditores para garantir a confiabilidade dos resultados.

Essa representação permite visualizar de forma integrada os padrões de variação dos construtos e auxilia na identificação de quais elementos podem ser priorizados em inspeções exclusivamente virtuais e quais

demandam maior rigor metodológico. A Figura 2 ilustra a matriz adaptada, destacando os construtos analisados com suas respectivas variações observadas. A interpretação da matriz reforça os achados das análises anteriores e permite classificações mais estratégicas sobre o uso do método ISP em formato virtual. Nenhum construto foi posicionado no Quadrante I, o que indica que, mesmo com limitações, a aplicação do método em ambiente virtual não resultou em variações críticas combinadas entre avaliadores e métodos. No entanto, a elipse associada ao construto "Elementos Longitudinais" ultrapassa os limites desse quadrante, sugerindo que, em situações pontuais, esse construto apresentou instabilidades significativas.

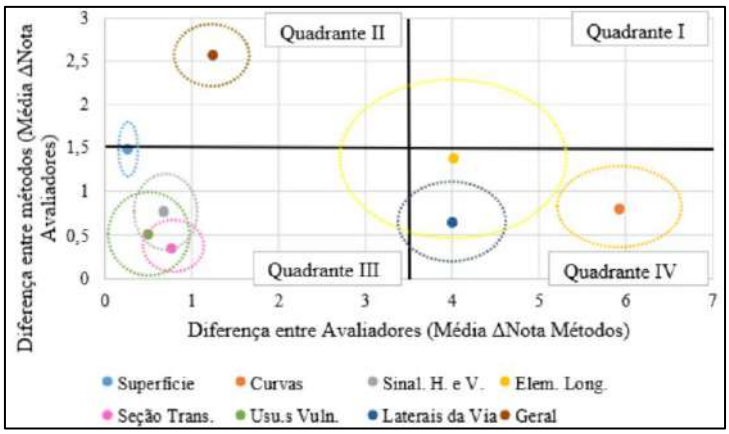


Figura 2: Matriz de Slack adaptada com a posição e variações das médias das diferenças das notas por construto.

O construto "Geral", por sua vez, foi posicionado no Quadrante II, caracterizando-se por ter baixa diferença entre avaliadores, mas variação considerável entre os formatos. Isso indica que, embora seja avaliado de forma consistente por diferentes pessoas, é sensível às limitações ou características do formato virtual, recomendando-se sua avaliação complementar por meio de observação em campo. Os construtos "Superfície", "Seção Transversal", "Usuários Vulneráveis" e "Sinalização Horizontal e Vertical" foram localizados no Quadrante III, o mais favorável para a adoção de auditorias virtuais com um único avaliador. Isso reforça a robustez e a objetividade desses elementos, indicando que podem ser avaliados com maior confiança mesmo sem observação presencial.

Por fim, os construtos "Curvas", "Elementos Longitudinais" e "Laterais da Via" foram posicionados no Quadrante IV. Isso indica que, embora mantenham consistência entre os formatos, suas avaliações variaram bastante entre os auditores. Assim, trata-se de construtos cuja confiabilidade depende fortemente do perfil de quem aplica o método, recomendando-se sua avaliação por múltiplos auditores ou com maior detalhamento nas instruções de preenchimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do método ISP em inspeções de segurança viária demonstrou ser viável e operacionalmente promissora, especialmente em cenários com limitações operacionais para a realização de inspeções presenciais. A adaptação do *checklist*, aliada à utilização de vídeos em 360° e ao uso de realidade virtual, permitiu preservar a estrutura e os critérios originais do método ISP, mantendo a coerência técnica e a aplicabilidade dos resultados. Durante a etapa de aplicação presencial, os desafios logísticos, como a ausência de acostamento e as condições de segurança no trecho auditado, comprometeram a coleta de dados, reforçando a relevância da auditoria virtual como alternativa segura e replicável. Por outro lado, aspectos perceptivos, como a experiência sensorial da via, ainda representam uma limitação da avaliação em ambiente virtual, especialmente para construtos mais subjetivos. Os resultados demonstraram que a maior fonte de variação está associada ao perfil e julgamento dos avaliadores, mais do que ao formato da auditoria em si. Construtos mais objetivos, como "Superfície" e "Sinalização", apresentaram alta consistência entre avaliadores e formatos, indicando sua adequação para auditorias exclusivamente virtuais. Já os construtos mais interpretativos, como "Curvas" e "Elementos Longitudinais", revelaram maior sensibilidade à subjetividade, exigindo atenção metodológica específica. A análise por meio da Matriz de Slack adaptada permitiu uma melhor interpretação dos resultados. Embora nenhum construto tenha apresentado variações críticas simultâneas entre avaliadores e métodos, os

diferentes posicionamentos observados sugerem que o uso combinado das abordagens presencial e virtual pode ampliar a qualidade e a confiabilidade das auditorias e inspeções.

Portanto, conclui-se que os formatos presencial e virtual não devem ser encarados como alternativas excludentes, mas sim como ferramentas complementares dentro de um processo integrado de inspeção de segurança viária. Recomenda-se sempre que possível, a adoção de inspeções que combinem a experiência prática em campo com o detalhamento técnico proporcionado pelas análises virtuais. Tal abordagem tem o potencial de ampliar a efetividade das avaliações, oferecendo uma leitura mais completa e precisa dos riscos viários, e promovendo um equilíbrio entre a percepção subjetiva de segurança e análise objetiva de infraestrutura.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio concedido por meio da bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo nº 30306361/2021-3) e por meio do projeto Universal (Processo nº 404476/2021-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL (2024) Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito 2021 – 2023 (Pnatrans) – Terceira versão. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Anexo_PNATRANS2023.pdf (acesso em 26/01/2025).

Marrakech Declaration (2025). Fourth Global Ministerial Conference on Road Safety: "Commit to Life". Marrakech, 18–20 feb. Disponível em: https://roadsai.org/assets/International%20Document/The%20Marrakech%20Declaration_2025.pdf (acesso em: 19/05/2025).

Nações Unidas (2020). Improving global road safety. Resolution A/RES/74/299. Disponível em: https://undocs.org/en/A/RES/74/299 (acesso em 26/01/2025).

Nodari, C. (2003) *Método de Avaliação da Segurança Potencial de Segmentos Rodoviários Rurais de Pista Simples*. Tese (Doutorado em Sistemas de Transportes e Logística) – UFRGS, Porto Alegre. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3675 (acesso em 12/12/2024).

ONSV (2023) Dados consolidados de óbitos no trânsito brasileiro. Disponível em: https://www.onsv.org.br (acesso em 26/01/2025).

ONSV (2025) Observatório Nacional de Segurança Viária. Análise dos dados de mortalidade no trânsito: Brasil, 2023. São José dos Campos. Disponível em: https://www.onsv.org.br/pdi/dados/analise-datasus-2023 (acesso em 14/07/2025).

Slack, N. Administração da produção. São Paulo: Atlas, 1996. 526 p.

WHO (2023) World Health Organization. Road traffic injuries. Geneva. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries (acesso em 14/07/2025).

WORLD BANK (2022) A decade of saving lives through road safety investments. Washington, D.C. Disponível em: https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/12/01/a-decade-of-saving-lives (acesso em 14/07/2025).

Djalmo Dutra dos Santos Neto (djalmodutra@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, LASTRAN, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, 90035-190.
Laura Beatriz Silva Rössler (laurarossler735@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, LASTRAN, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, 90035-190.
Christine Tessele Nodari (piti@producao.ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, LASTRAN, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, 90035-190.
Ana Margarita Larrañaga Uriarte (analarra@producao.ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, LASTRAN, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Centro Histórico, Porto Alegre - RS, 90035-190.
Bruno Braga Batista (bruno.batista@wri.org)
WRI Brasil, Programa de Cidades, Av. Independência, 1299 - Independência, Porto Alegre - RS, 90035-077

EDUCAÇÃO E FISCALIZAÇÃO NA SEGURANÇA VIÁRIA: UMA ANÁLISE DE INDICADORES PARA UM TRÂNSITO SEGURO

Wesley Miranda de Carvalho[1], **Tiago Augusto Pianezzer**[1], **Jorge Luiz Silva Hermenegildo**[1], **Camila Belleza Maciel Barreto**[1], **Flavio De Mori**[1], **Valter Zanela Tani**[1], **Wellington Longuini Repette**[1]
[1]Laboratório de Transportes e Logística – Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
A mensuração da eficiência das políticas de segurança viária depende da utilização sistemática de indicadores capazes de refletir o desempenho de diferentes estratégias adotadas pelos órgãos responsáveis. Este artigo objetivou identificar e analisar indicadores nos blocos de Educação para o Trânsito e Fiscalização, empregando uma abordagem descritiva, com análise documental e pesquisa bibliográfica. Os indicadores desses blocos englobam quantidade e alcance de campanhas de educação e fiscalização de limite de velocidade, consumo de álcool, etc. Também revelam um panorama de indicadores, que, embora quantifiquem ações e comportamentos de risco, evidenciam a necessidade de uma abordagem mais integrada e baseada em evidências para otimizar a gestão da segurança viária. Conclui-se que a padronização e a integração dos indicadores entre esses blocos são cruciais para aprimorar o monitoramento, direcionar intervenções e, consequentemente, reduzir comportamentos de risco, fomentando uma gestão mais estratégica da segurança viária.

1. INTRODUÇÃO

A segurança viária é um tema transversal que envolve áreas como saúde pública, engenharia, direito e sociologia, sendo reconhecida internacionalmente como um desafio coletivo. A magnitude dos sinistros de trânsito levou órgãos como a Organização Mundial da Saúde (OMS) e a Organização das Nações Unidas (ONU) a promoverem duas Décadas de Ação para a Segurança Viária (2011–2020 e 2021–2030), consolidando o entendimento de que se trata de uma questão de saúde pública mundial (WHO, 2018). A relevância do tema também está expressa na Agenda 2030, com metas específicas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como a redução da mortalidade no trânsito (ODS 3) e o estímulo a transporte seguros e sustentáveis (ODS 11) (ONU, 2015).

A abordagem contemporânea da gestão da segurança viária tem se afastado da responsabilização individual, adotando modelos que consideram as falhas humanas como inevitáveis. A Visão Zero, originada na Suécia, propõe a eliminação de mortes no trânsito por meio de um sistema projetado para absorver erros (PIARC, 2025). A OMS, por meio do conceito de Sistema Seguro, reforça essa lógica, articulando elementos como infraestrutura, velocidade, comportamento e tecnologia (PIARC, 2025). Em contraponto às limitações contextuais e institucionais desse modelo, foi proposto o *Institutional Strategy Environment* (ISE), que enfatiza a necessidade de adaptar as políticas públicas às realidades locais, considerando as particularidades organizacionais, sociais, econômicas e legislativa de cada território, conforme aplicado em países como Benin, Gana e Etiópia (Carnis, 2022). Complementarmente, a norma ISO 39001 oferece diretrizes para incorporar a segurança viária à gestão organizacional (ABNT, 2015).

Essas abordagens dependem diretamente do uso de indicadores para orientar decisões. A coleta e a análise de dados permitem identificar padrões, monitorar riscos e planejar intervenções. Ferramentas como o *International Road Assessment Programme* (iRAP) classificam riscos associados à infraestrutura viária (iRAP, 2025), enquanto, na União Europeia, projetos como o *Baseline* utilizam indicadores para acompanhar avanços (UE, 2025). A eficácia das políticas, portanto, está atrelada à capacidade de medir e de comunicar resultados de forma sistemática e comparável. Li *et al.* (2024), ao estimarem as lesões evitadas, a partir da aplicação dos protocolos iRAP em 74 países, no período de 2016 a 2024, demonstram a importância de avaliações claras para validar o impacto de intervenções em segurança viária.

No Brasil, a gestão da segurança viária tem se estruturado em consonância com essas diretrizes internacionais, por meio do Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS) (Brasil, 2018). Sua estrutura funcional permite embasar esta gestão em blocos temáticos: Dados de Sinistros de Trânsito; Infraestrutura; Educação para o Trânsito; Atendimento às Vítimas e aos Usuários; e Fiscalização. A análise da eficácia deste plano e de seus pilares demanda a utilização de indicadores específicos, que se comunicam entre si para proporcionar uma visão holística. Diante do exposto, este artigo propõe a exploração dos indicadores presentes em dois blocos específicos - Educação para o Trânsito e Fiscalização - cuja análise permitirá a avaliação da implementação das políticas de segurança viária no país.

2. MÉTODO

Este estudo adota uma abordagem descritiva com ênfase qualitativa para identificar e analisar indicadores de eficiência das políticas de segurança viária. O objetivo é compreender e contrastar as práticas nacionais e internacionais para a gestão da segurança no trânsito, com foco específico nos blocos de Educação para o Trânsito e Fiscalização.

A coleta de dados foi realizada a partir de análise documental e de pesquisa bibliográfica, referentes ao período de 2020 a 2025. Em relação ao Brasil, foram examinados manuais, painéis de dados e relatórios de concessionárias de rodovia. Internacionalmente, a pesquisa incluiu relatórios de organizações, literatura científica e estudos de caso, além de normas de gestão e diretrizes globais sobre segurança viária. A seleção desses materiais visou a abrangência e a relevância para a compreensão dos indicadores e estratégias adotadas globalmente.

3. RESULTADOS

A segurança viária constitui um campo multidimensional, no qual as ações educativas e fiscalizatórias desempenham papel central na prevenção de sinistros de trânsito e na mitigação de suas consequências. A educação para o trânsito busca promover a mudança de comportamento dos usuários, formando uma cultura de respeito às normas e à convivência segura nos espaços viários. Por sua vez, a fiscalização objetiva garantir o cumprimento das normas por meio do monitoramento de condutas e das aplicações de sanções. Mesmo que esses blocos temáticos sejam interdependentes, para que sejam eficazes, é fundamental, inicialmente, o desenvolvimento de indicadores específicos capazes de mensurar seu impacto de forma independente.

Nesse sentido, a pesquisa realizada identificou indicadores dos blocos temáticos de Educação para o Trânsito e Fiscalização, os quais são apresentados no Quadro 1, junto da sua definição e exemplo de aplicação.

Quadro 1: Conjunto de Indicadores de Educação para o Trânsito e Fiscalização

Bloco Temático	Indicador	Definição	Exemplos de aplicação
Educação para o Trânsito	Quantidade de campanhas	Número de campanhas realizadas por região	Brasil, 2024; São Paulo, 2024; Arteris, 2025; Rio Grande do Sul, 2025; Trafikverket, 2024; ERSO, 2022.
		Número de campanhas realizadas por temática	Trafikverket, 2024; ERSO, 2022; Arteris, 2025; Brasil, 2024; São Paulo, 2024.
		Número de campanhas realizadas por categoria de via	ERSO, 2022.
		Número de campanhas realizadas por categoria de usuário	ERSO, 2022; Arteris, 2025.
	Público alcançado	Quantidade de pessoas alcançadas por campanha	Brasil, 2024; São Paulo, 2024; Arteris, 2025; Rio Grande do Sul, 2025; Trafikverket, 2024.
		Número de abordagens por agentes de trânsito	Rio Grande do Sul, 2025.
Fiscalização	Velocidade	Porcentagem de veículos que trafegam dentro do limite de velocidade	UE, 2025; Austrália, 2025.
		Média ponderada das velocidades praticadas na rodovia, excluindo valores extremos, e segmentado por tipo de veículo	Brasil, 2022.
		Velocidade calculada com base na razão entre a extensão do trecho e o tempo de deslocamento, com o uso de dados em tempo real provenientes de fontes diversas	ABCR, 2025.
	Cinto de Segurança	Porcentagem de ocupantes do veículo que usam o cinto de segurança ou o sistema de retenção para crianças corretamente	UE, 2025; Austrália, 2025.
	Equipamentos de Proteção	Porcentagem de condutores de veículos motorizados de duas rodas e bicicletas que usam capacete de proteção	UE, 2025.
	Álcool	Porcentagem de motoristas que dirigem dentro do limite legal de Teor de Álcool no Sangue (TAS)	UE, 2025; Austrália, 2025.
	Distração	Porcentagem de motoristas que não usam um dispositivo móvel portátil	UE, 2025; Austrália, 2025.

A análise dos indicadores relacionados ao bloco de Educação para o Trânsito revela pouca diversidade de abordagens quanto à forma de mensuração. Os indicadores mais recorrentes referem-se à quantidade de campanhas realizadas, segmentadas por região, temática, categoria de via e categoria de usuário, bem como ao público alcançado por essas ações. Tais métricas, encontradas em ações como Rodovida (Brasil, 2024), Maio Amarelo (São Paulo, 2024) e Campanhas Viva (Arteris, 2025), evidenciam um esforço de quantificação das atividades educativas, ainda que com predomínio de indicadores voltados à abrangência das campanhas. Em 2024, por exemplo, o Programa Rodovida registrou mais de 2.700 ações em diferentes municípios (Brasil, 2024), enquanto a Semana Nacional de Trânsito contabilizou quase mil atividades em mais de 200 cidades (São Paulo, 2024).

A quantidade de campanhas por temática, por exemplo, permite mapear as prioridades das ações educativas, enquanto a segmentação por tipo de usuário, como pedestres, ciclistas ou motociclistas, possibilita a adequação das campanhas aos grupos mais vulneráveis. O indicador relativo ao número de abordagens por agentes de trânsito, adotado em programas como o Balada Segura (Rio Grande do Sul, 2025), representa um indicador mais operacional, permitindo análises localizadas e por agente executor. Esse programa, que contou com a participação de quase 60 mil pessoas, ilustra como a mensuração pode alcançar maior detalhamento (Rio Grande do Sul, 2025). Já o Observatório Europeu de Segurança Rodoviária (ERSO, 2022) organiza os indicadores de educação para o trânsito com foco na comparação temporal e entre países. Esses indicadores incluem, além da quantidade de campanhas, a distribuição por tipo de via e por categoria de usuário, ampliando o escopo da análise.

Em contrapartida, países como Suécia e Noruega, alinhados à filosofia da Visão Zero, utilizam indicadores voltados à mensuração direta dos efeitos das campanhas sobre a segurança viária. Iniciativas como “Velocidade Segura” e “Tráfego Sóbrio”, conduzidas pela *Trafikverket* (2024), adotam métricas que associam as ações educativas à mudança de comportamentos, como o respeito aos limites de velocidade e a condução sem álcool.

No bloco da fiscalização, os indicadores relacionados ao controle de velocidade apresentam diferentes abordagens metodológicas ao redor do mundo. A proporção de veículos que trafegam dentro dos limites legais é um dos parâmetros utilizados para aferir o cumprimento das normas de trânsito (UE, 2025; Austrália, 2025) ou ainda quando se considera a velocidade média ponderada praticada entre pontos de controle, com exclusão de valores extremos, e a segmentação por tipo de veículos, permitindo uma análise mais precisa das condições de tráfego (Brasil, 2022). Também são empregados métodos baseados na razão entre a extensão do trecho e o tempo de deslocamento, com uso de dados em tempo real provenientes de diferentes fontes, o que amplia a capacidade de monitoramento em trechos operacionais (ABCR, 2025).

Além da velocidade, o conjunto de indicadores inclui variáveis comportamentais relevantes para segurança viária. A taxa de utilização do cinto de segurança e de sistemas de retenção infantil é acompanhada por meio de observações diretas e de registros amostrais, contribuindo para a avaliação da adoção de medidas de proteção (UE, 2025; Austrália, 2025). O uso de capacetes por motociclistas e ciclistas também é monitorado como forma de aferir a adesão a dispositivos de segurança individual (UE, 2025). Indicadores relacionados ao consumo de álcool avaliam a proporção de motoristas que dirigem dentro dos limites legais de teor de álcool no sangue (UE, 2025; Austrália, 2025), enquanto a distração ao volante é mensurada com base na observação do uso de dispositivos móveis durante a condução (UE, 2025; Austrália, 2025).

Dessa forma, os indicadores analisados evidenciam diferentes formas de registrar, de organizar e de interpretar dados relacionados à segurança viária. Sua estruturação reflete a diversidade de enfoques adotados nos blocos de educação para o trânsito e de fiscalização, contemplando tanto aspectos quantitativos quanto comportamentais. A sistematização dessas informações oferece uma base para o desenvolvimento de análises e para aprofundamento das discussões apresentadas no capítulo seguinte.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo objetivou identificar e analisar indicadores de segurança viária com ênfase nos dados relacionados à fiscalização e à educação para o trânsito. Para isso, foi realizada uma revisão de literatura e análise

documental, com o intuito de compreender as estratégias adotadas para o monitoramento e avaliação das ações. A partir dessa investigação, observou-se que os indicadores constituem instrumentos centrais na estruturação das políticas de segurança viária, oferecendo subsídios para diagnóstico, planejamento e monitoramento contínuo.

A análise dos resultados evidencia a importância de uma abordagem articulada entre os blocos de educação para o trânsito e a fiscalização, em que os indicadores sejam compreendidos de forma independente, mas analisados em conjunto. A efetividade de campanhas educativas, como, por exemplo, o Rodovida (Brasil, 2024), o Maio Amarelo (São Paulo, 2024) e a Semana Nacional do Trânsito (São Paulo, 2024), depende da fiscalização alinhada aos seus objetivos. Após ações de conscientização sobre o uso do cinto de segurança ou respeito aos limites de velocidade, a verificação do comportamento real dos condutores é essencial para mensurar a mudança gerada. Sem esse monitoramento, torna-se difícil avaliar se a campanha de fato contribuiu para a redução dos comportamentos de risco. Por outro lado, os próprios dados de fiscalização podem indicar pontos críticos, onde determinados comportamentos de risco ocorrem com maior frequência. A partir desses registros, como alta incidência de velocidade acima do permitido, é possível direcionar campanhas educativas para áreas ou grupos específicos, ampliando a abrangência das ações. Essa comunicação entre os dois blocos favorece um ciclo, no qual os dados são usados tanto para planejar as ações de conscientização, quanto mensurar a efetividade das mesmas.

Estudos como os de Guimarães e Silva (2019), Eun (2021) e Dong *et al.* (2023) reforçam a importância dessa abordagem combinada, ressaltando que ações pontuais tendem a ter efeitos limitados, enquanto estratégias sustentadas e baseadas em dados apresentam maior potencial de impacto. Iniciativas como o Indicador de Velocidade Média (IVM) (Brasil, 2022) e o uso de dados em tempo real por concessionárias (ABCR, 2025) mostram avanços na estruturação de indicadores no campo da fiscalização. Na educação para o trânsito, a ampliação de ferramentas de avaliação, como pesquisas de percepção e observações de comportamento, pode qualificar o monitoramento das campanhas. A padronização dos indicadores e a integração entre educação para o trânsito e fiscalização favorece uma gestão mais estratégica da segurança viária. Ao permitir a comparação temporal e regional de resultados, essas métricas contribuem para o direcionamento de esforços e o aprimoramento contínuo das políticas públicas voltadas à promoção de comportamentos seguros no trânsito. Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas concentrem esforços na análise da efetividade de programas educativos, na identificação de relações entre indicadores de fiscalização e de comportamentos de risco e na avaliação do impacto de intervenções baseadas em evidências nos blocos de educação para o trânsito e fiscalização.

Agradecimentos
"O presente trabalho foi realizado com apoio dos Recursos de Desenvolvimento Tecnológico - RDT, da Concessionária Autopista Régis Bittencourt, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT"

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCR (2025) Painel ABCR+. Disponível em: https://melhoresrodovias.org.br/painel-abcr/. (acesso em 04/07/2025).

ABNT (2015) *Norma NBR ISO 39001 – Sistemas de gestão da segurança viária (SV) – Requisitos com orientações para uso.* Rio de Janeiro: ABNT.

ARTERIS (2025) Programas Viva. Disponível em: https://sustentabilidade.arteris.com.br/programas-viva/. (acesso em 04/07/2025).

AUSTRALIA (2025) Department of Infrastructure and Regional Development. National Road Safety Tracker: Safety Performance Indicators. Disponível em: https://datahub.roadsafety.gov.au/progress-reporting/national-road-safety-tracker/safety-performance-indicators. (acesso em 04/07/2025).

BRASIL (2018) *Lei nº 13.614, de 11 de janeiro de 2018. Cria o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS).* Brasília, DF: DOU, 12 jan. 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13614.htm. (acesso em 04/07/2025).

BRASIL (2022) Ministério dos Transportes (MTR). Secretaria Nacional de Transportes Terrestres (SNTT). Departamento de Transporte Rodoviário (DTR). *Manual dos Indicadores do Programa de Concessões de Rodovias Federais – PROCROFE. Versão 2.* Brasília, DF: MTR. 88 p. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/02/manual-procrofe-v2-final.pdf. (acesso em 04/07/2025).

BRASIL (2024) RODOVIDA: Senatran registra 2.766 ações em prol de um trânsito mais seguro em todo Brasil. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2024/02/rodovida-senatran-registra-2-766-acoes-em-prol-de-um-transito-mais-seguro-em-todo-brasil. (acesso em 04/07/2025).

CARNIS, L. (2022) Towards an Integrated Road Safety Management: the institutional-strategy environment (ISE) model. *Safety*, v. 8, n. 4, p. 83. DOI: 10.3390/safety8040083.

DONG, C.; YANG, L.; CHEN, M.; LI, N. e CHEN, F. (2023) The hybrid systems method integrating STAMP and HFACS for the causal analysis of the road traffic accident. *Ergonomics*, v. 67, n. 7, p. 971–994. DOI: 10.1080/00140139.2023.2270783.

EUN, S. J. (2021) Effects of stricter drunk-driving laws on alcohol-related road traffic death, injury, and crash rates in South Korea: a synthetic counterfactual approach using bayesian structural time series models. *Accident Analysis & Prevention*, v. 163, n. 1, p. 106455. DOI: 10.1016/j.aap.2021.106455.

ERSO (2022) *Road Safety Thematic Report – Road safety performance indicators.* Bruxelas: European Road Safety Observatory. 20 p. Disponível em: https://road-safety.transport.ec.europa.eu/document/download/2b27e9e4-74fa-4dde-a732-b077a284da4c_en?filename=Road_Safety_Thematic_Report-Road_Safety_Performance_Indicators.pdf. (acesso em 04/07/2025).

GUIMARÃES, A. G.; e SILVA, A. R. (2019) Impact of regulations to control alcohol consumption by drivers: An assessment of reduction in fatal traffic accident numbers in the Federal District, Brazil. *Accident Analysis & Prevention*, v. 127, p. 110–117. DOI: 10.1016/j.aap.2019.01.017.

iRAP (2025) iRAP Methodology fact sheets. Disponível em: https://irap.org/methodology/. (acesso em 04/07/2025).

LI, Q.; BRADFORD, J.; BACHANI, A. M. (2024) Statistical estimation of fatal and serious injuries saved by iRAP protocols in 74 countries. *PLoS ONE, v. 19, n. 4, p. e0301993*. DOI: 10.1371/journal.pone.0301993.

ONU (2015) *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.* [S. l.]: ONU. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf. (acesso em 04/07/2025).

PIARC (2025) WORLD ROAD ASSOCIATION. Safe System Principles. Disponível em: https://roadsafety.piarc.org/en/road-safety-management/safe-system-approach/safe-system-principles. (acesso em 04/07/2025).

RIO GRANDE DO SUL (2025) Departamento Estadual de Trânsito (DETRAN-RS). Balada Segura. Disponível em: https://www.baladasegura.rs.gov.br/inicial. (acesso em 04/07/2025).

SÃO PAULO (2024) Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP). Semana Nacional do Trânsito promove ações educativas e de conscientização. Disponível em: http://novasconcessoes.sp.gov.br/Style%20Library/extranet/noticias/noticia-detalhes.aspx?id=1359. (acesso em 04/07/2025).

TRAFIKVERKET (2024) Gemensam aktionsplan för säker vägtrafik 2022–2025. Disponível em: https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/samarbete-med-branschen/Samarbeten-for-trafiksakerhet/tillsammans-for-nollvisionen/gemensam-aktionsplan-for-saker-vagtrafik-2022-2025/. (acesso em 04/07/2025).

UE (2025) Baseline project. Disponível em: https://www.baseline.vias.be/en/. (acesso em 04/07/2025).

WHO (2018) *Global status report on road safety 2018.* Geneva: World Health Organization. Disponível em: https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789241565684. (acesso em 04/07/2025).

Wesley Miranda de Carvalho (wesleymc161196@gmail.com)
Tiago Augusto Pianezzer (tiago.pianezzer@gmail.com)
Jorge Luiz Silva Hermenegildo (jorge.jlsh@gmail.com)
Camila Belleza Maciel Barreto (camilabmaciel@gmail.com)
Flavio De Mori (flaviodemori@gmail.com)
Valter Zanela Tani (vztani@gmail.com)
Wellington Longuini Repette (wellington.repette@gmail.com)
Laboratório de Transportes e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário – Trindade – Florianópolis, SC, Brasil

ESTUDO EM SIMULADOR DE DIREÇÃO PARA MODELAGEM DA VELOCIDADE MÉDIA COM BASE EM CARACTERÍSTICAS DO MOTORISTA

Ruy Santos Ribeiro[1], Orlando Y. E. Albarracin[2], Guilherme Rodrigues Linhares[3], Liedi L. B. Bernucci[4], Ana Paula C. Larocca[1]
[1]EESC-USP, [2]Mackenzie, [3]Arteris S.A., [4] POLI-USP

RESUMO
Modelos de previsão de velocidade são fundamentais para avaliação da segurança viária, embora considerem tradicionalmente as características da via, ignorando o perfil dos motoristas. Este estudo tem como objetivo gerar um modelo de previsão de velocidade considerando características individuais. 120 participantes dirigiram por 2 cenários em simulador de direção: o primeiro com sinalização padrão e o segundo com sinais complementares para estimular a redução da velocidade. Modelos de regressão mista foram empregados para analisar efeitos fixos e aleatórios. Dezoito características foram coletadas por meio de questionários, entre elas perfil do condutor, comportamento, experiência ao volante, condições visuais e histórico de segurança. Deficiências visuais, especialmente miopia e astigmatismo, influenciaram significativamente a velocidade. Interações entre variáveis mostraram que motociclistas com exposição moderada a rodovias tendiam a dirigir mais rápido durante a simulação. Os resultados indicam que incluir características de condutores pode aprimorar modelos preditivos e orientar sinalizações mais adaptadas e eficazes.

1. INTRODUÇÃO

A previsão da velocidade dos veículos representa um dos pilares fundamentais para a compreensão dos fatores que influenciam a segurança no trânsito. A relação entre velocidade e risco de acidentes está bem estabelecida na literatura, com velocidades mais altas consistentemente associadas ao aumento da gravidade e frequência dos acidentes (Organização Mundial da Saúde, 2018). Apesar dessa clara conexão, os modelos tradicionais de previsão de velocidade apresentam limitações significativas em seu poder explicativo, pois se baseiam predominantemente nas características geométricas da via e em elementos da infraestrutura viária, negligenciando a influência das características intrínsecas do motorista (Wang et al., 2021). Essa abordagem unidimensional não consegue capturar a complexa interação entre fatores humanos e via, limitando, assim, a compreensão da variabilidade comportamental observada em cenários de trânsito.

A natureza multifatorial dos processos de tomada de decisão sobre a velocidade exige uma abordagem mais abrangente à modelagem. Fatores como traços psicológicos, condições fisiológicas, experiência de direção e características demográficas podem modular significativamente a percepção de risco do motorista e as escolhas de velocidade subsequentes (AASHTO, 2010; Rhodes e Pinique, 2011; Taubman-Ben-Ari et al., 2015). No entanto, esses fatores humanos têm sido historicamente desafiadores para serem incorporados em modelos preditivos devido à sua variabilidade e complexidade de mensuração. Avanços recentes em técnicas de modelagem estatística e métodos de coleta de dados, particularmente o uso de simuladores de direção, agora permitem que os pesquisadores abordem essas limitações e desenvolvam entendimentos mais detalhados do comportamento da velocidade. Simuladores de direção fornecem ambientes controlados onde a influência das características humanas na escolha da velocidade pode ser estudada de forma segura e sistemática o que seria difícil de obter por meio de estudos tradicionais.

A escolha da velocidade é fundamentalmente uma decisão humana influenciada por inúmeros fatores individuais, como por exemplo experiência de direção, confiança e motivações pessoais (AASHTO, 2010). Por sua vez, Constantinou et al. (2011) sugere que traços de personalidade, como tendências à busca de sensações e tolerância a riscos, estão significativamente correlacionados a comportamentos de excesso de velocidade. Nesse contexto, as estatísticas de acidentes de trânsito no Brasil indicam que o excesso de velocidade é um fator contribuinte em aproximadamente 8% dos acidentes fatais, enquanto o erro humano é responsável por 90% dos acidentes (Polícia Rodoviária Federal, 2024), mas raramente exploram as razões subjacentes que levam diferentes perfis de motoristas a adotar comportamentos distintos sob as mesmas condições da estrada. Essa lacuna na compreensão dificulta o desenvolvimento de intervenções direcionadas que possam abordar efetivamente o risco específico.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo gerar um modelo de previsão de velocidade considerando características dos motoristas e aborda a seguinte questão: quais características do motorista influenciam a previsão de velocidade em diferentes cenários simulados de uma rodovia brasileira? Ao examinar essa questão, a pesquisa visa estabelecer uma compreensão mais abrangente dos fatores que contribuem para a escolha da velocidade, indo além do foco tradicional na geometria da via e nas condições ambientais. Este estudo é particularmente importante, dados os altos custos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito, muitos dos

quais relacionados à velocidade. Além disso, os resultados podem subsidiar o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de sinalização e controle de velocidade, com foco em intervenções adaptativas, direcionadas a públicos específicos com perfis de risco elevado. Por fim, o estudo contribui para o avanço das simulações orientadas ao comportamento humano que amplia as possibilidades de testar soluções de segurança viária antes de sua implementação no mundo real.

2. METODOLOGIA

2.1. Simulador

O simulador de base fixa foi montado em estrutura de cockpit profissional, com volante e pedais Logitech G27 e tela de 85". O sistema oferecia rotação do volante com feedback tátil, controle de aceleração/frenagem e troca de marchas. As simulações foram executadas na plataforma Virtual Test Drive (VTD) e o modelo dinâmico do veículo, cedido pela PSA Peugeot Citroën Brasil, reproduziu fielmente um Citroën C3.

2.2. Amostra

A amostra foi composta por 120 voluntários vinculados à comunidade universitária, entre estudantes e servidores, com idades entre 18 e 66 anos (média de 28 anos; desvio padrão de 10 anos), recrutados ao longo de um período de quatro meses. A maioria era do sexo masculino (70%), enquanto 30% se identificaram como do sexo feminino. Apenas 14% haviam tido contato prévio com simuladores de direção, e dois participantes exerciam atividade profissional como motoristas. A seleção dos voluntários não buscou representatividade estatística de uma população-alvo, sendo o único critério de elegibilidade a posse de carteira de habilitação válida para automóveis.

2.3. Cenários

O experimento envolveu a análise de dois cenários simulados. O cenário 1 serviu como base, apresentando a sinalização viária padrão já existente na rodovia. Por sua vez, o cenário 2 incluiu uma sinalização complementar adicionando sinais de contagem regressiva antes da curva acentuada (Figura 1); linhas de estímulo a redução da velocidade (Figura 1), e uma placa semipórtico indicando pista sinuosa à frente, com uma mensagem incentivando os motoristas a reduzirem a velocidade (Figura 2).

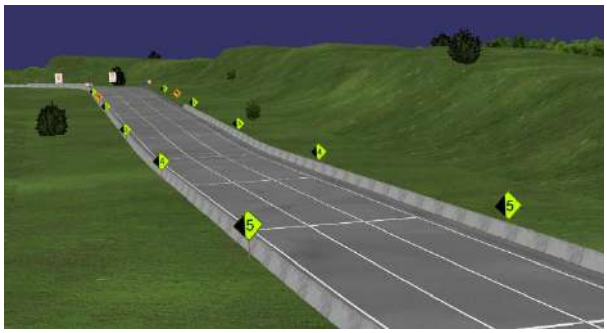


Figura 1: Sinais em contagem regressiva e linhas de estímulo a redução da velocidade



Figura 2: Semipórtico indicando pista sinuosa

2.4. Modelos Lineares Generalizados com Efeitos Mistos

Os Modelos Lineares Generalizados com Efeitos Mistos expandem os Modelos Lineares Generalizados ao incorporar efeitos fixos e aleatórios, permitindo lidar com variações em dados agrupados nos quais a variável resposta não segue uma distribuição normal. Também generalizam os Modelos Lineares com Efeitos Mistos para acomodar distribuições não normais da variável dependente. Os efeitos fixos correspondem aos termos convencionais de regressão, enquanto os efeitos aleatórios capturam a variabilidade entre grupos (Laird e Ware, 1982). Essa abordagem foi escolhida por sua capacidade de lidar com dados hierárquicos provenientes de simulações de direção, nas quais múltiplas observações são registradas por participante (Papazikou, Quddus, e Thomas, 2016).

Neste estudo, os efeitos fixos representam as características dos condutores selecionadas, enquanto os efeitos aleatórios consideram a variabilidade não observada entre os diferentes cenários simulados. Essa distinção é fundamental para responder à questão central da pesquisa: quais características dos motoristas influenciam a previsão de velocidade e como elas afetam o comportamento ao longo dos distintos cenários simulados?

Neste contexto, os efeitos fixos incluem uma série de variáveis categóricas: Gênero (0-Masculino; 1-Feminino); Categoria da Carteira de Habilitação (1-B; 2-D; 3-E); Tipo de Veículo (1-não dirige; 2-motocicleta; 3-veículo pequeno; 4-veículo grande); Motorista Cauteloso (0-não; 1-sim); Motorista Confiante (0-não; 1-

sim); Motorista Arriscado (0-não; 1-sim); Motorista Agressivo (0-não; 1-sim); Miopia (0-não; 1-sim); Hipermetropia (0-não; 1-sim); Astigmatismo (0-não; 1-sim); Frequência Diária de Condução (1-não dirige; 2-1 a 2 vezes; 3-3 a 4 vezes; 4-mais de 4 vezes); Tempo Diário de Condução. (1-não dirige; 2-até 30 min; 3-de 30 a 60 min; 4-de 1h a 2h; 5-mais de 2h); Frequência de Condução Urbana (1-nunca; 2-raramente; 3-ocasionalmente; 4-frequentemente; 5-muito frequentemente); Frequência de Condução em Rodovias (1-nunca; 2-raramente; 3-ocasionalmente; 4-frequentemente; 5-muito frequentemente); Número de Multas Recebidas (1-nenhuma; 2-menos de 5; 3-entre 5 e 10; 4-mais de 10); e Variáveis numéricas: Idade (em anos); Tempo de Carteira de Habilitação (em anos) e Número de Acidentes Envolvidos.

Para este estudo, a distribuição Weibull foi adotada para modelar a variável dependente (velocidade), devido à sua flexibilidade e capacidade de acomodar dados positivos e assimétricos, características típicas de dados de velocidade. A função logarítmica foi selecionada como função de ligação, facilitando uma interpretação multiplicativa dos efeitos. O ajuste do modelo foi realizado utilizando a abordagem de *Generalized Additive Models for Location, Scale, and Shape* (GAMLSS) (Stasinopoulos e Rigby, 2008), implementada no pacote *gamlss* dentro do R Studio.

Para avaliar a adequação do modelo e comparar diferentes especificações, foram utilizados o *Generalized Akaike Information Criterion* (GAIC) e o *Bayesian Information Criterion* (BIC), buscando o modelo com menores valores desses critérios (Kim et al., 2017). Especificamente, foi comparado um modelo com efeitos aleatórios com um modelo com apenas efeitos fixos para determinar se a inclusão de efeitos aleatórios melhorou o ajuste do modelo. O diagnóstico foi conduzido por meio da análise de gráficos de resíduos, incluindo gráficos de resíduos versus valores ajustados e gráficos quantil-quantil para avaliar as premissas distribucionais. Além disso, valores observados versus valores previstos foram plotados para avaliar o desempenho preditivo do modelo, e efeitos aleatórios foram extraídos e analisados para obter interpretações sobre a estrutura de variância. A inclusão de efeitos aleatórios associados ao cenário permitiu capturar a heterogeneidade não observada entre diferentes condições de direção, resultando em estimativas mais precisas dos efeitos fixos de interesse (Farah et al., 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para entender melhor a distribuição de velocidade em cada cenário, as Figuras 3 e 4 mostram histogramas para o Cenário 1 e o Cenário 2, respectivamente. Cada histograma inclui uma curva normal ajustada (em vermelho) para ilustrar o formato da distribuição. Em ambos os cenários, a velocidade tende a ser assimétrica à direita, desviando-se de uma distribuição normal perfeita, com o Cenário 2 mostrando uma distribuição mais ampla e velocidades mais altas. A Figura 5 apresenta um gráfico de caixa comparando as distribuições de velocidade por gênero (masculino e feminino) nos Cenários 1 e 2. É possível observar um aumento geral na velocidade no Cenário 2 para ambos os gêneros, com os participantes do sexo masculino exibindo maior variabilidade

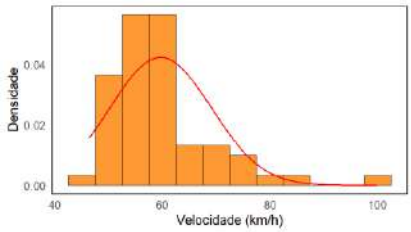


Figura 3: Distribuição da velocidade cenário 1

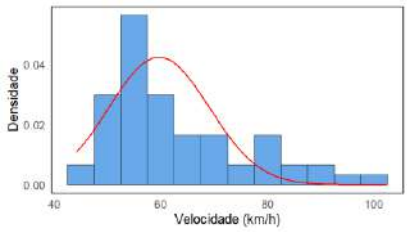


Figura 4: Distribuição da velocidade cenário 2

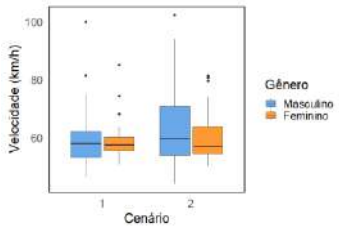


Figura 5: Distribuição da velocidade por cenário e gênero

Para avaliar se a inclusão de efeitos aleatórios melhora o desempenho do modelo, dois modelos foram estimados: um incorporando Efeitos Aleatórios e outro baseado exclusivamente em Efeitos Fixos (EF). Seu desempenho foi avaliado usando o *Global Deviance* (GD), o *Akaike Information Criterion* (AIC), o *Bayesian Information Criterion* (BIC) e o *Generalized Akaike Information Criterion* (GAIC). Os resultados da comparação estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados das métricas de desempenho do modelo

Modelo	GD	AIC	BIC	GAIC
Efeitos fixos	896,40	932,40	982,58	952,84
Efeitos Aleatórios	893,25	929,25	979,43	949,69

O GD mede o quão bem um modelo se ajusta aos dados, com valores mais baixos indicando melhor ajuste,

mas não leva em conta a complexidade do modelo. O AIC estende essa avaliação, penalizando modelos com mais parâmetros para desencorajar o sobre ajuste, enquanto o BIC aplica uma penalidade ainda maior com base no tamanho da amostra, favorecendo modelos mais suscintos. O GAIC é uma generalização flexível do AIC, permitindo que o termo de penalidade seja ajustado com base no contexto de modelagem e é comumente usado em *frameworks* GAMLSS. O modelo de efeito aleatório apresentou um valor de GAIC menor (949,69) em comparação com o modelo de efeito fixo (952,84), sugerindo um melhor ajuste. Embora a diferença seja pequena, o resultado corrobora a inclusão de efeitos aleatórios no modelo, pois isso leva a uma melhor adequação.

As estimativas do modelo GLME apresentadas na Tabela 2 indicam efeitos estatisticamente significativos, marcados com asterisco, ao nível de significância de 5% para as variáveis Miopia, Astigmatismo, Número de acidentes, Veh2 (motocicleta), Veh3 (veículo pequeno) e HwyFreq5 ([frequência de direção em rodovia] muito frequente). Além disso, os dois termos de interação, Veh2:HwyFreq3 (motocicleta: ocasionalmente) e Veh3:HwyFreq3 (veículo pequeno: ocasionalmente), também se mostraram significativos.

Tabela 2: Resultados do modelo GLME

Modelo	Estimativa	Erro padrão	P-valor
Intercepto*	4,118	0,044	<0,001
Miopia (β_1)*	-0,158	0,035	<0,001
Astigmatismo (β_2)*	0,098	0,034	0,005
Número de acidentes (β_3)*	0,036	0,012	0,005
Veic2(moto) (β_4)*	-0,272	0,136	0,049
Veic3(veículo pequeno)	-0,061	0,074	0,417
HwyFreq3	-0,118	0,084	0,166
HwyFreq5(β_5)*	0,191	0,083	0,023
Veic2:HwyFreq3 (β_6)*	0,617	0,215	0,005
Veic3:HwyFreq3 (β_7)*	0,308	0,110	0,006

Coeficientes estimados indicam que indivíduos míopes dirigem a uma velocidade 14,6% (1 − exp(−0,158)) menor em comparação com aqueles sem essa condição, enquanto motoristas com astigmatismo apresentam um aumento de 10,3% (exp(0,098) − 1) na velocidade. Esses efeitos sugerem que a miopia está associada a uma direção mais cautelosa, enquanto o astigmatismo corresponde a um ligeiro aumento na velocidade. Além disso, o número de acidentes está associado a um aumento de 3,7% (exp(0,036) − 1) na velocidade por acidente adicional, sugerindo que indivíduos com maior histórico de acidentes tenderam a dirigir mais rápido durante a simulação. Além disso, indivíduos com alta frequência de condução em rodovias (FreqH5) apresentam uma velocidade média 21% (exp(0,191) − 1) maior do que aqueles que dirigem com pouca frequência em rodovias (FreqH1, categoria de referência). Finalmente, considerando o efeito de interação, espera-se que indivíduos que pilotam motocicletas e têm uma frequência moderada de condução em rodovias (Veh2:FreqH3) tenham uma velocidade média 10,3% (exp(−0,272 + 0,617 - (0,061 + 0,308) − 1) maior do que aqueles com as mesmas características que dirigem veículos pequenos (Veh3:FreqH3). Por sua vez, o intercepto aleatório médio estimado variou ligeiramente entre os cenários, com uma média de -0,0147 no primeiro e 0,0147 no segundo, sugerindo que, em média, velocidades mais baixas foram observadas no primeiro cenário.

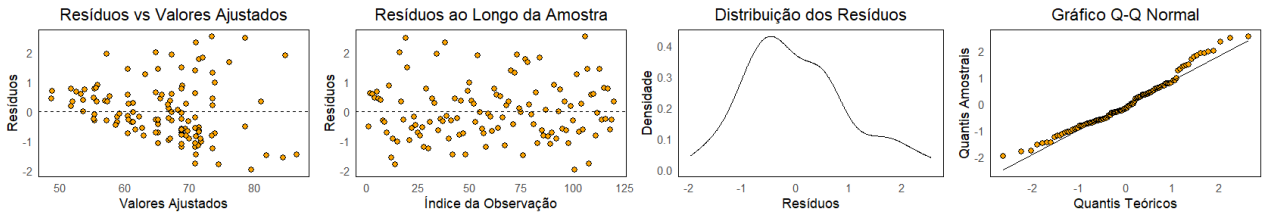


Figura 6: Resíduos do modelo

Por fim, a Figura 6 mostra o Diagnóstico Residual do Modelo. O gráfico Resíduos vs. Valores Ajustados mostra resíduos dispersos aleatoriamente em torno de zero, indicando um bom ajuste do modelo sem padrões perceptíveis. O gráfico Resíduos vs. Índice não demonstra tendências aparentes, sugerindo independência dos resíduos entre as observações. A Estimativa de Densidade dos Resíduos revela uma forma simétrica centrada em torno de zero, apoiando a suposição de normalidade. Por fim, o Gráfico Q-Q Normal mostra pontos bem alinhados com a diagonal, indicando resíduos distribuídos normalmente com desvio mínimo. No geral, os resultados indicam que o modelo se ajusta bem aos dados. No entanto, vale a pena considerar a potencial

presença de heterocedasticidade em estudos futuros, visto que maior variabilidade parece estar associada a valores de velocidade mais altos.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicaram que a sinalização aprimorada do Cenário 2 não resultou em uma redução significativa da velocidade média no trecho, em comparação ao Cenário 1. Ambos os cenários apresentaram distribuições de velocidade assimétricas à direita, sendo que o Cenário 2 registrou maiores médias e maior dispersão. Esse resultado foi inesperado, uma vez que o Cenário 2 incorporava elementos projetados para aumentar a percepção de risco. Uma possível explicação está no delineamento experimental adotado, com grupos distintos de participantes em cada cenário, o que pode ter introduzido variabilidade entre grupos não relacionada diretamente à intervenção. Apesar dessa limitação, os Modelos Lineares Generalizados com Efeitos Mistos identificaram que diversas características individuais influenciaram significativamente o comportamento de velocidade. Destacam-se as deficiências visuais, como miopia, associada a velocidades mais baixas, e astigmatismo, relacionado a velocidades ligeiramente mais altas. Esses resultados evidenciam a importância de integrar fatores humanos ao projeto viário, especialmente na sinalização voltada à modulação da percepção de risco. Também foram observados efeitos de interação relevantes, particularmente entre tipo de veículo e frequência de condução em rodovias. Motociclistas com exposição moderada a rodovias, por exemplo, apresentaram tendência a velocidades mais elevadas, indicando um comportamento adaptativo conforme o contexto de direção. Tais achados sugerem o potencial de sinalizações adaptativas, como painéis variáveis sensíveis ao perfil dos usuários. A inclusão de perfis de condutores em modelos preditivos permite avaliações proativas de risco, possibilitando a identificação de grupos mais propensos a comportamentos perigosos. Isso pode subsidiar políticas de segurança mais eficazes, o desenvolvimento de programas educativos direcionados e tecnologias de assistência ao condutor personalizadas. Estudos futuros devem adotar delineamentos com medidas repetidas, ampliar os perfis avaliados e considerar medidas fisiológicas para aprofundar a análise comportamental.

Agradecimentos

Ao aluno de iniciação científica, Guilherme Ferrer de Souza, pelo apoio prestado na etapa processamento dos dados. Esta pesquisa foi apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - 001; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – 407056/2022-0 e 304448/2023-0; e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – 2021/10727-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *Highway Safety Manual – HSM*.

Constantinou, E., Panayiotou, G., Konstantinou, N., Loutsiou-Ladd, A., and Kapardis, A., 2011. Risky and aggressive driving in young adults: Personality matters. *Accident Analysis & Prevention*, v. 43, n. 4, p. 1323–1331. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.02.002.

Farah, H., Musicant, O., Shimshoni, Y., Toledo, T., Grimberg, E., Omer, H., and Lotan, T., 2014. Can providing feedback on driving behavior and training on parental vigilant care affect male teen drivers and their parents? *Accident Analysis & Prevention*, v. 69, p. 62–70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.11.005

Kim, H., Kim, S., Shin, H., and Heo, J.-H., 2017. Appropriate model selection methods for nonstationary generalized extreme value models. *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 557–574. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.005

Laird, N. M. and Ware, J. H., 1982. Random-effects models for longitudinal data. Biometrics, 38(4), p. 963–974. DOI: https://doi.org/10.2307/2529876.

Organização Mundial da Saúde. (2018). Relatório global sobre o estado da segurança no trânsito. *Relatório técnico*. Genebra: Organização Mundial da Saúde.

Polícia Rodoviária Federal. (2024). Dados Abertos da PRF. *Relatório técnico*. Disponível em: https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-da-prf

Rhodes, N. e Pivik, K., 2011. Age and gender differences in risky driving: The roles of positive affect and risk perception. *Accident Analysis & Prevention*, v. 43 n. 3, p. 923–931. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.11.015.

Stasinopoulos, D. M. e Rigby, R. A., 2008. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software*, v. 23, n. 7, p. 1–46. DOI: https://doi.org/10.18637/jss.v023.i07.

Taubman-Ben-Ari, O., Kaplan, S., Lotan, T., e Prato, C. G., 2015. Parents' and peers' contribution to risky driving of male teen drivers. *Accident Analysis & Prevention*, v. 78, p. 81–86. DOI: https://doi.org/10.016/j.aap.2015.02.020.

Wang, X., Chen, Z., Guo, Q., Tarko, A., Lizarazo, C., e Wang, X., 2021. Transferability analysis of the freeway continuous speed model. *Accident Analysis & Prevention*, v. 151, p. 105944. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105944.

Papazikou, E., Quddus, M. A., e Thomas, P., 2016. Detecting deviation from normal driving using SHRP2 NDS data. Em: *Proceedings of the 96th Annual Meeting of Transportation Research Board* (TRB). Washington D.C., USA.

VALIDAÇÃO DE CENÁRIO VIRTUAL A PARTIR DE SINALIZAÇÃO VERTICAL VIÁRIA

Thales Mezzacasa Brum, Daniel Sergio Presta García, Christine Tessele Nodari
Laboratório de Sistemas de Transportes (LASTRAN); Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este estudo teve como objetivo comparar quantitativamente a distância de legibilidade de sinalização viária em um ambiente real e sua réplica em um simulador de direção. O método consistiu na coleta de dados dos mesmos 32 participantes em ambas as condições, analisando as diferenças através de um teste t para amostras pareadas. Os resultados revelaram uma discrepância significativa: a distância de leitura no cenário real foi, em média, quase três vezes maior que no simulador. A análise também mostrou que o esquema de cores da placa influencia a percepção visual no ambiente virtual. Estes achados indicam que a fidelidade visual do simulador em estudo é limitada, o que pode comprometer a validade de pesquisas que dependem da percepção de sinalização e destaca a necessidade de calibração ou aprimoramentos técnicos para compensar essa deficiência e garantir resultados mais realistas.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de simuladores de direção tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para a pesquisa em engenharia de tráfego e segurança viária, ao permitir a reprodução de cenários complexos com controle experimental, baixo custo e sem risco físico aos participantes (Bruck *et al*., 2021; Chen *et al*., 2025; De Winter *et al*., 2012). Sua eficácia depende, porém, da capacidade de reproduzir fielmente não apenas o comportamento de condução, mas também os estímulos perceptivos, especialmente os visuais, como a sinalização viária (Bruck *et al*., 2021; Wynne *et al*., 2019).

Apesar de seu uso difundido, a validação de simuladores de direção permanece um desafio. Em uma revisão sistemática de 44 estudos, Wynne (2019) constatou que apenas cerca de metade dos simuladores analisados conseguiram demonstrar validade absoluta ou relativa em comparação com a condução real. Simuladores de baixa fidelidade, em especial, podem induzir comportamentos irreais e gerar conclusões comprometidas. Mesmo entre os de alta fidelidade, há evidências de que a qualidade da resposta visual nem sempre acompanha a sofisticação do *hardware* (Underwood *et al*., 2011).

Uma das limitações técnicas mais significativas apontadas na literatura refere-se à representação da sinalização viária. Em uma revisão abrangente, Zhang (2025) destacou que, embora simuladores sejam frequentemente utilizados para avaliar o *design* e o posicionamento de placas de trânsito, muitos apresentam dificuldades em renderizar com clareza os detalhes gráficos a distâncias realistas. Essa deficiência compromete diretamente a validade de estudos que dependem da correta percepção e leitura da sinalização pelos condutores.

A existência dessa diferença na percepção visual é evidenciada em estudos empíricos. Em uma pesquisa da *Federal Highway Administration* (FHWA), Perez (2016) precisou contornar as limitações de resolução do seu simulador exibindo as placas com um tamanho ampliado em 25% para que a distância de legibilidade virtual se aproximasse da real. Complementando essa abordagem, Lyu (2017), para contornar problemas semelhantes, recorreu a apresentação das placas em um monitor separado, destacando os desafios técnicos enfrentados para garantir uma percepção visual adequada no ambiente simulado.

Entre os estudos empíricos que abordam essa limitação, destaca-se Chen (2017), que quantificou a discrepância entre ambientes reais e simulados ao comparar a distância máxima de leitura de placas. O autor verificou que a distância de legibilidade no mundo real era, em média, 2,5 vezes maior para placas com texto, 2,0 vezes maior para placas com números e 1,5 vez maior para placas com símbolos. Ele atribuiu essa diferença à resolução limitada do *hardware* do simulador e propôs, como solução, um fator geométrico de ampliação para as placas virtuais, com o intuito de compensar a perda de nitidez.

Uma estratégia metodológica frequentemente adotada para validar simuladores consiste em replicar um cenário real e comparar estatisticamente os dados coletados em ambos os ambientes (De Frutos *et al*., 2023; Hussain *et al*., 2019). Seguindo essa linha, Meuleners (2015) comparou a frequência de erros de condução em um percurso real e sua réplica virtual. Utilizando um teste t de amostras pareadas, com os mesmos participantes em ambas as condições, o autor encontrou validade para diversas tarefas comportamentais, como a obediência a semáforos e sinais de parada.

No entanto, embora a validação da resposta comportamental à sinalização seja crucial, uma questão sobre a percepção visual permanece relativamente pouco explorada: a fidelidade com que a legibilidade da sinalização é replicada. Saber que um motorista obedece a um sinal de parada no simulador não garante que a distância na qual ele consegue ler uma placa indicativa seja a mesma do ambiente real, o que configura uma lacuna na literatura. Outros estudos, como o de Fogt (2022), focaram na percepção visual dentro do simulador, concluindo que as distâncias de identificação de placas eram seguras, mas sem estabelecer uma correlação direta com o desempenho no mundo real, reforçando a necessidade de estudos de validação comparativa.

Nesse contexto, e com o intuito de preencher a lacuna identificada, este artigo tem como objetivo comparar quantitativamente a distância de legibilidade de sinalização vertical em um cenário real com sua réplica em ambiente virtual. Para garantir a robustez da análise, foram utilizados dados coletados dos mesmos participantes em ambas as condições, permitindo uma comparação direta e controlada.

2. MÉTODO PROPOSTO

O estudo foi estruturado em quatro macro etapas: (1) seleção do cenário real e coleta de dados de legibilidade em campo; (2) replicação do cenário e parametrização do ambiente virtual de simulação; (3) coleta de dados de legibilidade no ambiente simulado; e (4) análise estatística comparativa dos dados dos ambientes real e simulado.

2.1. Seleção do cenário real e coleta de dados de distância de legibilidade em campo

A seleção do local real foi realizada de forma a atender os seguintes critérios: (i) ser um local com boa iluminação natural; (ii) permitir a realização de uma trajetória de aproximação retilínea em direção a uma placa de trânsito selecionada para o estudo; e (iii) ter placa de sinalização do tipo indicativa. Para a coleta de dados o procedimento adotado incluiu: (i) demarcar ponto de início e direção da trajetória; (ii) demarcar, com uma trena de precisão, marcos de distância até a placa; (iii) instruir os voluntários a percorrerem a pé a trajetória e parar no ponto exato em que a leitura do conteúdo principal da placa indicada se tornava possível; (iv) realizar a medição da distância de legibilidade usando os marcos demarcados. A distância horizontal entre o participante e a base da placa era então medida e registrada como a "distância de legibilidade em campo".

2.2. Replicação do cenário e parametrização do ambiente virtual de simulação

A segunda etapa consistiu na criação de um ambiente virtual que replicasse as características visuais de um simulador de direção. Para isso, foram identificados e configurados os parâmetros que influenciam a percepção visual, incluindo as especificações da câmera virtual, como distância focal e o campo de visão (*Field of View* - FOV), a resolução de renderização interna do *software* e a resolução da tela de exibição do simulador de direção. A placa de sinalização vertical foi modelada com dimensões (altura, largura, espessura) idênticas à placa real correspondente no ambiente real. A placa foi posicionada no ambiente virtual de forma a replicar exatamente a localização do experimento de campo, considerando sua altura e centralização na via. O ponto de vista do observador virtual também foi alinhado com a posição do participante no cenário real. Para a representação visual, foi utilizada uma imagem *raster* (*bitmap*), formada por uma grade de *pixels* que representa cor e luminosidade. Esse tipo de textura garante boa fidelidade visual a curtas distâncias, mas pode perder nitidez em visualizações distantes, especialmente para elementos gráficos detalhados.

2.3. Coleta de dados de legibilidade no ambiente simulado

O procedimento experimental em ambiente virtual replicou a aproximação realizada em campo pelos voluntários. Foram convidados os mesmos voluntários do teste de campo. Os participantes sentaram-se em uma cadeira posicionada a 1,0 metro da tela de exibição do simulador, alinhada ao centro. Para replicar o procedimento de campo de forma estática, o participante controlava a aproximação de uma câmera virtual, posicionada na altura dos olhos de um pedestre. Partindo de um ponto onde a placa era ilegível, ele avançava em velocidade constante até conseguir identificar seu conteúdo, momento em que a distância era registrada e definida como a "distância de legibilidade no simulador".

2.4. Análise comparativa

Para verificar se houve diferença significativa entre as distâncias médias de legibilidade medidas nos ambientes real e virtual utilizou-se o teste t para amostras pareadas, apropriado para a abordagem adotada, já que os mesmos participantes foram avaliados em ambas as condições, gerando dados dependentes. O teste comparou

diretamente as médias das distâncias de legibilidade, levando em consideração a variabilidade individual. Adotou-se um nível de significância (α) de 0,05.

3. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO

O cenário real selecionado para a condução do experimento foi um trecho da Avenida João Pessoa, próximo ao nº 520, em Porto Alegre, Brasil. O local foi escolhido por atender aos requisitos, tendo suas condições favoráveis de visibilidade e geometria viária (estar em reta e ter boa iluminação natural). Esse cenário foi replicado em um simulador desenvolvido na plataforma Unity, com parâmetros visuais controlados, como campo de visão da câmera virtual (50°), resolução de 1920×1080 *pixels*, com correspondência de 1:1 entre os *pixels* renderizados e exibidos, e distância de aproximadamente 1,0 m entre o participante e a tela do simulador.



Figura 1: Placas analisadas em ambiente Real e Simulado

Os dados foram coletados a partir de uma amostra de 32 voluntários, que percorreram ambos os cenários (real e virtual) realizando duas medições em cada ambiente. Para cada voluntário, foi considerada a média das duas medições da distância de legibilidade, tanto no campo quanto no simulador. A referência para a medição da distância foi o texto localizado na área azul da placa indicativa apresentada na Figura 1. No cenário real, a Distância Média de Legibilidade (DML) foi de 159,71 metros (DP = 28,59), enquanto no simulador foi de 57,62 metros (DP = 11,44), conforme resumido na Tabela 1.

Tabela 1: Análise comparativa e estatística da DML entre os ambientes real e simulado

Ambiente	DML (m)	Desvio Padrão (m)	N	Graus de Liberdade	Estatística t	Valor p
Campo	159,71	28,59	32	31	26,17	< 0,0001
Simulador	57,62	11,44				

O resultado do teste t foi significativo ($t(31) = 26,17$; $p < 0,0001$), rejeitando a hipótese nula de equivalência entre os ambientes. A magnitude da diferença, aliada à baixa probabilidade de erro tipo I, reforça a evidência de que a legibilidade no ambiente virtual foi significativamente inferior à observada no ambiente real. A correlação de Pearson entre os dados dos dois ambientes foi de 0,71, indicando que, embora as distâncias absolutas tenham diferido, os padrões individuais de desempenho mostraram-se consistentes nos dois ambientes. Os dados indicaram que, em média, a distância de leitura das placas no ambiente real foi aproximadamente três vezes maior do que a observada no simulador.

Foi realizada uma análise adicional para investigar se o esquema de cores utilizado em diferentes seções da mesma placa influenciava a magnitude da discrepância visual entre os ambientes. Para a coleta de dados desta análise, o mesmo procedimento experimental foi adotado. Analisou-se a legibilidade em fundo azul (placa indicativa) e a de fundo marrom (placa indicativa turística), conforme representado na Figura 1. Para cada participante e para cada tipo de placa, foi calculado um Fator de Conversão Individual (FCI), definido como a razão entre a distância de legibilidade no ambiente real e no virtual, conforme a equação (1). Esse índice permite dimensionar quanto a percepção visual é comprometida no ambiente simulado em relação ao real.

$$FCI_{i,k} = \frac{\overline{D}_{campo,i,k}}{\overline{D}_{simulador,i,k}} \quad (1)$$

Onde: $FCI_{i,k}$ é o Fator de Conversão para o participante i e a cor k; $\overline{D}_{campo,i,k}$ é a distância média do participante i no ambiente campo para a cor k; e $\overline{D}_{simulador,i,k}$ é a distância média do participante i no ambiente simulador para a cor k.

A análise estatística do teste t revelou que a área marrom apresentou uma discrepância significativamente maior entre os ambientes em comparação com a área azul ($t(31) = 2{,}82$; $p = 0{,}008$), conforme detalhado na Tabela 2. A correlação de Pearson entre os dois fatores foi de 0,51, apontando uma associação moderada entre os desempenhos individuais nas duas áreas, mas com indícios de variação dependente do conteúdo visual (cor). Esse resultado sugere que o contraste e a composição cromática influenciam a forma como as informações são percebidas no ambiente virtual, o que pode exigir calibrações específicas para diferentes tipos de sinalização dentro do simulador.

Tabela 2: Análise comparativa e estatística dos FCI entre placas de fundo azul e marrom

Cor	Média FCI	Desvio Padrão	N	Graus de Liberdade	Estatística t	Valor p
Azul	2,82	0,42	32	31	2,82	0,008
Marrom	3,05	0,49				

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Apesar do rigor metodológico, algumas limitações são reconhecidas. A principal refere-se à simplificação de uma situação dinâmica (condução real) para medições estáticas em campo e no simulador. Adicionalmente, embora as medições tenham ocorrido majoritariamente no período da manhã, fatores como pequenas variações climáticas não foram controlados.

Os resultados mostraram uma diferença significativa entre as distâncias de legibilidade no ambiente real e no simulador, mesmo com a reprodução fiel do cenário e do controle da variabilidade individual proporcionado pela estrutura experimental. Essa diferença pode estar relacionada a limitações na forma como o ambiente virtual é exibido. Embora o simulador opere em resolução *Full HD* (1920×1080), a nitidez percebida depende da densidade de *pixels* por grau de visão, que varia conforme a distância entre o observador e a tela. No experimento, os participantes estavam posicionados a 1,0 metro da tela, o que pode ter dificultado a leitura de detalhes finos, como letras ou símbolos. No ambiente real, por outro lado, as placas estavam inseridas em um espaço tridimensional com profundidade física, permitindo o foco visual a longa distância e a adaptação natural do olhar. Esse desalinhamento entre o foco físico (curto) e o foco visual simulado (distante) pode ter comprometido a clareza das imagens no ambiente virtual.

O tamanho e a espessura das letras nas placas também podem ter influenciado a legibilidade. No ambiente real, o olho humano compensa imperfeições com pequenos ajustes. Já no ambiente virtual, a renderização gráfica pode suavizar ou simplificar esses elementos, diminuindo a nitidez percebida a longas distâncias. A análise complementar indicou que placas com fundo marrom apresentaram maior diferença de legibilidade entre os ambientes do que as de fundo azul. Isso pode estar ligado ao menor contraste do marrom em telas digitais, além de fatores como brilho, ausência de texturas realistas e comportamento da luz.

Diante da discrepância observada, uma possível estratégia de correção seria aplicar um fator de escala nas placas virtuais, aumentando seu tamanho para compensar a perda de legibilidade. Com base no fator médio de conversão (2,82 para a área azul), as placas poderiam ser modeladas com cerca de 2,8 vezes o tamanho real no simulador. No entanto, essa solução pode comprometer a escala do ambiente e gerar efeitos indesejados, como percepção distorcida do tamanho das placas nos ambientes simulados o que pode levar a uma sensação de ambientes pouco realistas durante os estudos usando simuladores de direção. Uma alternativa seria investir em melhorias técnicas, como monitores com maior densidade de *pixels* e técnicas de renderização avançadas para preservar os detalhes visuais.

Os resultados deste estudo indicam, também, que o simulador utilizado ainda apresenta limitações importantes quanto à reprodução fidedigna da legibilidade da sinalização vertical. A metodologia adotada, ao comparar diretamente os mesmos participantes em ambos os ambientes, oferece uma dimensão inicial para avaliar a

fidelidade da percepção visual do simulador, funcionando como uma ferramenta diagnóstica. No entanto, uma vez que os resultados revelaram discrepâncias significativas mesmo em condição estática, é razoável supor que o desempenho em situações dinâmicas (como durante a condução em movimento) possa ser ainda mais afetado. Dessa forma, o presente estudo não valida plenamente o simulador, mas fornece evidências úteis para orientar aprimoramentos futuros e refinar critérios de avaliação da fidelidade visual.

Como desdobramento desta pesquisa, recomenda-se a realização de estudos que explorem a legibilidade da sinalização em condições dinâmicas de condução, replicando as análises enquanto os participantes dirigem no simulador. Investigações futuras poderiam testar, também, diferentes resoluções de tela, distâncias de visualização e técnicas de renderização gráfica, como o uso de formatos vetoriais ou técnicas alternativas à imagem *raster*, que preservem maior definição a diferentes distâncias, com o objetivo de mensurar seu impacto direto na distância de leitura das placas. Também seria relevante avaliar o uso de diferentes graus de ampliação para distintos tipos de placas, considerando contrastes de cor, tipo de informação (texto, número ou símbolo) e tempo de exposição. Por fim, a validação cruzada com outros simuladores poderia ajudar a estabelecer parâmetros mínimos de qualidade visual para estudos que dependem da percepção da sinalização viária.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio concedido por meio da bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo nº 30306361/2021-3) e por meio do projeto Universal (Processo nº 404476/2021-0). Agradecem também à Concessionária Rota de Santa Maria (SACYR CONCESIONES) pelo contrato de RDT nº 23078.450104/2022-87 – IAP 001903.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bruck, L., B. Haycock e A. Emadi (2021). A Review of Driving Simulation Technology and Applications. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, *2*, 1–16. DOI: 10.1109/OJVT.2020.3036582

Chen, L., J. Fang, J. Li e J. Xie (2025). Research on the Effectiveness of Driving Simulation Systems in Risky Traffic Environments. *Systems*, *13*(5), 329. DOI: 10.3390/systems13050329

Chen, L., J. Xiong, F. Guo e H. Wan (2017). Image Calibration Method of Driving Simulator Based on Vision and Cognition. *China Journal of Highway and Transport*, *30*(1), 129–135. Disponível em: zgglxb.chd.edu.cn/EN/Y2017/V30/I1/129 (acesso em 13/07/2025)

De Frutos, S. H., M. S. Torner e M. Castro (2023). Validation of a Driving Simulator for Speed Research on Two-lane Rural Roads. *Transportation Research Procedia*, *71*, 156–163. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.070

De Winter, J., P. M. Van Leeuwen e R. Happee (2012). Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion. *Measuring Behavior Conference*, 47–50. Disponível em: www.researchgate.net/publication/281593035 (acesso em 13/07/2025)

Fogt, J. S., T. Kerwin, C. Wrabel, C. Schomer e N. Fogt (2022). Driving performance and road sign identification by multifocal contact lens wearers in a driving simulator. *Contact Lens and Anterior Eye*, *45*(4). DOI: doi.org/10.1016/j.clae.2021.101493

Hussain, Q., W. K. M. Alhajyaseen, A. Pirdavani, N. Reinolsmann, K. Brijs e T. Brijs (2019). Speed perception and actual speed in a driving simulator and real-world: A validation study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *62*, 637–650. DOI: 10.1016/j.trf.2019.02.019

Lyu, N., L. Xie, C. Wu, Q. Fu e C. Deng (2017). Driver's cognitive workload and driving performance under traffic sign information exposure in complex environments: A case study of the highways in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *14*(2). DOI: doi.org/10.3390/ijerph14020203

Meuleners, L., e M. Fraser (2015). A validation study of driving errors using a driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *29*, 14–21. DOI: 10.1016/j.trf.2014.11.009

Perez, W. A., M. A. Bertola e B. Philips (2016). *Active Traffic Management: Comprehension, Legibility, Distance, and Motorist Behavior in Response to Selected Variable Speed Limit and Lane Control Signing* (Publication No. FHWA-HRT-16-037). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Disponível em: www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/16037/index.cfm (acesso em 13/07/2025)

Underwood, G., D. Crundall e P. Chapman (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *14*(6), 435–446. DOI: DOI: 10.1016/j.trf.2011.04.008

Wynne, R. A., V. Beanland e P. M. Salmon (2019). Systematic review of driving simulator validation studies. *Safety Science*, *117*, 138–151. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.04.004

Zhang, S., C. Zhao, Z. Zhang e Y. Lv (2025). Driving simulator validation studies: A systematic review. In *Simulation Modelling Practice and Theory* (Vol. 138). Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.simpat.2024.103020

Thales Mezzacasa Brum (thalesmbrum@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, rua Osvaldo Aranha, 9, Centro, RS, Brasil

VISÃO E ANTECIPAÇÃO DE RISCO EM TRECHO CRÍTICO: AVALIAÇÃO DE SINALIZAÇÃO COMPLEMENTAR DE ADVERTÊNCIA ATRAVÉS DE MÉTRICAS PSICOFISIOLÓGICAS

Ruy Santos Ribeiro[1], Orlando Y. E. Albarracin[2], Guilherme Rodrigues Linhares[3], Liedi L. B. Bernucci[4], Ana Paula C. Larocca[1]
[1]EESC-USP, [2]Mackenzie, [3]Arteris S.A., [4] POLI-USP

RESUMO
O presente estudo avaliou como sinais complementares de advertência influenciam o nível de atenção e consequente percepção de risco dos condutores em trecho crítico de rodovia. A pesquisa foi conduzida com 120 motoristas em simulador de direção equipado com rastreamento ocular. Foram extraídas métricas de percepção da sinalização: duração da fixação, distância e taxa de percepção, variação da pupila e velocidade ao perceber e passar pelo sinal. Os resultados indicaram aumentos significativos da pupila ao observar os sinais complementares, além de durações de fixação superiores às reportadas na literatura, sugerindo influência da sinalização. A análise também identificou variações significativas na pupila de forma antecipada aos pontos onde os sinais complementares foram posicionados. Os resultados permitiram concluir o potencial efeito da sinalização na percepção de risco de forma prévia, adiantando reações adequadas, garantindo maior atenção ao traçado viário complexo e potencializando a mitigação da sinistralidade viária em trechos críticos.

1. INTRODUÇÃO

Rodovias rurais oportunamente precisam atravessar áreas de relevo montanhoso, resultando em traçados e geometria complexa, caracterizada por alinhamentos horizontais e verticais com curvas e rampas acentuadas. Frequentemente, esses locais estão associados a uma sinistralidade elevada, em razão das limitações de visibilidade, da dificuldade de frenagem antecipada em declives, da menor margem para correções de trajetória e, muitas vezes, da falha na percepção do risco (Duddu, Pulugurtha, e Kukkapalli, 2020). Tais condições impõem exigências cognitivas adicionais ao condutor, tornando essencial a adoção de intervenções que favoreçam a antecipação da percepção de perigo.

Nesse sentido, complementar a sinalização de advertência pode ser importante para modular adequadamente a forma como os motoristas respondem ao alinhamento da via (Han, Du, e Ma, 2024). No entanto, para avaliar a eficácia desse tipo de intervenção, com frequência são necessários estudos do tipo "antes e depois" (AASHTO, 2010), que demandam não apenas a implementação imediata da medida, mas também a observação de um período subsequente para verificar seu impacto sobre a ocorrência de sinistros. Essa abordagem, porém, apresenta limitações, uma vez que depende da ocorrência real de sinistros e do tempo necessário para que dados significativos sejam acumulados. Nesse contexto, os simuladores de direção se apresentam como ferramentas para a avaliação de intervenções viárias, ao possibilitar a análise prévia de seu efeito sobre o comportamento dos condutores em ambiente seguro e controlado (Bakhshi, Gaweesh e Ahmed, 2021). Quando aliadas a tecnologias de rastreamento ocular, essas ferramentas permitem a coleta de métricas psicofisiológicas relacionadas à atenção e à percepção visual, contribuindo para uma compreensão aprofundada da eficácia de elementos, tal qual a sinalização viária, nos níveis de atenção (Harris, Eayrs e Lavie, 2023).

A pupilometria é uma das métricas psicofisiológicas utilizadas para estimar o estado de atenção, embora ainda pouco explorada no contexto da engenharia de transportes, especificamente para a avaliação da sinalização viária em trechos críticos. Essa métrica permite medir variações no diâmetro da pupila provocadas por gatilhos neurológicos indicativos de alterações na carga cognitiva em processos de tomada de decisão (Kret e Sjak-Shie, 2019, Kaul e Dipp, 2023). A principal vantagem da sua utilização reside no fato de se tratar de uma resposta involuntária do organismo (Radhakrishnan et al., 2023; Kret e Sjak-Shie, 2019), que elimina o viés subjetivo presente em estudos pioneiros sobre percepção de sinalização, os quais dependiam majoritariamente de relatos verbais dos condutores para inferir os efeitos da sinalização sobre o comportamento ao volante.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo investigar a percepção de risco de motoristas ao trafegar por um trecho crítico, sob a influência de sinalização complementar de advertência. Parte-se da hipótese de que sinais na cor verde-limão de contagem regressiva, combinados a placas de advertência para pista sinuosa e escorregadia — elementos visuais atípicos em regiões com geometria convencional — seriam capazes de atrair mais efetivamente a atenção dos condutores, induzindo um estado de alerta elevado e, por consequência, aumentando a percepção de risco associada ao traçado viário. A investigação dessa hipótese busca não apenas verificar a eficácia da intervenção na modulação do comportamento do condutor no trecho em questão, mas também contribuir para o desenvolvimento de diretrizes baseadas em evidências que possam ser aplicadas em outros segmentos rodoviários com características geométricas semelhantes. Assim, o estudo se propõe a oferecer subsídios para o aprimoramento da sinalização em trechos críticos, reforçando a importância do uso

de estratégias visuais não convencionais para potencializar a mitigação da sinistralidade viária nesses segmentos.

2. METODOLOGIA

2.1. Equipamentos e programas

Este estudo utilizou um simulador de direção de base fixa, configurado para replicar a experiência de condução de um veículo semelhante a um Citroën C3 semiautomático, com troca de marchas por meio de câmbio tipo borboleta. A simulação foi executada no software *Virtual Test Drive* (VTD), desenvolvido pela empresa Vires. A projeção do cenário foi realizada em uma televisão de 85 polegadas, posicionada a aproximadamente 1,2 m de distância dos olhos do participante. O sistema de rastreamento ocular empregado foi o *SmartEye*, composto por três câmeras infravermelhas e os softwares *SmartEye Pro*, para captura e processamento em tempo real e *Mapps*, utilizado nas análises posteriores.

2.2. Cenários

O trecho crítico em análise representa um segmento de 4 km de uma rodovia federal brasileira, de velocidade máxima regulamentada em 60 km/h. Ao longo do trecho, destacam-se três curvas horizontais principais, com raios de 113 m, 152 m e 113 m, respectivamente. A seção transversal da via é composta por três faixas de rolamento, cada uma com 3,75 m de largura, e sem acostamentos. A sinalização presente no trajeto foi fornecida pela concessionária responsável pela rodovia.

Para aumentar a conspicuidade e por consequência a percepção de risco no trecho crítico, foram propostos 3 conjuntos de modificações, denominados *SET*, como ilustrado na Figura 1, sendo o SET1 composto pela sinalização em contagem regressiva, linhas de estímulo a redução da velocidade e sinais de pista escorregadia; o SET2, composto pelo pavimento mais escuro, promovendo maior contraste com a sinalização horizontal; e o SET3, composto pelo sinal em semipórtico indicando pista sinuosa. Dessa forma, 8 cenários foram modelados considerando a combinação da presença dessas intervenções, possibilitando a análise das mais influentes, conforme demonstrado na Tabela 1.

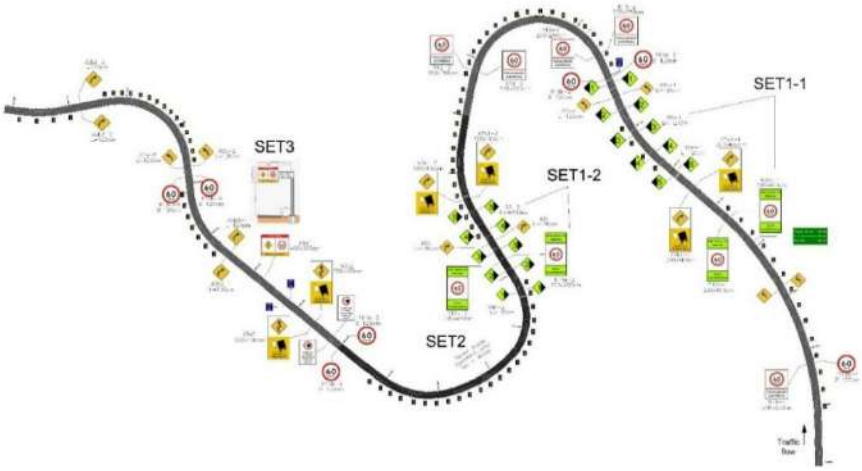


Figura 1: Sinalização e traçado do trecho crítico analisado

Tabela 1: Presença das intervenções nos cenários

Intervenção	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SET1	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
SET2	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
SET3	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim

2.3. Amostra

A amostra do estudo foi composta por 120 voluntários selecionados entre membros da universidade, incluindo servidores e alunos, com idades variando entre 18 e 66 anos ($\mu = 28\ anos;\ \sigma = 10\ anos$), coletadas durante 4 meses. A distribuição por sexo foi de 70% do gênero masculino e 30% do feminino. Apenas 14% dos participantes relataram experiência prévia com simuladores de direção, e dois atuavam como motoristas profissionais. Os participantes não foram selecionados com o objetivo de representar um grupo populacional específico. Como critério de inclusão, era necessário possuir carteira de habilitação válida para veículos de passeio. Todos os participantes concluíram a simulação sem relatar qualquer desconforto ou náusea.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, estão dispostos os resultados das métricas do rastreio do olhar em termos de média e desvio padrão, entre parênteses, para cada sinal e cenário em que estava presente.

Tabela 2: Resultados do rastreamento ocular

Descrição	Sinal	Cenário	Taxa de percepção (%)	Duração primeira fixação (ms)	Velocidade na primeira fixação (km/h)	Variação da pupila (mm)	Dist. de percepção (m)	Velocidade no sinal (km/h)
Pista escorregadia 1		2	25,0	481 (83)	63 (10)	-0,012 (0,08)	133 (24)	65 (11)
		4	18,3	618 (369)	62 (8)	0,283 (1,01)	132 (19)	62 (10)
		6	20,0	679 (327)	68 (19)	0,212 (0,59)	131 (29)	68 (21)
		8	26,7	585 (198)	66 (15)	0,000 (0,10)	151 (101)	63 (20)
			22,5	**584 (257)**	**65 (14)**	**0,102 (0,54)**	**138 (58)**	**64 (16)**
Contagem regressiva 1		2	81,7	534 (186)	68 (20)	-0,021 (0,31)	147 (44)	62 (13)
		4	78,3	558 (168)	67 (14)	0,094 (0,57)	161 (148)	61 (12)
		6	81,7	567 (174)	75 (25)	0,036 (0,14)	143 (43)	67 (20)
		8	75,0	546 (171)	75 (25)	0,003 (0,22)	143 (43)	63 (17)
			79,2	**551 (174)**	**71 (22)**	**0,028 (0,35)**	**148 (83)**	**63 (16)**
Pista escorregadia 2		2	8,3	460 (56)	58 (4)	0,112 (0,15)	166 (127)	62 (9)
		4	20,0	476 (95)	60 (10)	-0,107 (0,23)	121 (106)	62 (8)
		6	16,7	470 (82)	54 (6)	0,007 (0,11)	81 (40)	56 (6)
		8	16,7	550 (185)	60 (10)	0,075 (0,15)	90 (27)	66 (13)
			15,4	**492 (121)**	**58 (9)**	**0,003 (0,19)**	**108 (81)**	**62 (10)**
Contagem regressiva 2		2	50,0	485 (192)	60 (12)	0,068 (0,12)	85 (72)	60 (12)
		4	43,3	483 (103)	62 (13)	0,030 (0,17)	112 (103)	63 (12)
		6	45,0	467 (119)	60 (11)	0,059 (0,17)	86 (61)	63 (12)
		8	38,3	552 (219)	62 (13)	-0,046 (0,22)	113 (81)	65 (12)
			44,2	**495 (165)**	**61 (12)**	**0,032 (0,17)**	**98 (80)**	**62 (12)**
Pista sinuosa em semipórtico		3	21,7	516 (121)	56 (6)	-0,023 (0,15)	271 (53)	52 (18)
		4	11,7	569 (202)	60 (10)	0,139 (0,28)	302 (59)	62 (15)
		7	23,3	602 (276)	62 (19)	0,089 (0,29)	283 (20)	55 (10)
		8	11,7	578 (149)	70 (25)	0,047 (0,15)	203 (78)	69 (34)
			17,1	**565 (200)**	**61 (16)**	**0,055 (0,23)**	**269 (59)**	**58 (19)**

O sinal de contagem regressiva apresentou a maior taxa média de percepção na primeira aparição, 79,2%, enquanto, na segunda aparição, caiu para 44,2%. Em comparação, os demais sinais atingiram taxas de percepção significativamente inferiores, notado, por no máximo, 22,5% dos participantes. As durações médias das fixações variaram entre 492 ms e 584 ms — valores superiores aos 400 ms normalmente reportados em estudos anteriores para constatar o processamento da informação do sinal (Li et al., 2022). Fixações mais prolongadas foram observadas no sinal de pista escorregadia, durante sua primeira aparição, e no sinal de pista sinuosa em semipórtico. Em relação ao comportamento operacional, a velocidade média dos participantes apresentou uma redução mais acentuada após a visualização do sinal de contagem regressiva na primeira aparição, caindo de 71 km/h para 63 km/h reação possivelmente desencadeada pela percepção do sinal. Quanto à pupilometria, observaram-se variações médias superiores a 0,01 mm, com exceção do sinal de pista escorregadia na segunda aparição, o que indica um aumento na carga cognitiva em resposta à percepção da maioria das sinalizações analisadas (Kolnes et al., 2024).

Além disso, o diâmetro da pupila dos participantes foi analisado ao longo da simulação por meio de Segmentação Binária, uma técnica de detecção de mudanças que divide séries temporais em segmentos estatisticamente homogêneos, identificando pontos com alterações significativas no padrão do sinal, como variações na média ou na variância. Considerando que o trecho rodoviário apresenta três pontos de intervenções, o algoritmo foi configurado para detectar três pontos de mudança ao longo da simulação. A

Figura 2 apresenta os segmentos com variações nas médias do diâmetro da pupila para o cenário 1, sem intervenções, e para o cenário 8, com todas as intervenções implementadas.

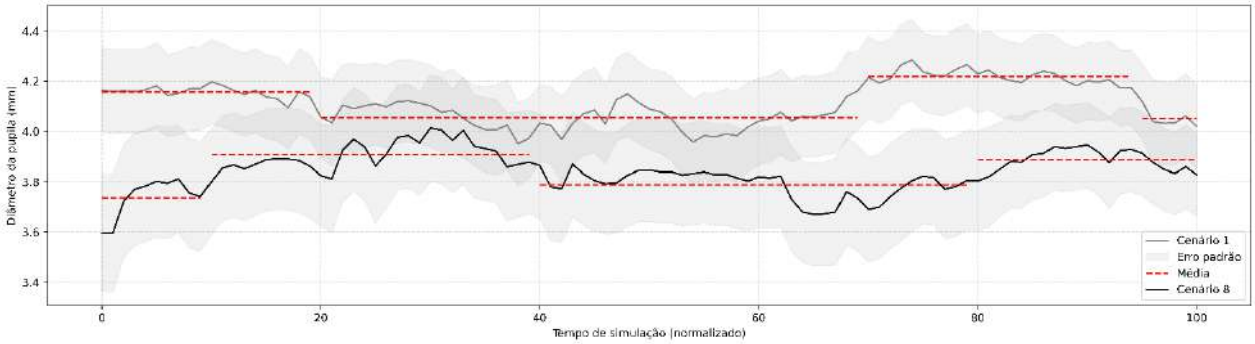


Figura 2: Diâmetro da pupila ao longo da simulação

O gráfico indica que, no cenário 1, os participantes apresentaram uma redução no diâmetro da pupila após 20% da simulação, momento que coincide com o segmento anterior a primeira curva fechada do trecho crítico. No cenário 8, por sua vez, que conta com a sinalização implementada, observou-se um aumento no diâmetro da pupila, com a primeira mudança ocorrendo de forma antecipada em relação ao cenário 1, em 10% da simulação. Além disso, no cenário 1, um aumento expressivo da atenção só foi verificado após 60% da simulação, ou seja, em um ponto posterior ao trecho com curvas acentuadas. Em contraste, no cenário 8, nota-se um aumento na atenção antes mesmo dos 20% da simulação, indicando uma antecipação da resposta cognitiva anterior as curvas acentuadas; uma queda na ativação em torno de 40% da simulação, após a primeira curva acentuada, sugerindo relaxamento cognitivo; e uma nova elevação da atenção por volta de 80%, coincidente com o trecho em tangente e a presença da placa de pista sinuosa em semipórtico.

A baixa taxa de percepção das sinalizações posicionadas antes da segunda curva fechada — Pista Escorregadia 2 e Contagem Regressiva 2 — associada à distância de percepção reduzida, reforça a hipótese de um posicionamento inadequado desses dispositivos. Essa suposição é corroborada pela fraca resposta atencional observada, expressa tanto pela baixa variação no diâmetro da pupila quanto pela curta duração das fixações direcionadas a essas sinalizações. Tais evidências indicam que os participantes possivelmente não tiveram tempo suficiente para perceber e processar as informações apresentadas, comprometendo a eficácia comunicacional dos elementos de advertência no trecho crítico. Além disso, os resultados levantam a possibilidade de que a sinalização complementar nesse segundo ponto precise ter sua localização revista para garantir maior efetividade, ou ainda, desnecessária, já que se observou baixa variação da velocidade.

Ademais, aplicou-se o teste de permutação com 10.000 amostragens para verificar a significância estatística das diferenças entre as médias do diâmetro da pupila nos segmentos identificados pela Segmentação Binária para o cenário 8. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 3: Resultado das médias por segmento e teste de permutação entre segmentos

Segmento	Média (mm)	Comparação entre segmentos	Δ (mm)	p-valor
0-10%	3,738			
10-40%	3,906	0-10% e 10-40%	0,169	< 0,01
40-80%	3,789	10-40% e 40-80%	-0,117	< 0,01
80-100%	3,886	40-80% e 80-100%	0,097	< 0,01

Conforme apresentado na Tabela 3, no primeiro segmento (0–10%), os participantes exibiram um diâmetro da pupila médio de 3,738 mm. Durante o segundo segmento (10–40%), esse valor aumentou para 3,906 mm. O teste de permutação confirmou um aumento estatisticamente significativo entre esses dois segmentos (Δ = 0,169 mm, $p < 0,0001$), sugerindo um maior engajamento atencional. Notavelmente, esse período corresponde à aproximação da primeira curva acentuada, onde a sinalização SET1 foi implementada, indicando que o aumento da atenção pode ter sido provocado pelo estímulo visual. No terceiro segmento (40–80%), o diâmetro médio diminuiu para 3,789 mm. Um segundo teste de permutação revelou uma redução significativa em relação ao segmento anterior (Δ = –0,117 mm, $p < 0,0001$), possivelmente refletindo uma diminuição da carga cognitiva ou da demanda atencional. Por fim, no último segmento (80–100%), o diâmetro voltou a aumentar, atingindo 3,886 mm. Um terceiro teste de permutação, comparando este segmento ao anterior, indicou um aumento significativo (Δ = 0,097 mm, $p = 0,0002$), sugerindo uma nova resposta atencional à medida que os participantes se aproximavam do final do cenário, onde foi exibida a sinalização SET3.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que a sinalização complementar de advertência — composta por elementos visuais atípicos, como sinais em cor verde-limão, contagem regressiva, placas de pista escorregadia e semipórtico de pista sinuosa — foi eficaz em induzir respostas atencionais significativas nos condutores ao longo do trecho crítico simulado. A análise pupilométrica demonstrou que as variações no diâmetro da pupila estiveram fortemente associadas à presença desses dispositivos, sugerindo que atuaram como gatilhos visuais capazes de antecipar a percepção de risco. Esse efeito foi corroborado tanto pelo aumento significativo no diâmetro da pupila em trechos próximos às intervenções quanto pela maior duração das fixações, indicando uma demanda cognitiva mais elevada. Adicionalmente, a aplicação da Segmentação Binária permitiu identificar mudanças pontuais no estado atencional ao longo da simulação, evidenciando que, no cenário com todas as intervenções implementadas, a atenção foi mobilizada de forma mais precoce do que no cenário sem sinalização. No aspecto comportamental, observou-se também uma redução expressiva da velocidade dos veículos após a fixação dos olhos nos sinais, reforçando a influência da sinalização na condução. Esses achados destacam a importância do posicionamento estratégico das placas, uma vez que sinais mal localizados não provocaram mudanças relevantes na atenção ou na velocidade, comprometendo sua efetividade. Além de validar a pupilometria como uma métrica objetiva e sensível à percepção de risco no contexto viário, o estudo evidenciou o potencial dos simuladores de direção aliados ao rastreamento ocular para avaliar, de forma segura e antecipada, a eficácia de intervenções ainda não implementadas em campo. Tal abordagem mostra-se particularmente vantajosa em trechos críticos de rodovias rurais, onde decisões baseadas exclusivamente em dados históricos de sinistros podem demorar a gerar evidências concretas. Por fim, os resultados apresentados fornecem subsídios para o aprimoramento das diretrizes de sinalização viária em segmentos com geometria desafiadora. Recomenda-se que estudos futuros investiguem diferentes combinações de estímulos visuais, bem como o impacto cumulativo da sinalização ao longo de trechos extensos, considerando também as variações entre perfis de condutores. Com isso, espera-se contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação de riscos e promoção da segurança viária.

Agradecimentos

Ao aluno de iniciação científica, Guilherme Ferrer de Souza, pelo apoio prestado na etapa processamento dos dados. Esta pesquisa foi apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - 001; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – 407056/2022-0 e 304448/2023-0; e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – 2021/10727-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *Highway Safety Manual – HSM*.

Bakhshi, A. K., Gaweesh, S. M., e Ahmed, M. M. (2021). The safety performance of connected vehicles on slippery horizontal curves through enhancing truck drivers' situational awareness: A driving simulator experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour,* v. 79, p. 118–138. https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.04.017

Duddu, V. R., Pulugurtha, S. S., e Kukkapalli, V. M. (2020). Variable categories influencing single-vehicle run-off-road crashes and their severity. *Transportation Engineering*, v. 2, n. 100038. https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100038

Han, L., Du, Z., & Ma, A. (2024). Evaluation of traffic signs information volume at highway tunnel entrance zone based on the visual sample entropy of novice and experienced drivers. *Traffic Injury Prevention,* v. 25, p. 499–509. https://doi.org/10.1080/15389588.2023.2300645

Harris, A. M., Eayrs, J. O., & Lavie, N. (2023). Establishing gaze markers of perceptual load during multi-target visual search. *Cognitive Research: Principles and Implications, 8*, 1–16. https://doi.org/10.1186/s41235-023-00498-7

Kaul, R., e Jipp, M. (2023). Influence of cognitive processes on driver decision-making in dilemma zone. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* v.19, n. 100805. https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100805

Kolnes, M., Uusberg, A., e Nieuwenhuis, S. (2024). Broadening of attention dilates the pupil. *Attention, Perception, & Psychophysics,* v. 86, n. 1, p. 146–158. https://doi.org/10.3758/s13414-023-02793-3

Kret, M. E., e Sjak-Shie, E. E. (2019). Preprocessing pupil size data: Guidelines and code. *Behavior Research Methods, 51*(3), 1336–1342. https://doi.org/10.3758/s13428-018-1075-y

Li, H., Xie, S., Yang, F., Lu, Y., & Zhu, S. (2022). Utilization of drivers' dynamic visual characteristics to find the appropriate information quantity of traffic engineering facilities on straight roads of grassland highways. *Frontiers in Neuroscience,* v. 16. https://doi.org/10.3389/fnins.2022.872863

Radhakrishnan, V., Louw, T., Cirino Gonçalves, R., Torrao, G., Lenné, M. G., e Merat, N. (2023). Using pupillometry and gaze-based metrics for understanding drivers' mental workload during automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 94, p. 254–267. https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.02.015

Gestão e modelagem da Segurança Viária

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DE TENDÊNCIA DA SINISTRALIDADE VIÁRIA EM MUNICÍPIOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Pedro Augusto Borges dos Santos, André Victor Igarashi, Everaldo Valenga Alves, Roberta dos Reis Mantovani
Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo

RESUMO
Os sinistros de trânsito representam um grave problema de saúde pública, com impactos relevantes em mortalidade e morbidade, além de elevados custos sociais e econômicos. No Brasil, o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans) estabelece metas de redução de 50% nos óbitos até 2030, exigindo o aprimoramento de ferramentas de monitoramento em diferentes escalas geográficas. Neste trabalho, aplica-se o teste de Mann-Kendall para detectar tendências estatisticamente significativas em séries temporais mensais de óbitos e sinistros com vítimas feridas nos 645 municípios do estado de São Paulo. Foram utilizadas bases do Infosiga.SP entre 2015 - 2025 (óbitos) e 2019 - 2025 (sinistros). Identificaram-se tendências em 57 municípios para óbitos (31 de aumento) e 175 para sinistros (133 de aumento). A abordagem adotada oferece uma ferramenta complementar para o monitoramento da segurança viária em escala local, apoiando a priorização de ações e políticas públicas baseadas em evidências.

1. INTRODUÇÃO

Os sinistros de trânsito são um dos principais problemas globais de saúde pública, com uma consequência estimada de 1,19 milhão de óbitos apenas no ano de 2021 (WHO, 2023). No Brasil, o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (Pnatrans) é criado com o objetivo de mitigar essa problemática em nível nacional, com uma meta de redução em 50% do índice de óbitos por 100 habitantes, entre 2021 e 2030 (CONTRAN, 2023). Além da meta em âmbito nacional, o plano também define a mesma meta para as unidades da federação e para os municípios (CONTRAN, 2023).

A gestão da mobilidade segura tem como um de seus principais pilares o monitoramento do desempenho da segurança viária, através do acompanhamento de intervenções e de indicadores quantitativos, que podem envolver a quantidade de sinistros e de óbitos no trânsito. Na literatura, estudos que avaliam séries temporais de dados de óbitos e sinistros concentram-se nos testes ditos paramétricos, como modelo de média móvel autorregressivo, autorregressão vetorial, e modelagem por equações estruturais (Lavrenz et al., 2018). Esses métodos, além de requererem pressupostos fortes sobre os dados (como normalidade e linearidade), também não são de fácil entendimento para o público geral, o que compromete seu uso em aplicações cotidianas.

Assim, trabalhos prévios avançaram na questão da análise de séries temporais de óbitos e sinistros, como Deretić *et al.* (2022) que investigaram a série temporal mensal de sinistros entre 2016 e 2019 na Cidade de Belgrado, Sérvia, identificando um componente de sazonalidade. Indo além, Kričković *et al.* (2024) analisaram a tendência dos sinistros de trânsito e os padrões espaciais em uma região do norte da Sérvia, desagregando a amostra em 45 municípios. Com base em uma série temporal de escala anual entre 2011 e 2020, foi possível identificar tendências estatisticamente significativas em 15 dos municípios analisados.

O monitoramento do desempenho da segurança viária necessita de métodos que possibilitam a identificação precisa dos locais com cenários de agravamento ou melhoria, principalmente em escalas geográficas mais precisas, como os municípios. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é analisar a tendência da sinistralidade viária nos municípios do estado de São Paulo, em uma escala mensal, com base na quantidade de óbitos de sinistros de trânsito e na quantidade de sinistros com vítimas feridas (não fatais). Entende-se que esse processo sirva de subsídio para a priorização de ações no estado, auxiliando na elaboração de políticas públicas com base em evidências.

2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada nesse trabalho está dividida em três etapas: (i) coleta de dados, (ii) processamento dos dados; e (iii) modelagem estatística. Todo o processo foi desenvolvido com o uso da linguagem de programação R (R Core Team, 2024). Primeiro, foram coletados os dados de óbitos e sinistros com vítimas feridas dos dados abertos do Sistema de Informações Gerenciais de Sinistros de Trânsito de São Paulo – Infosiga.SP (Detran-SP, 2025), considerando o período entre janeiro de 2015 e maio de 2025, no caso dos óbitos, e janeiro de 2019 até maio de 2025 do caso dos sinistros com vítimas feridas. Foi selecionado o período

completo disponível no sistema.

Em seguida, na etapa de pré-processamento foram removidas as ocorrências classificadas como "NOTIFICACAO". Para o período dos óbitos, considerou-se o atributo "data_obito", e para o filtro do período do sinistro foi considerado o atributo "data_sinistro", com filtro para as ocorrências registradas como "SINISTRO NAO FATAL". Com a chave "municipio", os dados foram agrupados de acordo com os 645 municípios do estado e pelo mês/ano registrado. Com isso, foram criadas 645 séries temporais mensais para cada um dos objetos em análise: óbitos no trânsito e sinistros com vítimas feridas.

Na última etapa, foi aplicado o método de Mann-Kendall (MK), com a finalidade de detectar a existência e a intensidade de tendências estatisticamente significativas. O MK é um método não-paramétrico utilizado para detectar tendências monotônicas em séries temporais. Por não assumir uma distribuição específica dos dados, ele é útil em séries com uma variabilidade significativa, principalmente em municípios de menor porte em que as ocorrências de trânsito podem ser mais esporádicas. A estatística de teste é baseada no número de pares ordenados de observações em que os valores posteriores são maiores ou menores que os anteriores. Um dos resultados numéricos do teste é o coeficiente Tau, que é uma medida de correlação que expressa a direção e a força da tendência em uma série temporal. Seu valor varia entre -1 e 1, onde valores próximos a 1 indicam uma forte tendência crescente, valores próximos a -1 indicam uma forte tendência decrescente e valores próximos a 0 sugerem ausência de tendência (Kendall, 1975; Mann, 1945). Para o presente trabalho, o MK foi aplicado com auxílio da biblioteca *trend* da linguagem R (Pohlert, 2015).

3. RESULTADOS

Ao longo do período considerado, foram observados 57.120 óbitos no trânsito (janeiro / 2015 – maio / 2025) e 781.569 sinistros com vítimas leves e graves (janeiro / 2019 – maio / 2025) no estado de São Paulo. As distribuições dessas quantidades ao longo dos meses das séries históricas estão dispostas nas Figura 1 Figura 2. Constata-se através dessas que, devido à sazonalidade e alta flutuação dos dados, não é possível ter uma visão clara da tendência da sinistralidade através dessa visualização simplesmente.

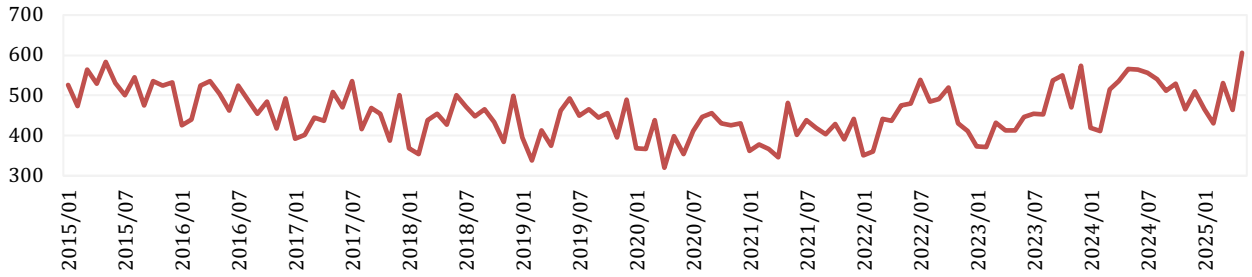


Figura 1: Número de óbitos por mês e ano no estado de São Paulo

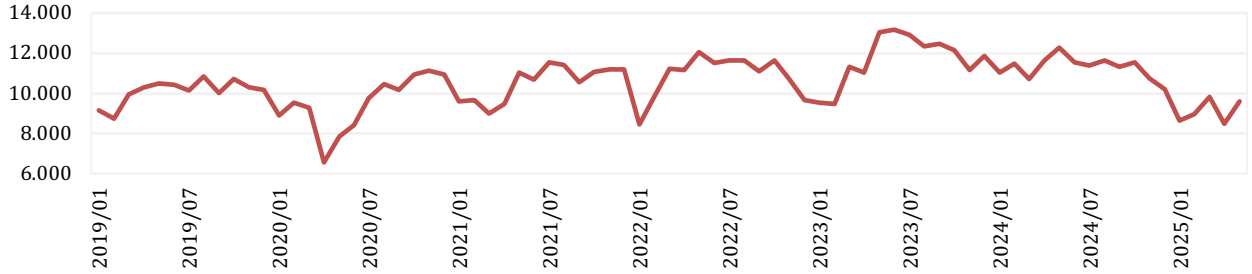


Figura 2: Número de sinistros por mês e ano no estado de São Paulo

A aplicação do MK resultou na detecção de 57 municípios com tendências estatisticamente significativas (*p*-valor < 0,05) para a quantidade de óbitos e 175 municípios para a quantidade de sinistros com vítimas feridas.

Nos gráficos da Figura 3 estão apresentados os resultados do MK para as duas variáveis investigadas, considerando apenas os resultados significativos. Entre os 57 municípios com tendência significativa na quantidade de óbitos, 31 apresentam tendência de aumento e 26 de redução. Os municípios de Itupeva, Pedregulho e Hortolândia apresentam os maiores valores de Tau, enquanto Iaras, Santópolis do Aguapeí e Guaratinguetá apresentam os menores. Ainda, destacam-se negativamente os municípios de Sorocaba, São Bernardo do Campo e Ribeirão Preto - municípios de maior porte com mais óbitos no trânsito, comparativamente, e com uma tendência de aumento.

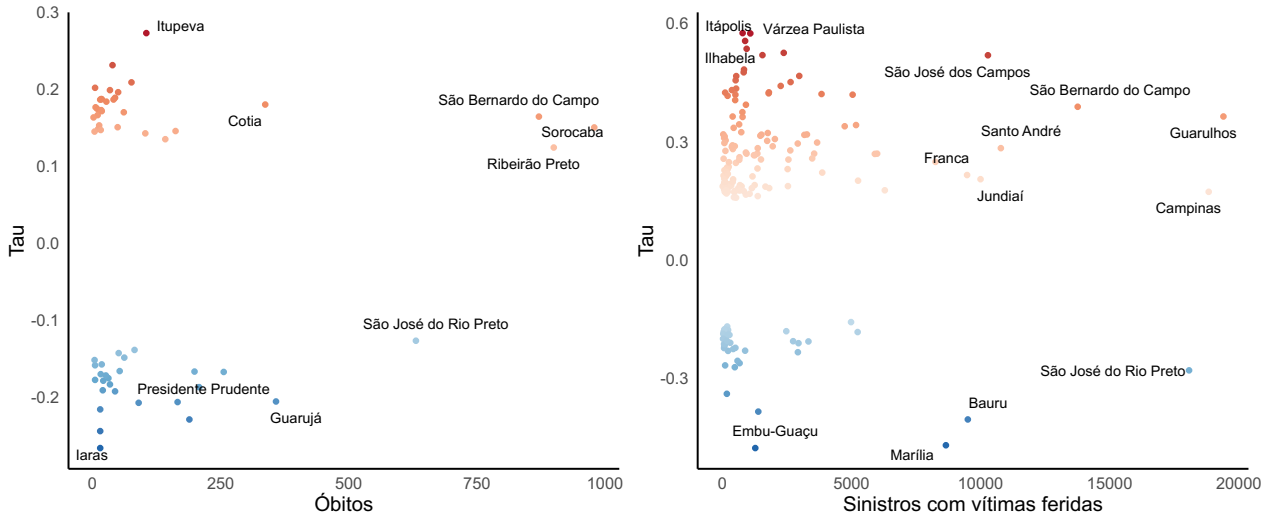


Figura 3: Valor de Tau para a série de óbitos (esq.) e sinistros com vítimas feridas (dir.)

Entre os 175 com tendência significativa na quantidade de sinistros com vítimas feridas, 133 apresentam tendência de aumento e 42 de redução. Os municípios de Itápolis, Várzea Paulista e Ilhabela apresentam os maiores valores de Tau, enquanto Embu-Guaçu, Marília e Bauru apresentam os menores valores. Municípios de maior porte como São José dos Campos, Guarulhos, Campinas e São Bernardo do Campo apresentam tendências de aumento em conjunto com uma maior quantidade de sinistros, comparativamente. O mapa da Figura 4 apresenta os resultados dos valores de Tau no território do estado.

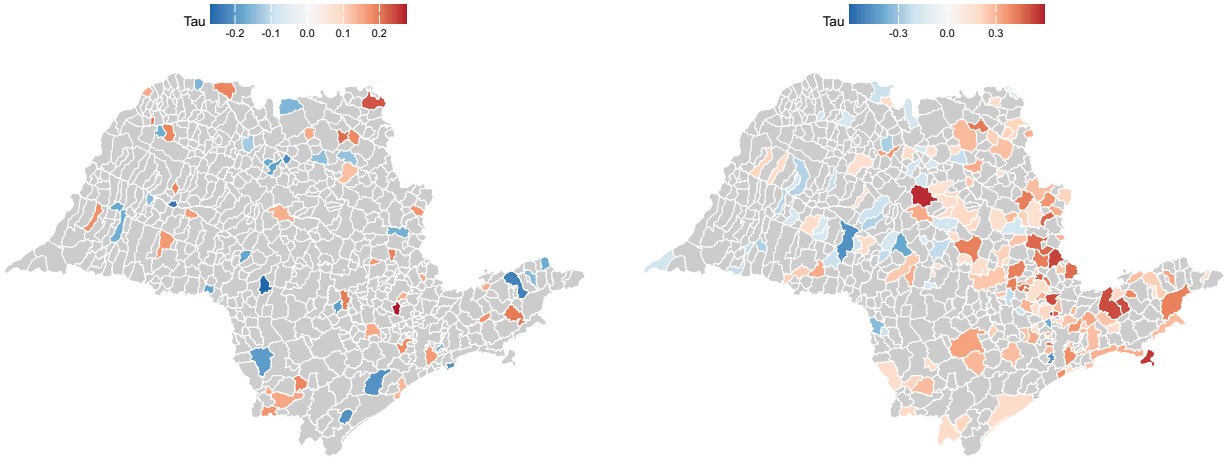


Figura 4: Valores de Tau para as tendências nos números de óbitos (esq.) e sinistros com vítimas feridas (dir.) por município estado de São Paulo.

4. CONCLUSÃO

A gestão da segurança viária tem como um importante pilar o monitoramento e a gestão da informação de dados e indicadores relacionados ao desempenho da mobilidade segura. Buscando novos métodos de realizar essa atividade, esse trabalho traz a aplicação do teste de Mann-Kendall com base em séries temporais mensais de óbitos e sinistros não fatais, em escala geográfica municipal. Com isso, foi possível identificar cenários com tendência de aumento na quantidade de óbitos em 31 municípios e na quantidade de sinistros em 133 municípios. Tal informação pode servir de subsídio para a priorização de políticas públicas no nível estadual, voltadas para a segurança viária nos municípios de São Paulo.

O método por si só não é o suficiente para o diagnóstico completo do desempenho da segurança viária nos municípios do estado, mas apresenta mais uma camada de informação importante, principalmente para avaliar os cenários tendenciosos, e não apenas os valores atuais de óbitos e sinistros. Entende-se que futuros trabalhos podem incluir métodos de clusterização dos municípios e métodos para identificar padrões espaciais da tendência, através da análise de autocorrelação dos dados.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo pelo apoio na elaboração do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONTRAN. (2023). RESOLUÇÃO CONTRAN Nº 1.004, DE 21 DE DEZEMBRO DE 2023. Dispõe sobre o Plano Nacional de Redução de Mortes e Lesões no Trânsito (PNATRANS), instituido pela Lei nº 13.614, de janeiro de 2018. Conselho Nacional de Trânsito. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao10042023.pdf

Deretić, N., Stanimirović, D., Awadh, M. A., Vujanović, N., & Djukić, A. (2022). SARIMA Modelling Approach for Forecasting of Traffic Accidents. Sustainability, 14(8), 4403. https://doi.org/10.3390/su14084403

Detran-SP. (2025). Infosiga.SP - Dados abertos [Conjunto de dados]. https://www.infosiga.sp.gov.br/

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4. ed., 2. impr). Griffin.

Kričković, E., Lukić, T., Srejić, T., Stojšić-Milosavljević, A., Stojanović, V., & Kričković, Z. (2024). Spatial-temporal and trend analysis of traffic accidents in AP Vojvodina (North Serbia). Open Geosciences, 16(1), 20220630. https://doi.org/10.1515/geo-2022-0630

Lavrenz, S. M., Vlahogianni, E. I., Gkritza, K., & Ke, Y. (2018). Time series modeling in traffic safety research. Accident Analysis & Prevention, 117, 368–380. https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.11.030

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. Econometrica, 13(3), 245. https://doi.org/10.2307/1907187

Pohlert, T. (2015). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection (p. 1.1.6) [Conjunto de dados]. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.trend

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing [Manual]. R Foundation for Statistical Computing.

WHO. (2023). Global status report on road safety 2023. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517

Pedro Augusto Borges dos Santos (pedro.santos@detran.sp.gov.br)
Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo, Diretoria de Segurança Viária, Coordenadoria Geral de Segurança Viária, Coordenaria do Observatório de Segurança no Trânsito, R. João Brícola, 32, 10º andar, Centro, São Paulo – SP, Brasil
André Victor Igarashi (andre.igarashi@detran.sp.gov.br)
Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo, Diretoria de Segurança Viária, Coordenadoria Geral de Segurança Viária, Coordenaria do Observatório de Segurança no Trânsito, Divisão de Estudos para Segurança no Trânsito, R. João Brícola, 32, 10º andar, Centro, São Paulo – SP, Brasil
Everaldo Valenga Alves (everaldo.alves@detran.sp.gov.br)
Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo, Diretoria de Segurança Viária, Coordenadoria Geral de Segurança Viária, R. João Brícola, 32, 10º andar, Centro, São Paulo – SP, Brasil
Roberta dos Reis Mantovani (roberta.mantovani@detran.sp.gov.br)
Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo, Diretoria de Segurança Viária, R. João Brícola, 32, 10º andar, Centro, São Paulo – SP, Brasil

CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA VIABILIDADE DE UMA ÁREA DE ESCAPE NA BR-050/MG: TRECHO ARAGUARI – UBERLÂNDIA

Luiz Henrique Baioto Pina Reis, Rogério Lemos Ribeiro
Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Civil

RESUMO
Em regiões acidentadas são frequentes os sinistros envolvendo veículos de carga desgovernados, geralmente decorrentes do superaquecimento do sistema de frenagem em trechos longos e íngremes. Este estudo tem como objetivo identificar critérios técnicos para implantação de áreas de escape em rodovias com trechos íngremes, aplicando-os à rodovia BR-050, entre Araguari e Uberlândia (MG), onde são frequentes ocorrências de perda de frenagem em veículos de carga. A metodologia consistiu em revisão bibliográfica sobre o tema e análise das características topográficas e operacionais do trecho. Em razão de ausência de diretrizes técnicas nacionais consolidadas, foram considerados e adaptados parâmetros técnicos adotados em outros países. Como resultado, a localização mais efetiva para uma área de escape em um segmento crítico da rodovia, com aclives e declives acentuados foi apontada. A aplicação prática desses critérios pode contribuir para a redução de sinistros graves e fortalecimento da segurança viária em rodovias brasileiras em condições semelhantes.

1. INTRODUÇÃO

O trecho da rodovia BR-050, entre os municípios de Uberlândia e Araguari (MG), apresenta declividades significativas, especialmente nas proximidades do rio Araguari, o que compromete a segurança operacional da via. Em 2023, esse segmento registrou 24,1% dos veículos classificados como comerciais (Eco050, 2024), evidenciando sua relevância logística e o risco ampliado associado ao transporte de cargas. Entretanto, a segurança da via muitas vezes é comprometida devido a sua característica topográfica de declives longos e íngremes próximo ao rio Araguari.

Fatores como geometria inadequada, curvas mal projetadas e ausência de dispositivos auxiliares elevam o risco de sinistros de trânsito na malha rodoviária brasileira, sobretudo em regiões montanhosas com declives acentuadas (Pedrini e Reis, 2023). Uma das soluções adotadas para mitigar esses riscos é a implantação de áreas de escape adjacentes à via, especialmente em trechos descendentes, onde a perda de controle veicular por falha nos freios é recorrente. Essas estruturas oferecem espaço seguro para a dissipação da energia cinética de veículos desgovernados, reduzindo a probabilidade de sinistros graves ou fatais (Zanoli, 2003). Compostas, geralmente, por materiais como argilas expandidas, areia ou cascalho, possibilitam a desaceleração progressiva do veículo (Zanoli, 2003; Li Li et al., 2021). No entanto, no Brasil, não existem critérios técnicos específicos estabelecidos para a construção de rampas de escape, sendo necessário recorrer a manuais internacionais. Desse modo, este trabalho tem como objetivo identificar os aspectos técnicos que orientam a escolha da localização adequada de áreas de escape, aplicando-os ao trecho da rodovia BR 050/MG, entre as cidades de Araguari e Uberlândia, no estado de Minas Gerais.

2. METODOLOGIA DOT - STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION

Este item tem como finalidade revisar e apresentar as principais diretrizes técnicas e práticas atualmente adotadas na definição da localização ideal para implantação de áreas de escape. Para esse fim, foram consideradas as metodologias utilizadas pelos principais Departamentos Estaduais de Transportes dos Estados Unidos da América (denominados DOTs - *Departments of Transportation)* no projeto e operação de áreas de escape voltadas à contenção de veículos desgovernados em trechos com declives acentuados. As informações que fundamentam esta análise foram obtidas por meio de revisão bibliográfica, levantamento documental junto aos DOTs estaduais e entrevistas complementares com representantes selecionados, conduzidas pela *National Academies* (2024).

Diversos manuais técnicos elaborados pelos DOTs indicam um conjunto de fatores a serem considerados na seleção de locais apropriados para implantação do dispositivo de contenção (NATIONAL ACADEMIES, 2024). Entre os critérios mais frequentemente citados, destacam-se: topografia e características do terreno; extensão e inclinação do declive; condições do final do segmento em rampa; velocidade de projeto da rodovia; histórico de sinistros envolvendo veículos desgovernados; alinhamento horizontal; volume diário médio de tráfego; porcentagem de veículos pesados na composição do tráfego; disponibilidade de faixas de ultrapassagem; distância de visibilidade; relação custo-benefício da intervenção; e impacto ambiental. Adicionalmente, uma pesquisa nacional conduzida pela *National Academies* (2024) buscou aprofundar o conhecimento sobre as práticas adotadas. Nesse levantamento, os DOTs estaduais foram questionados sobre os critérios considerados na decisão de implantar novas áreas. Os resultados obtidos estão sistematizados na

Tabela 1, onde indicam que os critérios de histórico de sinistros ocasionados por falhas mecânicas e o de julgamento de engenharia são considerados com mais frequência, enquanto as melhorias futuras previstas e as condições do solo são menos consideradas.

Tabela 1: Respostas sobre critérios considerados na determinação de instalação de uma área de escape em novos locais

Critérios	Histórico de Sinistros por Falhas Mecânicas	Julgamento da Engenharia	Declividade e Comprmento da Rampa	Terreno	VDM	VDM Caminhões	Custo de Implantação	Impactos Ambientais	Área disponível	Veículos com Excesso de Peso	Melhorias futuras previstas	Condições do Solo
Sempre	83%	83%	67%	67%	67%	67%	50%	50%	33%	33%	17%	17%
Geralmente	17%	0%	17%	17%	17%	0%	17%	17%	50%	33%	33%	0%
Nunca	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Sem Respostas	0%	17%	17%	17%	17%	33%	33%	33%	17%	34%	50%	83%

Fonte: Adaptado de *National Academies* (2024)

Entre os 21 DOTs estaduais que responderam ao questionário e informaram não dispor de áreas de escape em seus respectivos estados, os motivos mais frequentemente apontados foram: ausência de declives acentuados que justifiquem a adoção desses dispositivos (19 DOTs) e predominância de terreno plano (10 DOTs). Outros fatores citados incluíram baixos volumes de tráfego de caminhões, priorização de outras intervenções de segurança viária e a inexistência de histórico de sinistros envolvendo caminhões desgovernados que justificasse a necessidade de implantação dessas estruturas (NATIONAL ACADEMIES, 2024).

3. ESTUDO DE CASO

A área selecionada para o estudo localiza-se entre os municípios de Uberlândia e Araguari, situados na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no estado de Minas Gerais. O trecho compreende o segmento concedido da rodovia federal BR-050/MG, entre os quilômetros 39 e 64. A rodovia é a principal via de ligação entre esses dois centros urbanos, sendo estratégica para o escoamento de cargas e materiais, dada sua função como corredor logístico de integração regional, demonstrando grande importância geoeconômica.

3.1. Histórico de sinistralidade

A primeira etapa da análise consistiu na utilização de uma base de dados de sinistros referente ao período de janeiro de 2023 a janeiro de 2024. As informações foram obtidas por meio de consulta pública à base de dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), sob o protocolo n.º 50500.040615/2024-91. Para a seleção dos registros, foram aplicados os seguintes filtros: ano de referência (ano de 2023), localização dos sinistros ao longo da rodovia (km), sentido da via (norte ou sul), severidade do evento, alinhamento horizontal do trecho, causa provável e descrição sumária do ocorrido. Dentre as categorias, foi possível identificar e isolar os casos cuja causa provável registrada foi falha mecânica no sistema de frenagem (perda de freios).

Assim, os sinistros foram analisados com base em sua causa provável, visando mapear os casos em que a rampa de escape poderia ter sido acionada em razão de falhas no sistema de frenagem. No entanto, deve-se considerar também outros tipos de sinistros que, embora não estejam diretamente relacionados à perda dos freios, poderiam ser mitigados com a presença desse dispositivo. Segundo o Manual de Segurança Viária do DER/SP (2023), eventos como saídas de pista e tombamentos podem ser atenuados por dispositivos de contenção lateral, como as rampas de escape.

Aprofundando a análise, foi incorporada uma segunda base de dados, da Polícia Rodoviária Federal (PRF), de 2022 a 2024, restrita a sinistros com vítimas ou vítimas fatais. A Figura 1 apresenta a distribuição dos sinistros classificados como saídas de pista e tombamentos ao longo do trecho, permitindo a identificação de pontos críticos sob esse viés. A análise aponta concentração entre o km 54 e 58, coincidindo com os registros de falhas de frenagem. Considerando, tanto os sinistros decorrentes de perda de freios (base de dados 1) quanto os passíveis de mitigação por rampas de escape (base de dados 2), confirma-se a criticidade do trecho, reforçando a sua priorização para o local da rampa, por abranger o maior número de sinistros potencialmente evitáveis.

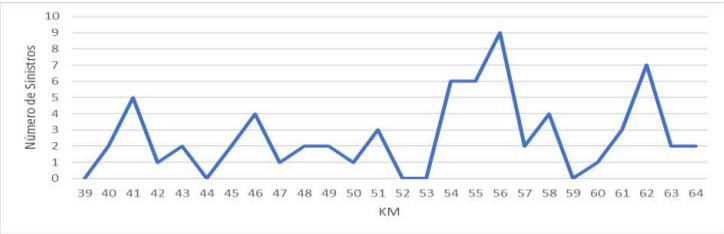


Figura 1: Saídas de pista e tombamentos na BR-050/MG entre o km 39 e 64 de 2022 a 2024 (Adaptado de PRF, 2025)

3.2. Parâmetros geométricos existentes

3.2.1. Alinhamento vertical: rampas

Segundo Zanoli (2003), as características geométricas da rodovia, como o alinhamento vertical, inclinação máxima da rampa e extensões de declives são fatores relevantes na ocorrência de sinistros. Através do software *Google Earth Pro* (2024), obteve-se o perfil de elevação do trecho em estudo, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Perfil de elevação das rampas na rodovia BR-050 entre o km 39 e 64 (Adaptado de *Google Earth Pro*, 2025)

Segundo o perfil de elevação do traçado, o trecho possui uma inclinação média de 3,4%, extensão de 25 quilômetros e um ganho/perda de elevação de até 478 metros. Os pontos mais críticos são aqueles que possuem as rampas mais extensas com inclinações mais íngremes. Analisando a Figura 2 quanto a esse critério, os trechos críticos candidatos à implantação da área de escape são os que antecedem o rio Araguari (km 54+500) em ambos os sentidos: km 54+500 ao 61, sentido norte, com 6,5 quilômetros de extensão e rampa máxima de 7%; km 54+500 ao 47, sentido sul, com 7,5 quilômetros de extensão e rampa máxima com 13% de inclinação.

3.2.2. Alinhamento horizontal: curvas

De acordo com a AASHTO (2018) é importante construir áreas de escape antes das curvas horizontais que podem provocar o tombamento de veículos devido ao excesso de velocidade. A Tabela 2 evidencia a localização e o raio das curvas horizontais em ordem crescente conforme os marcos quilométricos da rodovia.

Tabela 2: Localização e raio das curvas horizontais da rodovia BR-050 entre o km 39 e 64

Curva Horizontal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Raio (m)	660	225	240	600	840	200	150	220	180	250	210	190	490	700	300
Localização	41 + 450	47 + 450	48 + 200	49 + 100	51 + 350	52 + 225	53 + 050	53 + 400	54 + 030	54 + 550	55 + 690	56 + 180	57 + 000	59 + 530	60 + 650

Assim, a velocidade de tombamento em curvas horizontais é diretamente proporcional ao raio de curvatura, considerando-se uma velocidade diretriz praticamente constante. Assim, quanto menor o raio da curva, menor será a velocidade crítica de tombamento, tornando essas curvas perigosas para veículos com falhas de controle. Através da Tabela 3 identifica-se que os locais mais críticos são as curvas 7, 9 e 12 com raios de curvatura de 150 m, 180 m e 190 m respectivamente. Portanto, o trecho crítico está entre os km 52 e 56. Além disso, destaca-se que o dispositivo deve ser implantado antecedendo uma dessas curvas, pois são nelas que o veículo desgovernado tende a ultrapassar a velocidade de tombamento resultando em algum sinistro rodoviário.

3.3. Impacto ambiental, econômico e área de implantação

Com base nos critérios técnicos analisados, torna-se possível delimitar um ponto crítico específico que concentre a maior sobreposição de fatores de risco, servindo como referência para a escolha do local de implantação da área de escape. A identificação desse ponto permite avançar para a etapa de avaliação ambiental e econômica, visto que a localização selecionada influencia diretamente nos impactos ambientais da obra e operação do dispositivo, bem como nos custos associados. A Tabela 3 resume os trechos críticos identificados em cada critério técnico, com o objetivo de auxiliar na convergência para a seleção do ponto mais adequado.

Tabela 3: Trechos críticos segundos os critérios técnicos analisados.

Critério	Localização Trecho Crítico (Km)
Histórico de Sinistralidade	54+000 ao 59+000
Alinhamento Vertical (Rampas)	47+000 ao 61+000
Alinhamento Horizontal (Curvas)	53+000 ao 56+000

Assim, o trecho entre os km 54 e 56 foi identificado como o mais crítico por atender simultaneamente aos principais critérios técnicos. A avaliação do alinhamento horizontal indica a necessidade de implantar o dispositivo a montante de curvas com menor raio, maximizando sua eficácia. No sentido norte, considerado o trecho com maior histórico de sinistros, topografia favorável, espaço disponível e menor demanda de escavação, reduzindo custos, recomenda-se a implantação na tangente anterior à curva 12 (km 56+180). A seção transversal possui desnível oposto ao sentido do rio Araguari, o que minimiza riscos ambientais em casos de sinistros. A implantação no lado direito da via, posição ideal para o sentido norte, com a caixa de retenção em tangente, facilita o acesso de veículos desgovernados e das equipes de operação e manutenção, conforme já proposto por Silva (2022) e ilustrado na Figura 3 a representação visual do dispositivo.



Figura 3: Representação visual em planta do dispositivo, curva do km 56+180 (Adaptado de SILVA, 2022)

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou os critérios técnicos para verificação da necessidade e localização de áreas de escape na rodovia BR-050, entre Araguari e Uberlândia (MG). Os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de novos dispositivos de contenção e o aprimoramento metodológico na área. A revisão bibliográfica evidenciou lacunas normativas e reforçou a relevância de diretrizes uniformes adaptadas ao contexto brasileiro. Quatro critérios recorrentes foram identificados: histórico de sinistros; extensão e a inclinação das rampas; volume de tráfego e velocidade de projeto; e julgamento de especialistas. Em razão da robustez metodológica e da atualidade das recomendações, optou-se por adotar como referência, os parâmetros estabelecidos pelos DOTs estaduais americanos, reforçando a importância de abordagens estruturadas para a segurança viária. Os critérios utilizados na análise do melhor local foram: histórico de sinistralidade; parâmetros geométricos existentes (rampas e curvas horizontais); impacto ambiental e econômico; e local para área de implantação.

Para pesquisas futuras, recomenda-se: investigar a viabilidade de uma nova área de escape no sentido sul da BR-050, km 54; padronização normativa dos critérios de escolha de implantação e localização e diretrizes de projetos e sinalização para novas áreas de escape; aprofundar os estudos de viabilidade econômica, utilizando indicadores como VPL, B/C, TIR e *Payback*; e avaliação de riscos e custo-benefício das soluções propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2018) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. AASHTO, Washington, D.C.

Li Li, Li, G. Z., Zhang, D., Fang, R., & Yang, W. C. (2021) Effects of emergency escape ramps on crash injury severity reduction on mountain freeways: A case study in China. Journal of Transportation Safety & Security, 1269–1288.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2024). Truck Emergency Escape Ramp Design and Operation. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/27749.

PEDRINI, Joana Bellumat; REIS, Geovani Firme. Segurança viária: análise de critérios técnicos para tomada de decisão de implantação de área de escape. Espírito Santo, 2023.

SILVA, Rafael Augusto da. Estudo de eficiência das áreas de escape e seu impacto na queda da acidentalidade: estudo de caso ERS-431. Trabalho Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ZANOLI, P. R. (2003). Área de escape para caminhões desgovernados. São Carlos, 2003. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde 08042014-084813

Luiz Henrique Baioto Pina Reis (luiz.reis@ufu.br) *e Rogério Lemos Ribeiro* (rogerio.ribeiro@ufu.br). Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Av. João Naves, 2121, Santa Mônica, Uberlândia (MG), Brasil

GESTÃO DE PONTOS CRÍTICOS EM RODOVIAS DE MINAS GERAIS: RESULTADOS E LIÇÕES APRENDIDAS APÓS O PRIMEIRO ANO DE IMPLEMENTAÇÃO

Anna Paula Lasafá Boaventura Neto, Esther Ribeiro Júlio, Grasiele Fernanda Soares, Letícia Costa Gonçalves Munhoz, Rodrigo Franklin Marques Silva, Rodrigo Santos Colares
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

RESUMO
Este artigo apresenta um estudo de caso sobre o primeiro ano de implementação da plataforma georreferenciada do DER-MG para monitoramento de pontos críticos em rodovias estaduais de Minas Gerais. A iniciativa surgiu da necessidade de aprimorar a resposta institucional a ocorrências que comprometem a trafegabilidade, especialmente em períodos chuvosos. A metodologia envolveu a análise de dados coletados em tempo real pelo aplicativo Survey123, integrado ao ArcGIS, com registros georreferenciados, status de trafegabilidade, imagens e prazos estimados. Esses dados alimentaram painéis gerenciais que subsidiaram análises quantitativas — número de registros, tempo médio de resolução e taxa de atendimento no período chuvoso — e qualitativas, a partir de reuniões técnicas e percepções institucionais. Os resultados demonstram ganhos em padronização, agilidade, transparência e integração com o Waze, apesar de desafios de conectividade e maturidade tecnológica regional. O estudo evidencia o potencial das soluções digitais na modernização da gestão viária orientada a dados.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente artigo resulta do projeto desenvolvido pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), como resposta à necessidade premente de monitorar e mitigar os impactos de pontos críticos que comprometem a circulação nas rodovias estaduais, especialmente em decorrência de eventos climáticos adversos. Em 2023, o DER-MG concebeu uma plataforma integrada baseada em georreferenciamento, capaz de registrar, monitorar e compartilhar em tempo real as ocorrências cadastradas nas rodovias estaduais. A solução implementada é baseada na plataforma ArcGIS e no aplicativo móvel Survey123, que permitem a coleta, sistematização e análise de dados georreferenciados sobre pontos críticos. O monitoramento em tempo real por meio de dashboards, aliado à integração com aplicativos de navegação como o Waze, fortalece a capacidade institucional de resposta a emergências, ao mesmo tempo em que subsidia ações preventivas e orienta o planejamento estratégico de intervenções. A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) potencializa o entendimento dos fenômenos espaciais relacionados à infraestrutura rodoviária, promovendo uma visão sistêmica e qualificada para a tomada de decisão.

Este trabalho tem como objetivo analisar os impactos e os resultados obtidos no primeiro ano de uso da ferramenta digital de monitoramento de pontos críticos que afetam ou podem afetar a trafegabilidade. Busca-se avaliar a efetividade da solução na gestão de ocorrências, os avanços institucionais promovidos, os principais desafios enfrentados e as lições aprendidas.

2. MÉTODO UTILIZADO

A metodologia se baseia na análise dos dados extraídos da plataforma de monitoramento georreferenciado de pontos críticos. A ferramenta é composta por um conjunto de formulários operacionais desenvolvidos em ambiente ArcGIS Survey123, que permitem o registro, a atualização e o acompanhamento das ocorrências em campo. Para ilustrar a metodologia empregada, a Figura 1 apresenta a interface da plataforma de cadastramento utilizada como base para o registro e acompanhamento dos pontos críticos.

A coleta de dados ocorre de forma contínua, por meio de dispositivos móveis, com ou sem acesso à internet, permitindo o preenchimento offline e a sincronização posterior com o banco de dados central. Os registros incluem localização georreferenciada, classificação da ocorrência, status da trafegabilidade, fase de solução (estudo, contratação, execução ou concluído), bem como imagens ilustrativas e estimativas de prazo de conclusão. A Figura 1 exibe a interface utilizada para o detalhamento da situação atual da via, permitindo o registro de informações cruciais sobre a ocorrência. Os dados coletados são automaticamente integrados ao ambiente ArcGIS, alimentando dashboards gerenciais que permitem a visualização em tempo real da situação das rodovias estaduais. Esse fluxo informacional garante que tanto as regionais quanto a sede do DER-MG possam adotar medidas imediatas de mitigação, seja por meio dos contratos locais de manutenção, seja por meio do acionamento de equipes especializadas para projetos de engenharia mais complexos. Além disso, existe também um dashboard público, que permite aos usuários das rodovias terem conhecimento e

acompanharem o andamento da resolução desses pontos críticos. A integração com sistemas de navegação, como o Waze, possibilita ainda, a emissão de alertas dinâmicos aos usuários das rodovias, promovendo maior segurança e transparência nas informações sobre as condições de trafegabilidade.

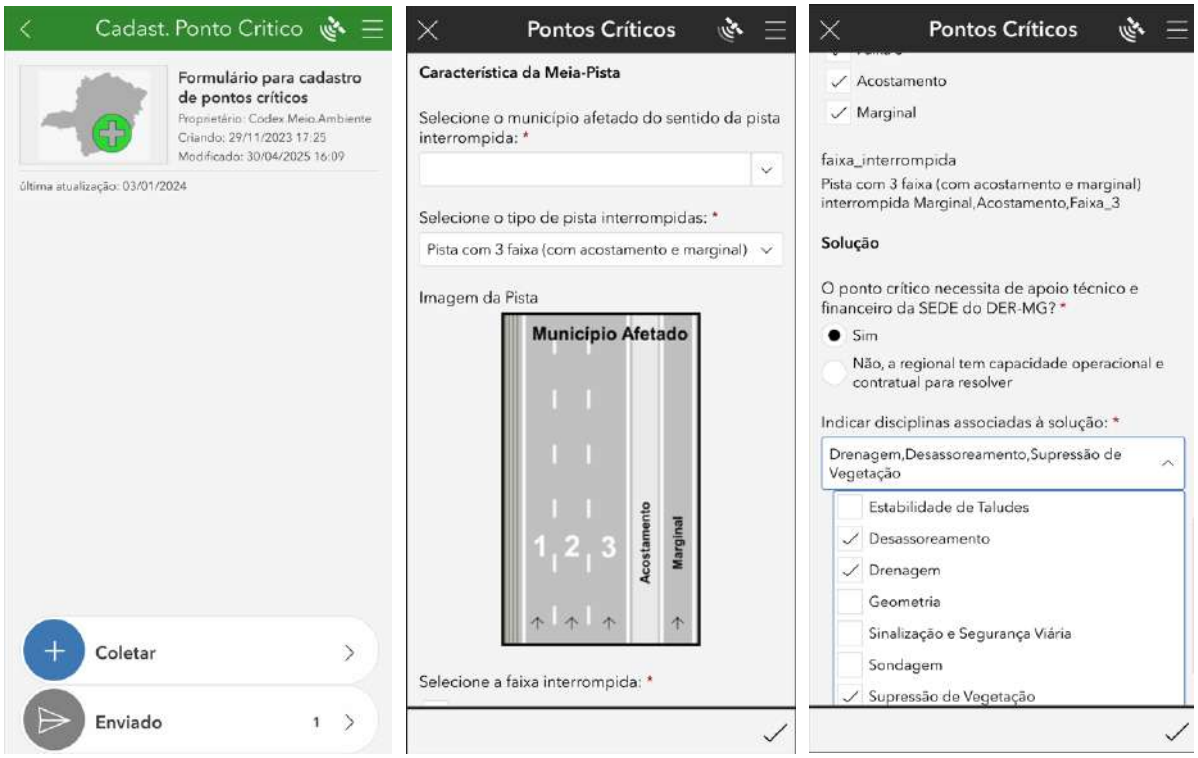


Figura 1: Interfaces do aplicativo para cadastro dos pontos críticos

A Figura 1, à direita, destaca outros campos contemplados no cadastro do ponto crítico, reforçando a abrangência e a profundidade das informações coletadas pela ferramenta, subsidiando tanto as ações imediatas quanto o planejamento estratégico das intervenções. A implantação da solução foi precedida de um processo de capacitação conduzido pela Assessoria de Gestão Estratégica do DER-MG, que, entre janeiro e fevereiro de 2024, treinou as equipes regionais e a Diretoria de Manutenção na utilização das ferramentas tecnológicas e na aplicação dos protocolos de coleta e classificação dos pontos críticos. Esses painéis foram a principal base de consulta para a quantificação dos resultados apresentados neste estudo. A Figura 2 apresenta o painel gerencial construído a partir dos dados cadastrados.

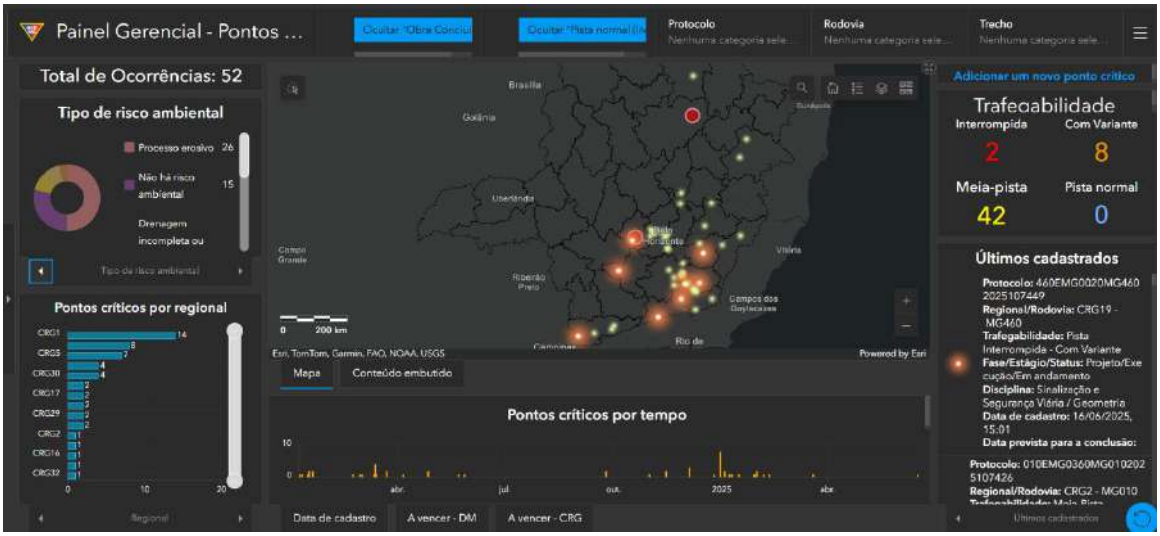


Figura 2: Painel gerencial a partir dos dados cadastrados

A análise qualitativa contou com o levantamento das percepções institucionais colhidas ao longo do ano, a partir de reuniões técnicas com coordenadores regionais, avaliações da equipe de gestão estratégica e relatórios de desempenho das funcionalidades do sistema. Os resultados quantitativos foram extraídos diretamente dos painéis, considerando o número total de pontos cadastrados, percentual de resoluções, tempo médio de atendimento e desempenho específico durante o período chuvoso de outubro/2024 a março/2025. Por fim, foi considerado o impacto da recente integração com o Waze, analisando seu potencial como recurso de segurança viária e comunicação em tempo real com os usuários da malha rodoviária.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Durante o primeiro ciclo completo de utilização da ferramenta, de abril de 2024 a junho de 2025, o registraram-se 604 pontos críticos nas rodovias estaduais. A Figura 3 apresenta o painel gerencial com a maior incidência dos pontos críticos nas regiões de serra como Espinhaço e Pico da Bandeira.

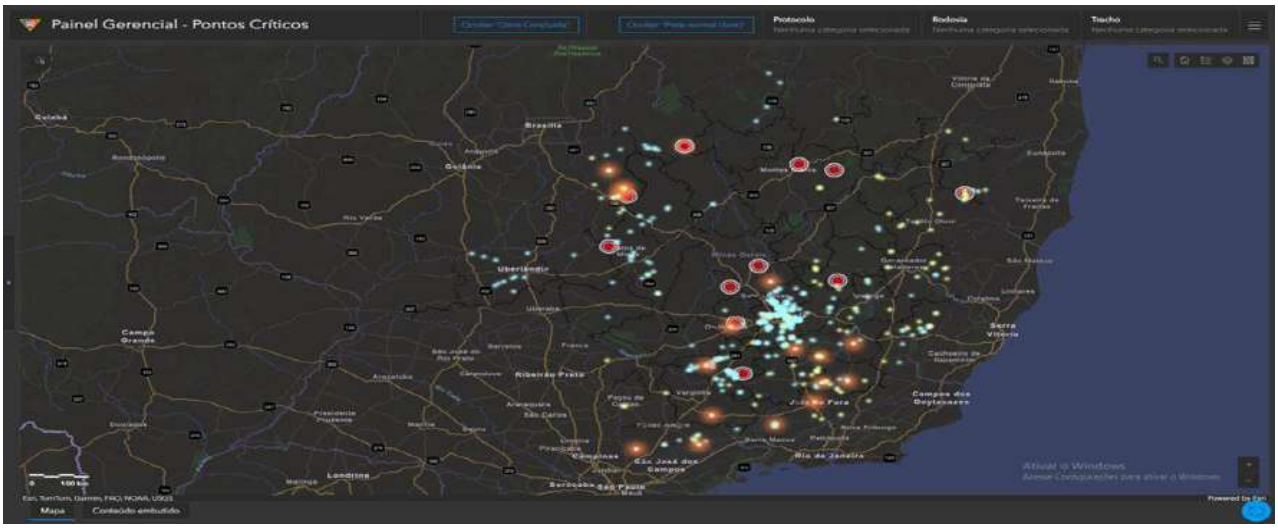


Figura 3: Painel Gerencial com a concentração dos pontos críticos nas regiões

Desse total, 197 registros foram concluídos, com um tempo médio de resolução de 3 meses, considerando as particularidades de cada caso, e tendo como principais causas a erosão de pista, rompimento/abatimento de aterro, abatimento de pista, obstrução de drenagem e danos na estrutura da OAE, incluindo as influências de fatores climáticos. O período chuvoso, de outubro de 2024 a março de 2025 concentrou 142 cadastros relacionados a ocorrências com impacto na trafegabilidade. Apesar das dificuldades naturais da estação, 64 desses casos já foram resolvidos, representando 45% de resolução até o momento.

Outro avanço significativo foi a parceria estratégica com a plataforma Waze, que permitiu o recebimento automatizado de alertas de acidentes, engarrafamentos, interdições e condições climáticas adversas, que podem ser estudados e correlacionados com as interrupções na trafegabilidade causadas pelos pontos críticos. A integração visa não apenas melhorar a experiência do usuário, mas salvar vidas e proteger o meio ambiente, mediante a difusão de alertas preventivos em tempo real. Essa ação reforça o compromisso da autarquia com a segurança viária, a proteção dos usuários e a modernização da gestão pública por meio de soluções digitais inovadoras.

Um dos principais desafios enfrentados no primeiro ano de uso foi a disponibilidade de conectividade nas áreas remotas das rodovias, o que limitou, em alguns momentos, a atualização em tempo real das informações de campo. A funcionalidade offline do aplicativo mitigou parcialmente essa limitação, permitindo que os dados fossem sincronizados posteriormente, mas situações pontuais de atraso na comunicação foram registradas, especialmente durante períodos críticos como o de chuvas intensas. Outro ponto a ser considerado é o nível de maturidade tecnológica e institucional entre as 40 URGs, que não é homogêneo. Apesar da boa adesão geral ao sistema, identificaram-se variações na frequência de uso, na qualidade dos dados inseridos e na agilidade de resposta, exigindo acompanhamento contínuo, reciclagem de capacitações e apoio mais próximo às unidades com menor domínio da nova tecnologia.
A ferramenta também não contempla, até o momento, acesso direto por empresas contratadas para execução

das obras de correção. Essa limitação restringe o fluxo de informações em tempo real entre o campo e as áreas técnicas, gerando maior dependência da atuação intermediária dos servidores regionais. A ampliação dos perfis de acesso, com controles específicos para contratadas, poderá otimizar a gestão dos contratos e a eficiência da fiscalização.

Apesar desses desafios, os ganhos institucionais e operacionais são evidentes. O sistema promoveu padronização de processos, aumento da transparência pública, celeridade na resposta às ocorrências e fortalecimento da cultura de gestão baseada em dados. O engajamento dos servidores ao longo da implantação contribuiu também para a formação de um ambiente colaborativo, com compartilhamento de experiências entre regionais e sugestões de melhoria contínua para o sistema. A recente integração com a plataforma Waze demonstrou o potencial da ferramenta não apenas como solução interna, mas como elemento de comunicação ativa com a sociedade, favorecendo a segurança viária por meio da disseminação de alertas automatizados. Essa iniciativa sinaliza uma mudança de paradigma no relacionamento entre a administração pública e os usuários da infraestrutura.

4. CONCLUSÕES

A experiência com a implantação de uma plataforma digital georreferenciada para monitoramento de pontos críticos relacionados à trafegabilidade nas rodovias, demonstra que a aplicação inteligente da tecnologia pode transformar de forma concreta a gestão da infraestrutura rodoviária. O primeiro ano de operação da ferramenta permitiu ganhos expressivos em agilidade, padronização, rastreabilidade e transparência. Os 604 pontos críticos cadastrados e os 197 solucionados em um prazo médio de três meses evidenciam a efetividade operacional do sistema. Além disso, a resolução de 45% das ocorrências registradas durante o período chuvoso de 2024/2025 mostra a capacidade de resposta mesmo em contextos adversos.

Mais do que os números, o estudo revelou impactos significativos na cultura institucional, no engajamento das unidades regionais, na participação do cidadão e na integração entre áreas técnicas e estratégicas. A ferramenta deixou de ser apenas um instrumento de registro para se tornar um elo dinâmico entre o campo, a gestão e a sociedade. Os desafios identificados, como a ausência de conectividade em alguns trechos, a maturidade digital desigual entre regionais e a limitação no acesso por contratadas não ofuscam o êxito do projeto, mas indicam caminhos claros para evolução. As ações previstas, como a integração com plataformas de mobilidade e o uso futuro de inteligência artificial, reforçam o compromisso do DER-MG com a melhoria contínua e a inovação pública.

Por fim, este estudo de caso se consolida como referência nacional na gestão de ativos rodoviários, demonstrando que soluções eficientes, sustentáveis e escaláveis são possíveis quando há alinhamento entre tecnologia, gestão e pessoas. Ao fortalecer sua capacidade de resposta e planejamento, o DER-MG dá um passo importante rumo a uma infraestrutura viária mais segura, inteligente e orientada ao cidadão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Radar CNT do Transporte – Pontos Críticos 2023. Brasília, 2024. Disponível em: https://cnt.org.br/documento/8f8896b9-3540-4a37-b6ad-c894a53a76ec. Acesso em: 26 jun. 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS (DER-MG). Painel Gerencial de Pontos Críticos. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: https://www.der.mg.gov.br. Acesso em: 20 jun. 2025.

Rodrigo Santos Colares (rodrigo.colares@der.mg.gov.br)
Anna Paula Lasafá Boaventura Neto (anna.lasafa@der.mg.gov.br)
Esther Ribeiro Júlio (esther.ribeiro@der.mg.gov.br)
Grasiele Fernanda Soares (grasiele.soares@der.mg.gov.br)
Letícia Gonçalves Costa Munhoz (leticia.munhoz@der.mg.gov.br)
Rodrigo Franklin Marques Silva (rodrigo.silva@der.mg.gov.br)
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, Assessoria de Gestão Estratégica, Sede Cidade Administrativa - Edifício Gerais, 5º Andar, Rodovia Papa João Paulo II, nº 4.001, Bairro Serra Verde, Belo Horizonte, MG, Brasil.

INTEGRAÇÃO DO WAZE NA GESTÃO DA MALHA VIÁRIA DE MINAS GERAIS

Clóvis Lemos Tavares, Rodrigo Santos Colares, Letícia Gonçalves Costa Munhoz, Thiago Barbosa Vaz, Rodrigo Franklin Marques Silva
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

RESUMO
Este artigo descreve a integração dos dados colaborativos do Waze ao sistema ArcGIS do Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), viabilizada por uma API do programa Waze Partner Hub, para criar painéis inteligentes que monitoram em tempo real as condições do tráfego e da malha estadual. A solução exibe, de forma georreferenciada, buracos, acidentes, congestionamentos, riscos de alagamento, alertas meteorológicos, pontos críticos e volume de tráfego. A correlação de alertas recorrentes com trechos problemáticos orienta intervenções preventivas, sobretudo em locais com sinistralidade ou degradação de pavimento. Durante o período chuvoso, notificações de alagamento evidenciam limitações de drenagem, subsidiando manutenção antecipada. O uso conjunto de dados e análises espaciais avançadas gera diagnósticos precisos, vigilância contínua e identificação de padrões geométricos, como curvas fechadas e inclinações, apoiando o planejamento de engenharia. Assim, a ferramenta aprimora a gestão da mobilidade, acelera respostas operacionais, otimiza recursos públicos e reforça a segurança viária.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho é resultado do projeto de desenvolvimento do Observatório de Infraestrutura pelo DER-MG, junto da busca da aprimoração do monitoramento do trânsito com recursos tecnológicos avançados. Nesse contexto, a plataforma colaborativa Waze disponibiliza dados em tempo real sobre ocorrências no sistema viário, que, combinados com soluções de geoprocessamento como o ArcGIS, podem gerar visões dinâmicas e interativas, denominadas aqui de painéis inteligentes. Conforme SMARZARO et al. (2021), que demonstram a importância na integração dos dados espaciais e modelos de dados para analisar resultados, o presente documento teve os seguintes objetivo específicos:

- Realizar a modelagem conceitual,
- Realizar a implementação de um observatório utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG),
- Auxiliar no monitoramento das rodovias do Estado de Minas Gerais.
- Criar painéis operacionais inteligentes com os dados, como painel de buracos (Figura 1) e painel de estradas fechadas (Figura 2)
- Centralizar as informações em painéis gerenciais específicos como o painel gerencial de engarrafamento (Figura 4)

Portanto este trabalho apresenta um resultado de integração de dados do Waze ao sistema de gestão do DER-MG, permitindo a implementação de painéis geográficos de controle que disponibilizam múltiplos indicadores de condições do trânsito e do ambiente, apoiando a tomada de decisão operacional e estratégica.

2. MÉTODO UTILIZADO

Para integrar os dados do Waze ao ArcGIS, uma plataforma geográfica, foi desenvolvido uma API (Application Programming Interface), que permite que os dados da plataforma do Waze se comuniquem com o ArcGIS, e por meio desse desenvolve-se mapas, dashboards, indicadores e gráficos, que demonstram as ocorrências cadastradas no Waze, e que por meio da sobreposição da camada de rodovias do estado de Minas Gerais, possa observar correlações entre as ocorrências, e áreas que possuem maior número dessas.

Os dados do Waze são obtidos a partir de um programa Waze Partner Hub através de API disponível nesta parceria estratégica. Essas informações incluem: acidentes, congestionamentos, buracos na pista, riscos de alagamento, eventos meteorológicos adversos e outros alertas relevantes. Para garantir a confiabilidade, os dados passam por processos de validação e filtragem, além de serem enriquecidos com informações adicionais provenientes de relatórios do próprio DER-MG e outras instituições estaduais. Utilizando scripts em Python e ferramentas de ETL (*Extract, Transform, Load*), os dados do Waze são estruturados, categorizados por tipo de ocorrência, georreferenciados e armazenados em bancos de dados espaciais compatíveis com a plataforma ArcGIS (como GeoDatabase ou servidores GIS). No âmbito da parceria estabelecida com o Waze, é provido acesso a dados em tempo real, possibilitando a atualização das informações de alertas a cada 15 minutos (Waze, 2024).

Paralelamente ao uso dos dados em tempo real, o DER-MG também realiza a integração da série histórica

disponibilizada pelo Waze, que abrange os últimos cinco anos de registros. Todo esse acervo é incorporado ao Data Lake institucional por meio de scripts automatizados, que garantem a ingestão diária dos dados recém-coletados. Assim, os dados em tempo real transformam-se continuamente em séries históricas, fortalecendo a base analítica da instituição. A integração se dá por meio da API REST do ArcGIS, permitindo que os dados processados sejam exibidos em mapas interativos, com camadas dinâmicas de ocorrências. Esses painéis, indicadores e relatórios compõem os principais elementos visuais de apoio à tomada de decisão, consolidados no Observatório de Infraestrutura do DER-MG.

3. RESULTADOS OBTIDOS

O uso de ferramentas de geoprocessamento permite ir além da simples visualização: possibilita, por exemplo, a identificação do ângulo de curvas com base na correlação com os alertas de acidentes, revelando padrões recorrentes em trechos sinuosos. Além disso, o sistema é capaz de mapear a inclinação longitudinal das vias, o que contribui para a identificação de trechos onde a declividade está associada ao aumento da incidência de acidentes, especialmente quando cruzada com informações sobre o horário das ocorrências. Essas análises espaciais aprofundam o entendimento das dinâmicas rodoviárias e subsidiam ações mais eficazes de engenharia, sinalização e segurança viária.

Nos painéis do observatório, diferentes componentes visuais representam os indicadores estratégicos



Figura 1: Painel de Buracos na malha rodoviária estadual



Figura 2: Painel de Estradas Fechadas na malha rodoviária estadual



Figura 3: Painel de engarrafamento e painel de precipitação acumulada

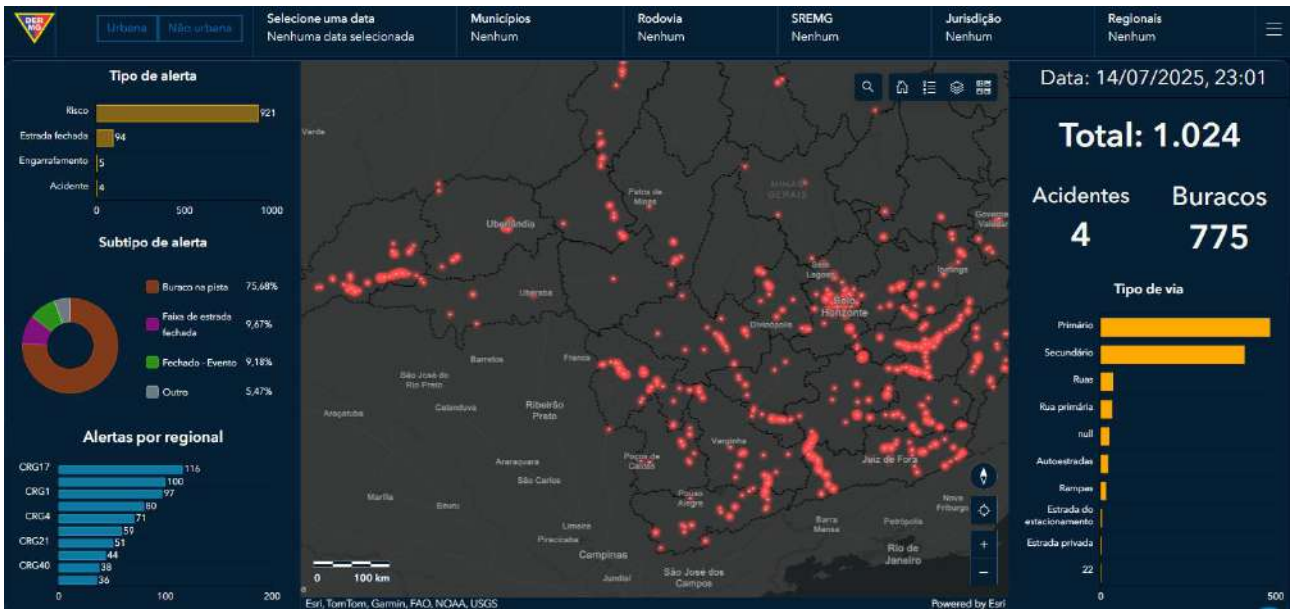


Figura 4: Painel Gerencial de Engarrafamento

Atualmente, as informações enviadas pelo Waze são atualizadas a cada 15 minutos e automaticamente absorvidas por scripts desenvolvidos em Python, que estruturam, georreferenciam e armazenam os dados em bancos espaciais compatíveis com o ArcGIS. Esse fluxo contínuo, integrado ao Data Lake institucional, permite que os dados em tempo real sejam convertidos, diariamente, em séries históricas. Essa automação é fundamental para que os painéis inteligentes desenvolvidos pelo DER-MG possam oferecer, simultaneamente, uma visão operacional atualizada e uma base analítica robusta para decisões de médio e longo prazo.

Do ponto de vista prático, os benefícios são expressivos. A identificação em tempo real de buracos nas rodovias possibilita que as 40 Regionais do DER-MG, cada uma responsável pela gestão contratual de aproximadamente 500 km de vias, acionem de forma imediata as empresas responsáveis por serviços de conservação e manutenção. Esses alertas também poderão ser utilizados como evidência para glosas nas medições mensais dos contratos, quando constatado o descumprimento de metas operacionais. A confiabilidade dos dados fornecidos pela plataforma, associada à frequência de atualização e à geolocalização precisa dos eventos, transforma os painéis em instrumentos formais de apoio à fiscalização contratual.

4. CONCLUSÕES

A análise espacial de acidentes, viabilizada pelo cruzamento das informações do Waze com os boletins de ocorrência da segurança pública, permite a identificação de *hotspots* de sinistros, com isso teremos a identificação de trechos com alta reincidência. Esses pontos podem ser priorizados em investigações técnicas e vistorias de campo, subsidiando estudos de engenharia de segurança viária. Essa abordagem contribui para a implementação de soluções corretivas mais eficientes, como readequações geométricas, reforço de sinalização e aplicação de dispositivos de redução de velocidade. Mais do que detectar problemas, os dados permitem avaliar, em perspectiva temporal, a efetividade das intervenções realizadas, com base na comparação entre os cenários anteriores e posteriores à sua implementação.

Outro aspecto de destaque diz respeito ao monitoramento de pontos de alagamento, os quais historicamente apresentavam baixa rastreabilidade por parte das equipes técnicas, especialmente durante os períodos de chuva. A partir da coleta de dados do Waze, tornou-se possível mapear esses locais com maior precisão, mesmo que o evento ocorra de forma episódica. Essa capacidade permite solicitar às empresas contratadas que realizem a inspeção e a manutenção corretiva nos dispositivos de drenagem localizados nesses trechos. Muitas vezes, as falhas decorrem de obstruções por resíduos, subdimensionamento de projeto ou colapso estrutural dos dispositivos, exigindo intervenções de natureza diversa. Ao integrar essas informações aos sistemas de manutenção, o DER-MG fortalece a segurança viária e reduz o risco de aquaplanagem e incidentes associados.

A identificação de congestionamentos também constitui uma dimensão estratégica da parceria com o Waze. A recorrência de engarrafamentos em determinados trechos é um forte indicativo de falhas na fluidez operacional da via. A utilização sistemática dos dados de congestionamento permite, assim, a elaboração de diagnósticos mais precisos, orientando o desenvolvimento de projetos de ampliação de capacidade ou requalificação funcional de trechos críticos. Essa análise pode também apoiar a decisão de implantar sistemas de videomonitoramento com inteligência artificial, voltados à fiscalização automatizada de infrações e à promoção de comportamentos mais seguros por parte dos condutores.

Por fim, os painéis gerenciais integrados ao ArcGIS, permitem ranquear pontos críticos com base em múltiplos critérios, como frequência de eventos, gravidade das ocorrências e impacto sobre o tráfego, e direcionar os investimentos públicos de forma mais eficiente e fundamentada.

Apesar dos avanços promovidos pela integração dos dados do Waze, observa-se uma disparidade significativa na distribuição espacial das notificações ao longo das diferentes mesorregiões do estado. Esse fenômeno está diretamente relacionado à natureza da plataforma, que é baseada na colaboração voluntária de usuários e depende do acesso à internet móvel. Como se trata de uma ferramenta de mercado, seu uso é mais comum em áreas com maior densidade populacional e cobertura de rede, como a Região Metropolitana de Belo Horizonte, em contraste com regiões como o Norte de Minas, onde o número de usuários ativos é substancialmente menor. Essa desigualdade na origem dos dados pode limitar a representatividade das informações em determinadas áreas, comprometendo, em parte, a equidade territorial das ações de gestão baseadas nesses indicadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CÂMARA, Gilberto; MEDEIROS, José S. Princípios básicos em Geoprocessamento. In: ASSAD, Eduardo D.; SANO, Edson E. Sistemas de Informações Geográficas. Aplicações na agricultura. 2. ed. Brasília: Embrapa, 1998. 434 p. 3-11.

Waze (2024) Waze Partner Hub – API Reference. Disponível em: https://developers.google.com/wazepartnerhub (acesso em 15/07/2025)

SMARZARO, R., DAVIS Jr, C. A., & QUINTANILHA, J. A. (2021). Creation of a multimodal urban transportation network through spatial data integration from authoritative and crowdsourced data. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(7), 470.

Clovis Lemos Tavares (clovis.tavares@der.mg.gov.br)
Thiago Barbosa Vaz (thiago.vaz@der.mg.gov.br)
Letícia Costa Gonçalves Munhoz (leticia.munhoz@der.mg.gov.br)
Rodrigo Franklin Marques Silva (rodrigo.silva@der.mg.gov.br)
Rodrigo Santos Colares (rodrigo.colares@der.mg.gov.br)
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, Assessoria Estratégica, Rodovia Papa João Paulo II, nº 4.001, Edifício Gerais, 5º andar, Serra Verde, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Gestão e modelagem da Segurança Viária

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

DESENVOLVIMENTO DE UM FRAMEWORK PARA PONDERAÇÃO DAS METODOLOGIAS IRAP, HSM E DENATRAN NA IDENTIFICAÇÃO DE LOCAIS CRÍTICOS

George Miguel Farha Diban[1], **Barbara Stolte Bezerra**[1], **Rogério Lemos Ribeiro**[2]
[1]Universidade Estadual Paulista (UNESP), [2]Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

RESUMO
Esta pesquisa visa propor um *framework* para estabelecer a ponderação de variáveis e calibrações ajustáveis, visando aprimorar a identificação de locais críticos em rodovias e desenvolver contramedidas para reduzir sinistros de trânsito. O *framework* permitirá comparar os métodos iRAP, HSM e DENATRAN, integrando abordagens de infraestrutura do iRAP, de predição estatística do HSM e de severidade do DENATRAN. O iRAP realiza a classificação por estrelas a partir de variáveis rodoviárias, como largura de pista e presença de obstáculos. O HSM estima a frequência de sinistros em um trecho através de equações preditivas baseadas no volume diário médio anual, características da rodovia e histórico de sinistros. O DENATRAN emprega um índice de severidade, calculado pela soma dos sinistros, ponderados pela gravidade. Espera-se que a integração dessas variáveis no *framework* permita identificar trechos críticos com maior confiabilidade, subsidiar intervenções viárias e indicar o método mais prático e aplicável à realidade brasileira.

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão da malha rodoviária, o Brasil precisou adaptar-se a esse modo de transporte, elaborando leis e desenvolvendo estudos para melhor atender às novas demandas. O principal órgão responsável por essas adaptações foi o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), posteriormente substituído pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), atualmente responsável pelos sistemas de transporte rodoviário, aquaviário e ferroviário do Brasil (DNIT, 2009).

Os sinistros de trânsito no Brasil são um tema debatido há anos, mas as ações voltadas à prevenção e à redução desses eventos não têm apresentado avanços significativos. Segundo dados da Polícia Rodoviária Federal (PRF, 2024), o país registrou uma média de 65.571 sinistros nos últimos cinco anos, um número que se mantém estável, porém elevado. Além disso, o número de mortes continua a crescer anualmente. O *Highway Safety Manual* (HSM) é amplamente utilizado por engenheiros de transportes norte-americanos devido à sua metodologia padronizada e à base sólida de dados históricos de sinistros. Permite adaptações conforme as características específicas de cada rodovia e região. Contudo, sua dependência de dados históricos pode não refletir as condições atuais das rodovias brasileiras, e sua metodologia complexa pode dificultar sua aplicação em alguns contextos (AASHTO, 2010).

O método do DENATRAN, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Trânsito, apresenta uma metodologia simples e de fácil aplicação. Utiliza dados oficiais e atualizados, permitindo a identificação rápida de locais críticos e a implementação ágil de medidas de segurança. No entanto, sua abordagem menos abrangente não considera todos os fatores que influenciam a segurança viária, como a infraestrutura da rodovia, o comportamento dos usuários e as condições ambientais (FERRAZ et al., 2012).

O método do iRAP, *International Road Assessment Programme*, recentemente implementado pelas concessionárias federais brasileiras, adota uma abordagem proativa que considera diversos fatores para avaliar o potencial de sinistros nos trechos analisados. Utiliza uma metodologia padronizada e fornece informações para a priorização de investimentos em medidas de segurança viária. Entretanto, apresenta desvantagens, como a desconsideração do contexto local (como fatores socioeconômicos e culturais), a necessidade de dados atualizados e precisos, a complexidade de sua metodologia e o custo elevado, que pode representar uma limitação em determinados contextos (IRAP, 2020).

Evidencia-se que a diferença de abordagem entre o iRAP e os métodos do DENATRAN e do HSM torna necessária a compreensão da relação entre a avaliação da infraestrutura viária e a análise de registros de sinistros. Tal compreensão é fundamental para explorar as complementaridades entre os métodos, uma vez que pesquisas preliminares no contexto brasileiro indicam que os trechos com menor classificação em estrelas pelo iRAP nem sempre coincidem com aqueles de maior incidência de sinistros viários, o que reforça a importância de avançar na solução dessa divergência de abordagem a fim de subsidiar a tomada de decisão e orientar investimentos mais eficazes para a redução dos sinistros de trânsito.

A utilização de múltiplos métodos é essencial para obter resultados robustos, embora envolva desafios operacionais. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um *framework* que integre os três métodos anteriormente mencionados: iRAP, DENATRAN e HSM, com ponderação de variáveis. Essa proposta permitirá uma identificação mais precisa de locais críticos nas rodovias brasileiras, facilitando a seleção de contramedidas eficazes, otimizando a alocação dos escassos recursos públicos e contribuindo para

a redução do número de mortos e feridos no trânsito. A proposta do *framework* visa combinar diferentes abordagens de análise da segurança viária, oferecendo uma maior amplitude de alternativas na tomada de decisão para intervenções viárias e mitigação de sinistros nos trechos estudados. Além disso, na eventual indisponibilidade de dados que inviabilizem a aplicação integral de um dos três métodos, o *framework* proposto pode funcionar como alternativa complementar, suprindo essa lacuna e garantindo a continuidade da análise de segurança viária.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

Na primeira etapa, ocorrerá o levantamento e a coleta de dados necessários para o prosseguimento da pesquisa. Esses dados serão obtidos através de concessionárias de rodovias, dados abertos de rodovias federais e questionários para análise multicritério. Antes de serem utilizados, os dados serão validados utilizando técnicas específicas. As etapas dois, três e quatro abordarão as metodologias individualmente. No método iRAP, o levantamento viário será realizado, a rodovia será codificada, a classificação por estrelas será aplicada, contramedidas serão implementadas e as medidas serão avaliadas. Dados de trechos de 100 metros obtidos por fotografias georreferenciadas serão utilizados para codificar a rodovia, classificando-a por estrelas para diferentes tipos de usuários (ocupantes de veículos, pedestres, ciclistas e motociclistas).

No método HSM, fórmulas serão aplicadas utilizando fatores de modificação de colisão (CMFs) e calibração dos modelos (Cr) para obter a previsão de sinistros. No método DENATRAN, o cálculo da taxa de severidade será feito em duas partes: obtenção da Unidade Padrão de Severidade (UPS) e aplicação da UPS com base no Volume Diário Médio (VDM), extensão do trecho em quilômetros e período de estudo em dias.

Após a aplicação dos três métodos aos mesmos trechos, a última etapa tratará da ponderação entre eles. Software para análise estatística e multicritério será utilizado para definir o peso de cada variável no modelo matemático. Para auxiliar na tomada de decisão, um painel de especialistas será formado para ordenar os critérios baseados na influência dos sinistros de trânsito. Engenheiros de segurança viária, docentes e pesquisadores acadêmicos, e especialistas em áreas ambientais serão selecionados para considerar impactos nas rodovias e seu entorno, incluindo meio ambiente e sustentabilidade.

Por fim, o framework será construído com base nos critérios ponderados e testes serão realizados para verificar sua aplicabilidade e veracidade.

Em complemento, serão aplicadas técnicas estatísticas de análise multivariada, como a análise de agrupamentos (análise cluster), com o objetivo de verificar a consistência dos resultados obtidos e identificar padrões entre os trechos viários avaliados. Essa etapa visa reforçar a robustez do modelo e validar empiricamente as variáveis consideradas mais relevantes.

As implantações sugeridas e as contramedidas indicadas servirão para avaliar a qualidade do framework. Ao final, espera-se que o framework proporcione uma identificação mais precisa de locais críticos, ajudando na escolha de medidas eficazes para reduzir e prevenir sinistros de trânsito, otimizando a alocação de recursos públicos e mitigando o número de feridos e mortos no trânsito.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar as principais variáveis que influenciam a segurança viária, especialmente no que se refere à ocorrência e à severidade dos sinistros em rodovias. A busca resultou em 35 artigos relevantes, nos quais se destacam como variáveis mais recorrentes: o Volume Diário Médio Anual (VDMA), a largura das faixas de rolamento, a largura dos acostamentos e do canteiro central, o número de faixas, a velocidade regulamentada, além da presença de iluminação e de dispositivos de fiscalização, como radares.

Em seguida, essas variáveis foram comparadas com aquelas consideradas nos três principais métodos de avaliação da segurança viária: o *Highway Safety Manual* (HSM), o modelo do DENATRAN e o método do iRAP. Foram também incorporadas outras variáveis identificadas na literatura por sua relevância para o tema.

Paralelamente, foi realizada a classificação de um trecho viário com base nas três metodologias citadas (HSM, DENATRAN e iRAP), considerando dados do período de 2017 a 2024. Os dados utilizados para essa classificação foram provenientes de estudos anteriores realizados pelo autor. Para complementar outras informações e características da rodovia, foram utilizadas bases de dados abertos disponibilizadas pela ARTESP e pelo DNIT. Essa análise temporal tem como objetivo oferecer uma visão mais abrangente da evolução da criticidade do trecho ao longo dos anos, bem como mitigar possíveis distorções nos dados decorrentes da pandemia da COVID-19. A classificação do trecho no sentido norte e sul, através da metodologia iRAP pode ser vista nas Figuras 1 e 2, respectivamente.



Figura 1: Classificação iRAP do trecho – sentido Norte. (Fonte: Autor)



Figura 2: Classificação iRAP do trecho – sentido Sul. (Fonte: Autor)

O próximo passo da pesquisa será elaborar um questionário contendo 40 variáveis, que será encaminhado a um painel de especialistas. O objetivo é avaliar a importância de cada variável na identificação de trechos críticos e, simultaneamente, verificar o grau de dificuldade para sua coleta. Essa análise é fundamental para selecionar variáveis que, além de relevantes, sejam de fácil obtenção e quantificação.

Com base nos resultados desse primeiro questionário, será elaborado um segundo instrumento, mais refinado, com as variáveis previamente filtradas. Essa nova rodada permitirá a ponderação dos critérios validados, viabilizando a construção de um modelo mais objetivo e aplicável à realidade das rodovias brasileiras. A ponderação dos critérios validados será realizada por meio de uma abordagem de análise multicritério, utilizando o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

4. CONCLUSÕES INICIAIS

A análise dos dados e a aplicação do *framework* a ser desenvolvido visam integrar diferentes métodos de avaliação, de modo a subsidiar a identificação de trechos críticos e apoiar a tomada de decisão sobre contramedidas de rápida implementação para a redução de sinistros. Para refinar as estimativas e ampliar a precisão das análises, será empregada a abordagem Empírica de Bayes (EB), inclusive na calibração de modelos multivariados de predição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. HSM – *Highway Safety Manual*. (2010) 1a ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.

FERRAZ, A. C. P. *et. al*. (2012) *Segurança viária*. São Carlos/SP: Suprema Gráfica Editora.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2009) *Elaboração de Ações Preventivas e Corretivas de Segurança Rodoviária, por meio de Identificação e Mapeamento dos Segmentos Críticos da Malha Viária*.

IRAP. International Road Assessment Programme. (2020) *Manual de Codificação de Vias do IRAP*. Inglaterra, 101p.

George Miguel Farha Diban (george.diban@unesp.br)
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia de Produção
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Núcleo Res. Pres. Geisel, Bauru – SP, Brasil
Barbara Stolte Bezerra (barbara.bezerra@unesp.br)
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia de Produção
Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Núcleo Res. Pres. Geisel, Bauru – SP, Brasil
Rogério Lemos Ribeiro (rogerio.ribeiro@ufu.br)
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil.
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Uberlândia – MG, Brasil

DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO AUTOMATIZADO PARA ANÁLISE DE CONFLITOS DE TRÁFEGO: APLICAÇÃO EM ROTATÓRIA URBANA DE RIO VERDE – GO

Deborah de Oliveira Medeiros Freitas[1], **Philippe Barbosa Silva**[1], **Daniela Cabral Oliveira**[2]
[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, [2]Universidade de Rio Verde.

RESUMO
Este estudo tem como objetivo desenvolver um instrumento automatizado para análise de conflitos de tráfego em ambientes urbanos, com foco em rotatórias. O método adotado baseia-se na aplicação de visão computacional a vídeos captados por drones, utilizando algoritmos para detectar, rastrear e classificar veículos. A partir das trajetórias extraídas, são calculadas duas métricas substitutivas de segurança viária: o *Post-Encroachment Time* (PET) e o *gap* crítico. Os dados são organizados automaticamente em planilhas técnicas, permitindo análises objetivas. Os resultados preliminares indicam a predominância de situações seguras na rotatória analisada, mas também evidenciam ocorrências de risco moderado, sugerindo pontos de atenção. Esses achados demonstram o potencial da ferramenta para apoiar decisões técnicas na engenharia de tráfego e contribuir com ações preventivas. A solução mostra-se promissora para promover uma mobilidade mais segura, eficiente e baseada em dados reais.

Palavras-chave: Visão computacional; Segurança viária; Análise de conflitos; PET; *Gap* crítico.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

A segurança viária no Brasil é majoritariamente avaliada por meio de registros históricos de acidentes, metodologia que, além de reativa, sofre com a subnotificação de eventos, especialmente os de menor gravidade. Esse cenário compromete a eficácia do planejamento urbano e reforça a necessidade de métodos proativos de diagnóstico. Nesse contexto, as métricas substitutivas de segurança (*Surrogate Safety Measures* – SSMs), como o *Post-Encroachment Time* (PET) e o *gap* crítico, apresentam-se como alternativas eficazes para identificar situações de risco antes da ocorrência efetiva de acidentes (Hyden, 1987; Brilon et al., 1997), oferecendo indicadores quantitativos de potenciais conflitos a partir da observação do comportamento veicular.

O objetivo principal deste projeto é criar um instrumento automatizado baseado em visão computacional que seja eficiente para identificação e análise de conflitos de tráfego em vias urbanas, com aplicação em Rio Verde (GO), através de imagens aéreas. Os objetivos específicos do projeto incluem: i) desenvolver uma arquitetura de *software* escalável, eficiente e adaptável a diferentes cenários urbanos; ii) implementar módulos robustos para contagem classificada de veículos e cálculo preciso do PET, utilizando algoritmos propícios em visão computacional; iii) analisar detalhadamente os conflitos identificados em um estudo de caso abrangente, buscando compreender os fatores contribuintes e padrões recorrentes de risco; iv) estabelecer diretrizes para a aplicação do sistema em diferentes contextos urbanos, considerando variações de layout e fluxo de tráfego.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As métricas substitutivas de segurança viária (SSMs), como o *Post-Encroachment Time* (PET) e o *gap* crítico, têm se consolidado em pesquisas internacionais como ferramentas eficazes para avaliação proativa da segurança no tráfego (Hu et al., 2023; Bhavsar et al., 2025). Em vez de esperar que acidentes ocorram, essas métricas permitem identificar padrões de risco a partir das interações entre veículos. O PET mede o intervalo de tempo entre a saída de um veículo de uma área de conflito e a entrada de outro (Hyden, 1987), sendo valores reduzidos indicativos de maior risco. Já o *gap* crítico corresponde ao menor intervalo aceito pelos condutores para cruzar ou ingressar em um fluxo contínuo (Raff, 1950; Troutbeck, 1992). O avanço das técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina ampliou a aplicação dessas métricas, permitindo análises automatizadas de vídeos de tráfego. Modelos como o YOLOv8 destacam-se pela alta precisão na detecção de veículos, enquanto algoritmos de rastreamento, como o SORT, possibilitam a reconstrução de trajetórias mesmo em cenários urbanos densos (Ventura et al., 2025). Essa integração viabiliza diagnósticos em tempo quase real e com maior objetividade. Contudo, a realidade brasileira apresenta especificidades que diferem dos contextos mais explorados pela literatura internacional. Entre elas, destacam-se a heterogeneidade da frota, marcada pela elevada presença de motocicletas e veículos pesados, a subnotificação de acidentes, e a variabilidade na sinalização e fiscalização em áreas urbanas. Pesquisas nacionais já apontam a necessidade de adaptar e validar métricas como o PET e o *gap* crítico para o tráfego brasileiro, caracterizado por fluxos mistos e decisões mais arriscadas dos condutores. Nesse sentido, o presente estudo contribui ao aplicar e avaliar essas

métricas em uma rotatória urbana de médio porte, representativa da realidade viária nacional.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos da pesquisa, foram adotadas etapas metodológicas organizadas em quatro fases principais: (i) fundamentação teórica; (ii) coleta de dados; (iii) processamento computacional; e (iv) análise dos resultados.

Na fundamentação teórica, inicialmente foi realizada uma revisão de literatura abrangente sobre segurança viária, métricas substitutivas e técnicas de visão computacional. Esse levantamento permitiu identificar lacunas metodológicas entre estudos internacionais e o contexto brasileiro, orientando a escolha das métricas e ferramentas adotadas.

Na etapa de coleta de dados, concentrou-se em uma rotatória urbana de Rio Verde (GO), selecionada por seu elevado volume de tráfego e relevância estratégica na malha viária municipal. A captação foi realizada por meio de um drone (DJI Mavic Air 2), autorizado conforme normas da ANAC, posicionado em altura média de 40 metros. As gravações ocorreram em diferentes horários do dia (manhã, almoço e tarde), totalizando cerca de 45 minutos de vídeo bruto, em resolução 4K e taxa de 30 fps, com câmera orientada na posição vertical.

No processamento computacional os vídeos foram processados em ambiente Python, por meio de um pipeline que integra algoritmos de detecção e rastreamento de veículos. A arquitetura YOLOv8 foi escolhida pela sua alta precisão em cenários urbanos densos, enquanto o SORT foi aplicado para o rastreamento robusto das trajetórias, mesmo em situações de oclusão parcial. Essa combinação assegurou a classificação automática dos veículos por tipo (carros, motocicletas, caminhões/ônibus) e a reconstrução das trajetórias. A partir das trajetórias, foram calculadas automaticamente as métricas SSMs: PET e o *gap* crítico, além da contagem classificada. Os dados processados foram armazenados em planilhas.

Na análise e integração, além do pipeline local, foi desenvolvida uma aplicação web com arquitetura baseada em Spring Boot (*backend*) e Vue.js (*frontend*), hospedada em ambiente de nuvem (AWS). Essa plataforma possibilita o acesso aos resultados e oferece uma interface interativa para gestores públicos e pesquisadores, ampliando o potencial de aplicação prática da ferramenta.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

O sistema foi treinado a partir de uma base de 280 imagens anotadas manualmente, contendo 1.210 instâncias de veículos (automóveis, motocicletas e caminhões/ônibus). A divisão seguiu a proporção 70% treinamento, 20% validação e 10% teste. O modelo YOLOv8 alcançou mAP@50 de 91,3% e *IoU* médio superior a 0,80, demonstrando robustez na detecção mesmo em condições de tráfego intenso e com diferentes tipos veiculares. O rastreamento realizado com o SORT manteve consistência das trajetórias, com taxa de perda inferior a 5%. Esses indicadores asseguraram que o sistema fosse capaz de realizar a detecção e rastreamento com acurácia superior a 90%, garantindo confiabilidade para o cálculo das métricas substitutivas.

Além disso, objetivemos resultados das métricas geradas em planilhas com os vídeos processados. A contagem classificada: o sistema identificou automaticamente 894 automóveis, 216 motocicletas e 74 caminhões/ônibus, consolidando a distribuição do tráfego e fornecendo dados organizados por tipo de veículo e velocidades médias. O PET: foram registradas 160 interações em áreas de conflito. Destas, 62,5% apresentaram PET > 3 s (seguras), 37,5% entre 1,5 s a 3 s (risco moderado) e nenhuma abaixo de 1,5 s (alto risco). O *gap* crítico: o tempo médio de aceitação de *gaps* pelos condutores variou entre 2,5 s a 3,2 s, valor inferior aos relatados em contextos europeus (3,5 s a 4,5 s), indicando comportamento mais arriscado no cenário brasileiro. Esses resultados reforçam a viabilidade do sistema e sua contribuição para a análise proativa da segurança viária, ao fornecer dados objetivos e replicáveis para subsidiar o planejamento urbano. E embora a rotatória apresente condições predominantemente seguras, há situações críticas ligadas à fluidez e ao comportamento de tomada de decisão dos condutores. Comparativamente a estudos internacionais, observa-se que a elevada presença de veículos pesados e motocicletas no tráfego brasileiro altera o padrão das interações, reforçando a importância de pesquisas contextualizadas. Além disso, a classificação automática por tipo veicular e a geração de planilhas estruturadas demonstraram o potencial de integração do sistema a processos de gestão pública.

5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar dos avanços, destacam-se limitações: (i) base de dados restrita (~45 minutos de gravação), inferior ao recomendado para robustez estatística; (ii) dificuldades na classificação de motocicletas, devido a semelhanças visuais com bicicletas; (iii) exclusão de pedestres e ciclistas do escopo; (iv) influência de variáveis externas, como iluminação e clima. Essas limitações não comprometem a viabilidade do sistema, mas indicam a necessidade de ampliação da base empírica e aprimoramento dos algoritmos em estudos futuros.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos confirmam o potencial da visão computacional como ferramenta para a análise de conflitos viários no Brasil, evidenciando sua capacidade de oferecer diagnósticos proativos, objetivos e replicáveis que podem subsidiar políticas públicas de mobilidade. O *software* demonstrou relevância ao adaptar técnicas consolidadas internacionalmente às particularidades do contexto brasileiro, marcado pela heterogeneidade da frota, pela elevada presença de motocicletas e pelas variações de sinalização e fiscalização. Além disso, a escolha metodológica das ferramentas utilizadas, em especial o YOLOv8 para detecção e o SORT para rastreamento, mostrou-se tecnicamente fundamentada, assegurando robustez e confiabilidade na extração de trajetórias e no cálculo das métricas substitutivas. Outro ponto de destaque foi o reconhecimento explícito das limitações do estudo, o que reforça o rigor científico do trabalho e indica caminhos consistentes para aprimoramentos futuros. Nesse sentido, este estudo contribui para o avanço da engenharia de tráfego ao propor uma solução de baixo custo, escalável e de aplicação imediata em cenários urbanos nacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHAVSAR, Y. M.; FULANO, S.; VENTURA, R. Evaluating defensive driving behaviour based on safe distance between vehicles: A case study using computer vision on UAV videos at urban roundabout. *Multimodal Transportation*, 2025. DOI: 10.1016/j.multra.2025.100227.

BRILON, W.; WU, N.; BONDZIO, L. Unsignalized intersections in Germany – A state of the art 1997. In: *International Symposium on Highway Capacity*, 1997, Maui. *Proceedings*. Washington, DC: Transportation Research Board, 1997.

HU, Y.; ZHANG, Y.; WANG, J.; LI, X. A high-resolution trajectory data driven method for real-time evaluation of traffic safety. *Accident Analysis & Prevention*, v. 180, p. 106974, 2023. DOI: 10.1016/j.aap.2023.106974.

HYDEN, C. The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. *Bulletin Lund Institute of Technology*, n. 70, 1987.

MAHMUD, S. M. S.; FULANO, A. N.; SICRANO, B. C. Application of surrogate safety measures for evaluating safety of road facilities. *Accident Analysis & Prevention*, v. 99, p. 27–39, 2017. DOI: 10.1016/j.aap.2016.11.005.

RAFF, M. S. A volume warrant for urban stop signs. *Highway Research Board Proceedings*, 1950.

SAYED, T.; ZEIN, S. Traffic conflict standards for intersections. *Transportation Research Record*, n. 1674, p. 99–106, 1999.

SHAWKY, M.; AHMED, M.; HASSAN, A. Applying drone-based video analysis for evaluating traffic conflicts at roundabouts: Evidence from Egypt. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2023.

TROUTBECK, R. J. Estimating the critical gap. *Australian Road Research Board Proceedings*, 1992.

VENTURA, R.; BHAVSAR, Y. M.; FULANO, S. Using computer vision and street-level videos for pedestrian-vehicle tracking and behaviour analysis. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 30, p. 101366, 2025. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101366.

ZHU, X.; LI, J.; WANG, H. Advances in YOLO object detection models for real-time traffic applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024.

Deborah de Oliveira Medeiros Freitas (dbrhmedeiros@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, Rio Verde, GO, Brasil
Philippe Barbosa Silva (philippe.silva@ifgoiano.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, Rio Verde, GO, Brasil
Daniela Cabral Oliveira (daniela.oliveira@unirv.edu.br)
Universidade de Rio Verde, Programa de Mestrado, Fazenda Fontes do Saber-Campus Universitário, Rio Verde, GO, Brasil

Gerenciamento da cadeia de suprimentos

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DAS ROTAS HEFA, ATJ E FT PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO (SAF) NO BRASIL

Júlia Saint Martin[1], **Fernando Seabra**[1], **Isabelle Blight**[1], **Maria Fernanda de Sá**[1], **Pedro Henrique Batista Otero**[1]
[1]Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
Este artigo visa realizar uma análise comparativa das rotas HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), ATJ (*Alcohol-to-Jet*) e FT (*Fischer-Tropsch*), consideradas as alternativas com maior potencial de aplicação no Brasil. A partir da sistematização de dados técnicos, normativos e institucionais, são apresentadas as iniciativas anunciadas e em operação no Brasil, bem como um quadro comparativo com as principais características de cada rota, com enfoque na viabilidade econômica e integração com a produção local de matérias-primas para o SAF. Os resultados permitem observar diferenças relevantes quanto à adequação das rotas ao contexto brasileiro, destacando os principais aspectos técnicos e entraves logísticos e em termos de custos. Apesar da rota HEFA ser a mais relevante em número de iniciativas, a ATJ é a que demonstra maior sinergia com a produção agrícola brasileira e a FT maior potencial de redução de custos de OPEX no longo prazo. O estudo reforça a importância de políticas e investimentos alinhados às especificidades regionais e destaca a necessidade de análises mais robustas sobre os parâmetros de emissões, impactos indiretos e custos adaptados à realidade brasileira.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética global tem impulsionado ações setoriais voltadas à descarbonização, incluindo o setor de transporte aéreo. Em resposta aos compromissos climáticos firmados no Acordo de Paris, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) estabeleceu o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA), cuja meta é atingir a neutralidade de carbono na aviação até 2050 (ICAO, 2023). Embora tecnologias emergentes, como a propulsão elétrica baseada em células fotovoltaicas e uso de supercapacitores, estejam em desenvolvimento para mitigar o consumo de combustíveis fósseis no setor, a ICAO aponta que, ao menos no curto e médio prazo, as aeronaves comerciais de grande porte continuarão dependentes de combustíveis líquidos (ICAO, 2018). Nesse contexo, os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), especialmente os do tipo "*drop-in*" compatíveis com os motores e infraestruturas existentes, assumem papel central na estratégia de descarbonização, permitindo reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) sem realizar adaptações significativas nos sistemas aeronáuticos já postos (ICAO, 2018). No entanto, a sua adoção global ainda enfrenta barreiras técnicas, regulatórias e econômicas (Lau *et al.* 2024).

Segundo a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA, 2025), para que o setor aéreo zere as emissões líquidas até 2050, será necessário que o SAF represente 65% do consumo total de combustíveis na aviação civil. Esse cenário exige o desenvolvimento e escalonamento da produção, o que pode ser incentivado através da adoção de múltiplas rotas tecnológicas. Atualmente, as rotas HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), ATJ (*Alcohol-to-Jet*) e FT (*Fischer-Tropsch*) são consideradas as rotas de maior maturidade e número de iniciativas de produção, com limitações distintas em termos de insumos, sustentabilidade e escalabilidade (Lau *et al,* 2024; BRASIL, 2022). No plano internacional, o CORSIA introduziu critérios técnicos e ambientais para que as rotas possam ser consideradas elegíveis, exigindo, por exemplo, a produção de um combustível que reduza em, no mínimo, 10% das emissões de GEE em relação ao QAV fóssil. A ICAO também estabeleceu diretrizes sobre impactos indiretos no uso da terra (ILUC), biodiversidade, segurança alimentar e questões sociais, tornando a sustentabilidade um elemento central da certificação (ICAO, 2018).

Apesar do avanço em âmbito internacional, ainda há escassez de trabalhos aplicados ao contexto brasileiro. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo analisar comparativamente as rotas HEFA, ATJ E FT, tendo como foco a viabilidade em larga escala para o caso brasileiro. O trabalho está dividido em três seções, além desta introdução, nas quais são apresentadas a metodologia, os resultados e a conclusão.

2. METODOLOGIA

O presente estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada em análise documental de normas técnicas e literatura especializada sobre SAF. Foram consultadas publicações da ASTM *International*, da ICAO, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), além de relatórios técnicos e estudos de caso. O trabalho foi conduzido por meio de uma

análise de *benchmarking* crítica, consistindo na comparação sistemática entre as três rotas tecnológicas de SAF de maior maturidade no mercado atualmente (HEFA, ATJ e FT). Os dados foram organizados em um quadro comparativo, visando sintetizar as informações de forma estruturada e facilitar a discussão sobre a viabilidade relativa das rotas HEFA, ATJ e FT no contexto nacional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A consolidação da agenda de SAF no Brasil tem avançado com a criação de marcos regulatórios nacionais. Em 2021, a Resolução ANP nº 856 definiu as especificações técnicas para a adoção do SAF no país, estabelecendo os requisitos para sua produção e comercialização. Esse processo foi consolidado com a sanção da Lei nº 14.993/2024, conhecida como a Lei do Combustível do Futuro, a qual criou o Programa Nacional de Combustíveis Sustentáveis e incluindo o ProBioQAV (Programa Nacional do Bioquerosene de Aviação) como uma de suas iniciativas centrais. Esse ambiente regulatório tem impulsionado o surgimento de iniciativas de produção de SAF, as quais estão apresentadas na Figura 1, evidenciando as rotas tecnológicas propostas, até o momento, no Brasil.

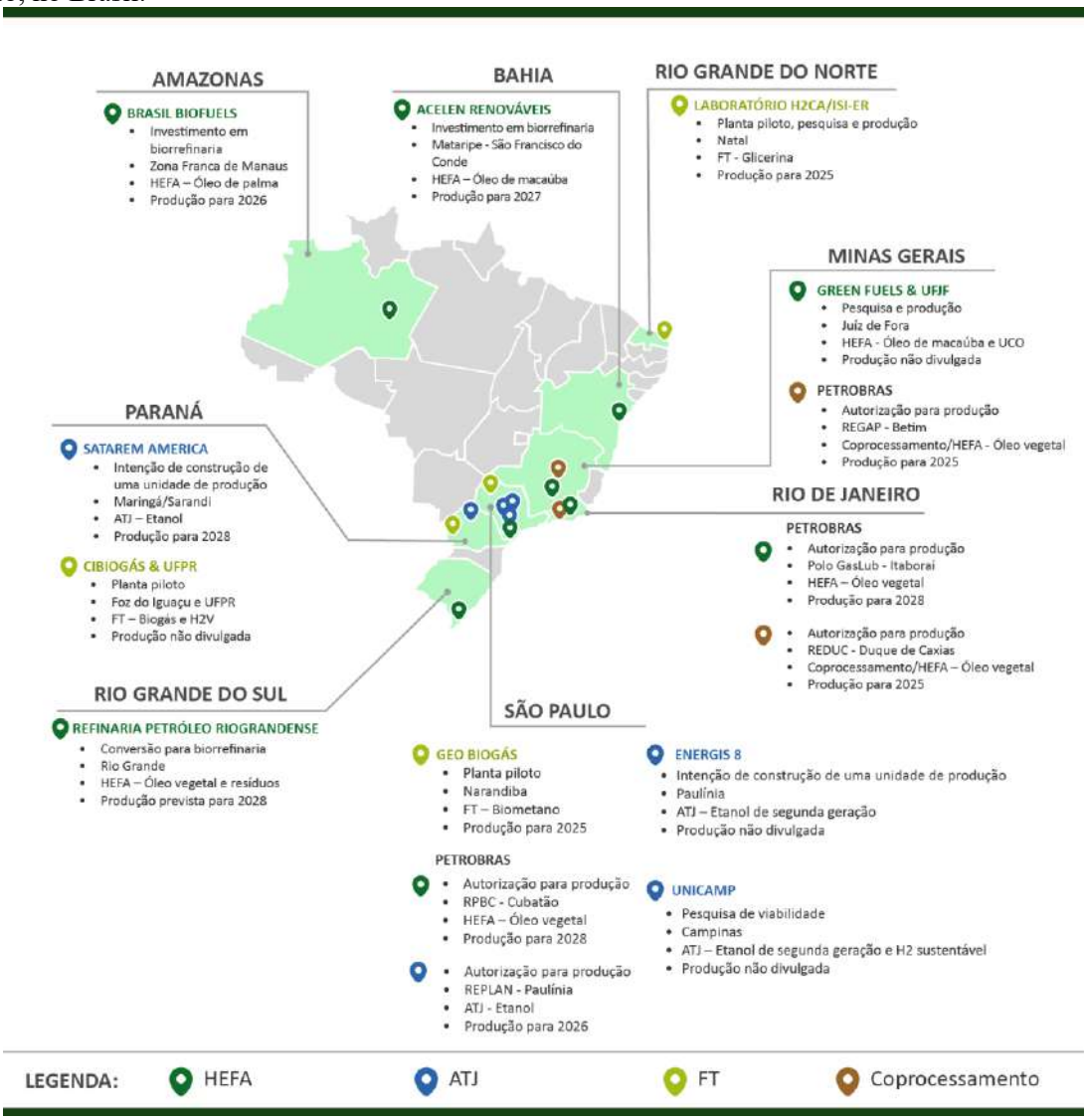


Figura 1: Iniciativas anunciadas e em andamento no Brasil, de acordo com a rota tecnológica

Em complemento às iniciativas, o Quadro 1 exibe uma comparação entre as rotas HEFA, ATJ e FT, apresenta uma comparação entre as rotas HEFA, ATJ e FT, com enfoque no resumo de referências institucionais e da literatura acerca da viabilidade econômica e operacional dessas rotas no contexto brasileiro

Quadro 1: Comparação das rotas HEFA, ATJ e FT para o caso brasileiro

CATEGORIA APLICADAS AO BRASIL	HEFA	ATJ	FT
MATÉRIA PRIMA	Óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais (óleo de cozinha usado e resíduos urbanos)	Álcoois; biomassa, resíduos florestais e melaço para produção de álcool	Biomassa lignocelulósica, resíduos industriais e subprodutos orgânicos, e gases (biometano, biogás, gás de aterro sanitário e CO_2)
INTEGRAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA TECNOLÓGICA	Possível integração da cadeia produtiva da soja, visto que os processos de refinamento são usados na produção de outros combustíveis, porém, há dificuldades logísticas específicas à cada matéria-prima: •Sebo bovino – produção concentrada no MT, enquanto as plantas da rota estão no Sudeste. •Óleo de soja – disponibilidade limitada, pois também é utilizado na produção de biodiesel. •Óleo de palma – produção ainda insuficiente e concentrada no Pará.	Possível integração com a produção brasileira de etanol, especialmente no estado de São Paulo. As etapas de produção de etanol e conversão em SAF podem ser descentralizadas, permitindo uma melhor logística e otimização da localização de cada etapa. Limitação logística: o etanol é um insumo demandado por outros setores (combustível veicular, indústria e exportação).	Possível integração da cadeia produtiva com setor de produção de energia a partir de biogás e biometano. Desafios logísticos estão associados à coleta, transporte e armazenamento dos insumos, já que a oferta é bastante dispersa geograficamente. Por outro lado, a demanda por resíduos agrícolas e florestais (insumos de alto potencial energético) é relativamente baixa quando comparada às demais rotas.
DOMÍNIO DA TECNOLOGIA	A rota HEFA já possui domínio tecnológico (TRL 9), com custos industriais reduzidos e viabilidade para produção em larga escala. Risco identificado: possível toxicidade associada ao uso de agrotóxicos na soja como matéria-prima.	A rota ATJ foi demonstrada em ambiente operacional (TRL7), porém tem maturidade comercial limitada. O processo de adaptação das estruturas de etanol para estruturas de SAF ainda passa por testes e há a necessidade de realizar estudos relacionados à utilização da cana-de-açúcar, pois seu grau de sustentabilidade é controverso.	A rota FT foi demonstrada em ambiente operacional (TRL7), porém tem maturidade comercial limitada, enfrentando desafios de escalabilidade e viabilidade econômica. Estudos apontam a necessidade de avanços na tecnologia de refino.
INTENSIDADE DE RECURSOS DE PRODUÇÃO	Custos operacionais incluem matéria-prima, hidrogenação e consumo de energia. Matérias-primas representam a maior parte do custo total de produção. Baixa intensidade de capital, com possibilidade de coprocessamento em plataformas de petróleo ou conversão de infraestrutura existente.	Custo de capital representa 20–50% do custo total; matéria-prima, 15–60%. A rota ATJ exige CAPEX elevado – superior à HEFA, porém inferior à FT. A integração da cadeia produtiva permite manter o OPEX baixo, mesmo com o alto investimento inicial.	Alta intensidade de capital: custo de capital representa 50–75% do custo total; matéria-prima, 10–35%. A FT possui os maiores CAPEX e OPEX entre as três rotas. Os altos custos operacionais (OPEX) se devem ao consumo elevado de eletricidade e à necessidade de limpeza do gás de síntese (syngas). Há um potencial de redução do OPEX no longo prazo devido ao uso de resíduos de baixo custo.
SUBPRODUTOS	Nafta e diesel renováveis	Diesel renovável, gasolina renovável e gases leves	Diesel renovável, nafta renovável, gases leves e ceras

Fonte: Brasil, GIZ (2022a, 2022b); EPE (2024); Walter *et al*. (2021); Capaz *et al.* (2021) Cervi *et al*. (2020); Carvalho *et al*. (2019); Cantarella *et al*. (2015).

Como apresentado na Figura 1, no Brasil, há uma predominância dos projetos que empregam a rota HEFA – incluindo as iniciativas de coprocessamento de petróleo com HEFA– o que é esperado, já que é a rota de maior prontidão tecnológica. Nesse sentido, notam-se iniciativas por parte das empresas para reduzir os custos de CAPEX. Por exemplo, a Petrobrás está investindo em coprocessamento, uma alternativa em que as refinarias operam conjuntamente a produção de combustíveis fósseis e SAF. No caso da Refinaria de Petróleo Riograndense (RPR) está em curso a conversão da refinaria de petróleo em biorrefinaria de renováveis.

Em termos de insumos para a rota HEFA, predomina a utilização de óleo de soja e sebo bovino. As empresas Brasil Biofuels (BBF), Acelen e Green Fuels, que pretendem utilizar outros óleos vegetais, também devem empregar o óleo de soja nos períodos iniciais de operação. A BBF destaca-se por prever a verticalização da produção, enquanto Acelen e Green Fuels demonstram integração com a cadeia do óleo de macaúba, na Bahia e em Minas Gerais, reduzindo os desafios logísticos apontados no Quadro 1. Ademais, o uso de outros óleos, para além do óleo de soja, tem a vantagem de não competir com outras cadeias, como a produção de biodiesel. Apesar disso, há uma preocupação com o aumento do custo associado à rota HEFA com o emprego de óleo de palma ou macaúba, dado que a HEFA é intensiva em matéria prima (*input-driven*).

Em geral, observa-se uma concentração de projetos de HEFA na região sudeste, que se justifica - em uma lógica *upstream* da cadeia - pela proximidade logística com consumidores finais; isto é, os principais aeroportos do país (Guarulhos e Viracopos). No estado de São Paulo, desponta também a rota ATJ, o que é consequência da liderança do estado na produção de cana-de-açúcar e etanol, já em uma lógica *downstream* da cadeia de produção. A rota ATJ é, portanto, também orientada por disponibilidade de insumos. Nesse sentido, além do etanol de cana de primeira geração (E1G), com significativa demanda para o uso em veículos automotores, a rota ATJ pode também usar o etanol de segunda geração (E2G), produzido a partir do bagaço da cana, o que diminui a pegada de carbono e evita competição com o E1G.

Quanto à rota FT, observa-se que essa via vem sendo procurada por empresas que já têm experiência na produção de biogás e em sua conversão para outras formas de energia renovável, como a elétrica. De modo geral, essa rota é a mais intensiva em capital (CAPEX), uma vez que a tecnologia empregada na transformação, por exemplo, de resíduos e gases é a mais complexa. Como apontado no Quadro 1, os custos de equipamento e de operação são onerosos, contudo, os benefícios em termos de geração de SAF e de transformação de insumos considerados resíduos ou restos e perdas de processos industriais têm boas perspectivas. Um exemplo dessa rota no Brasil é dada pelo Laboratório H2CA/ISI-ER, no Rio Grande do Norte, que lidera uma pesquisa acerca da utilização de glicerina como matéria prima para essa rota.

4. CONCLUSÃO

Este estudo realiza um diagnóstico e análise qualitativa sobre o estágio atual da produção de SAF no Brasil, visando avaliar a viabilidade comparativa das rotas com maior potencial de produção em larga escala, HEFA, ATJ e FT. Os resultados indicam que as iniciativas brasileiras em curso e em planejamento utilizam as três rotas, estando elas geograficamente dispersas pelo país. Pode-se afirmar que a especialização em certas rotas tecnológicas é consequência de fatores que condicionam a competitividade, como a disponibilidade de insumos, o acesso à tecnologia requerida no processo produtivo e a existência de cadeias produtivas já atuantes na direção de distribuição e consumo da rota SAF em questão.

Destacam-se, a curto prazo, as rotas HEFA e ATJ. A primeira, apresenta performance superior em produção atual e perspectiva devido à sua natureza orientada por insumos que converge com a abundância de matéria prima no Brasil e com a experiência tecnológica do país com biocombustíveis, para além das perspectivas de coprocessamento do SAF em refinarias de petróleo já existentes, reduzindo o CAPEX dos projetos de infraestrutura. No mesmo sentido, a rota ATJ, também bastante incidente na evidência recente brasileira, beneficia-se da estreita relação com os elos da cadeia de produção de etanol a partir da cana e milho.

Destaca-se a lacuna de estudos técnico-econômicos que considerem parâmetros adaptados à realidade brasileira, como custos logísticos internos, emissões associadas ao ciclo de vida (LCA) e impactos indiretos no uso da terra (ILUC). A literatura nacional sobre o tema se concentra em estudos acerca da disponibilidade de matéria prima, potenciais produtivos regionais e análises de viabilidade sem o uso de estimativas de emissões associadas ao ciclo de vida, impactos indiretos e custos de produção específicos à realidade brasileira (Walter *et al*., 2021; Cervi *et al*., 2020; Carvalho *et al*., 2019; Cantarella *et al*., 2015). Como indicam Capaz et al. (2021) e o relatório do projeto ProQR, fruto da cooperação entre o governo brasileiro e a empresa federal

alemã GIZ (2022), os modelos de análise técnico-econômica de produção de SAF no Brasil adotam coeficientes de rendimento, custos e emissões derivados de estudos estrangeiros, sem refletir adequadamente as especificidades do país e da região em que se insere. Esse cenário reforça a necessidade de aprofundamentos metodológicos futuros, com enfoque na construção de referenciais de parâmetros técnico-econômicos coerentes com a realidade nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP (2021) Resolução nº 856, de 22 de outubro de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 out. 2021. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021 (acesso em 06/07/2025).

ASTM (2024) ASTM D7566-24d: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. West Conshohocken: ASTM, 4 dez. 2024. Disponível em: https://store.astm.org/d7566-24d.html (acesso em 20/03/2025).

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI); DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação. Brasília: MCTI; GIZ, jun. 2022a. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/analise-economica-diferentes-rotas-de-producao-de-saf.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI); DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). Estudo sobre governança e políticas públicas de incentivo à produção de biocombustíveis sustentáveis de aviação. Brasília: MCTI; GIZ, jan. 2022b. Disponível em: https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2022/04/Governanca-e-Politicas-Publicas-para-SAF.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.

Cantarella, et al. Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. Environmental Development, Oxford, v. 15, p. 52–63, jul. 2015. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.05.004. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.004. Acesso em: 13 jul. 2025.

Capaz, et al. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 15, n. 2, p. 502–524, 2021. DOI: 10.1002/bbb.2168. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bbb.2168. Acesso em: 13 jul. 2025.

Carvalho, et al. Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Oxford, v. 13, n. 6, p. 1454–1475, set. 2019. DOI: 10.1002/bbb.2041. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bbb.2041. Acesso em: 13 jul. 2025.

Cervi, et al. F. Spatial modeling of techno-economic potential of biojet fuel production in Brazil. Global Change Biology – Bioenergy, Oxford, v. 12, n. 2, p. 136–157, 2020. DOI: 10.1111/gcbb.12659. Disponível em: https://doi.org/10.1111/gcbb.12659. Acesso em: 13 jul. 2025.

EPE. Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil: Sustainable Aviation Fuel – SAF: Perspectivas Futuras. [Brasília, DF]: EPE, set. 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_Combust%C3%ADveis_Sustent%C3%A1veis_Avia%C3%A7%C3%A3o_Brasil.pdf. Acesso em: 28 fev. 2025.

IATA. Net Zero 2050: Sustainable Aviation Fuels (SAF) Fact Sheet. Geneva: IATA, jun. 2025. Disponível em: https://www.iata.org/flynetzero. Acesso em: 13 jul. 2025.

ICAO. Sustainable Aviation Fuels Guide. Montreal: ICAO, 2018. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

ICAO. ICAO Global Framework for SAF, LCAF and other Aviation Cleaner Energies. Montreal: ICAO, 24 nov. 2023. Disponível em: https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Documents/ICAO%20Global%20Framework%20on%20Aviation%20Cleaner%20Energies_24Nov2023.pdf. Acesso em: 26 fev. 2025.

Lau, J. et al. Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF). Biomass and Bioenergy, v. 186, p. 107277, July 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107277. Acesso em: 15 maio 2025.

Walter, et al. Spatially Explicit Assessment of the Feasibility of Sustainable Aviation Fuels Production in Brazil: Results of Three Case Studies. Energies, Basel, v. 14, n. 16, p. 4972, ago. 2021. DOI: 10.3390/en14164972. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en14164972. Acesso em: 13 jul. 2025.

Prof. Dr. Fernando Seabra (f.seabra@ufsc.br)
Isabelle Blight (isabelleblight.labtrans@gmail.com)
Júlia Saint Martin (juliasaintmartin.labtrans@gmail.com)
Pedro Henrique Batista Otero (pedrootero.labtrans@gmail.com)

Maria Fernanda de Sá (mariasilva.labtrans@gmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans/UFSC), Campus Trinade (s/n, Trindade, Florianópolis, SC, Brasil)

AVALIAÇÃO DO USO COMPARTILHADO DE DOCAS NA REDUÇÃO DO TEMPO DE PERMANÊNCIA DE CAMINHÕES EM CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO

Fernanda Haddad V Rodrigues[1], **Rodrigo de Alvarenga Rosa**[1]
[1] UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

RESUMO
A alocação eficiente de docas em Centros de Distribuição (CDs) compartilhados é um desafio devido a limitação deste recurso. Duas opções existem aos proprietários dos CDs: restringir docas alugando-as a empresas fixas e compartilhar as docas pelas empresas que operam no CD. Docas fixas podem levar a um aumento do tempo de permanência dos caminhões pela falta de doca, enquanto o uso compartilhado das docas permite maior flexibilidade e pode reduzir este tempo. Com o objetivo de definir a melhor configuração para redução do tempo de permanência dos caminhões, esta pesquisa compara cenários com docas fixas e docas compartilhadas, utilizando um modelo matemático baseado no Problema de Roteamento de Veículos Capacitados (MD-CVRP). Os resultados indicam que, em docas flexíveis, o aumento no tempo de operação em docas mais distantes da área de armazenagem é compensado pela redução no tempo de espera, com 6,6% de redução no tempo total de permanência.

1. INTRODUÇÃO

O aumento de encomendas de pequeno porte em áreas urbanas exige adequação operacional para lidar com a variação de volume, conforme sazonalidade, sem deixar de atender ao nível de serviço acordado entre empresa e cliente (Iwan et al., 2021; Snoeck e Winkenback, 2020). Nessa lógica, os Centros de Distribuição (CDs) Compartilhados são unidades essenciais para suporte na cadeia logística, visto que, ao utilizar do mesmo espaço e serviços, o custo de instalação das empresas reduz, assim como a flexibilidade para suprir a variação de demanda pela consolidação de carga em pontos estratégicos.

Nos modelos de contratação em Centros de Distribuição (CDs) compartilhados, a utilização das docas pode ser fixa (alocada exclusivamente a uma empresa junto à sua área de armazenagem) ou flexível (compartilhada entre empresas). Em cenários de docas fixas com disponibilidade limitada, a escassez de recursos leva à formação de filas, resultando em um aumento no tempo de permanência dos caminhões. Este estudo avalia o cenário de docas flexíveis, onde estas são tratadas como um recurso comum, cuja alocação das docas aos caminhões é otimizada por um planejador central do CD. O processo de alocação é crítico, pois o tempo de serviço (carga e/ou descarga) é diretamente influenciado pela localização da doca designada. A distância entre a doca e a área de armazenagem específica da empresa determina o tempo de deslocamento interno da carga, impactando diretamente a duração total da operação. Define-se o tempo de permanência total de um caminhão como a soma de duas componentes principais: o tempo de espera em fila para a alocação de uma doca e o tempo de serviço, que corresponde à operação de carga e/ou descarga. Portanto, este trabalho objetiva analisar a eficiência do uso de docas flexíveis em comparação com docas fixas em CDs compartilhados.

A aplicação do modelo matemático proposto visa auxiliar os planejadores na definição do local e do momento ideal para o início da operação de cada caminhão. No MD-CVRP, um conjunto de veículos com uma capacidade limitada de coleta sai de um dos depósitos, passa uma única vez no conjunto de clientes e volta ao ponto de partida (Montoya-Torres et al., 2015). As adaptações necessárias para a criação do modelo matemático proposto nesta pesquisa consideram os depósitos sendo as docas e os clientes sendo os caminhões. Cada doca possui um veículo fictício que percorre uma rota com saída na doca real e fim na doca fictícia, passando uma única vez por cada caminhão. A Figura 1 ilustra a sequência de atendimento dos caminhões para cada rota, ou seja, o atendimento em cada doca realizado pelo veículo fictício. O tempo total de viagem de cada veículo fictício é limitado pelo tempo de funcionamento do CD.

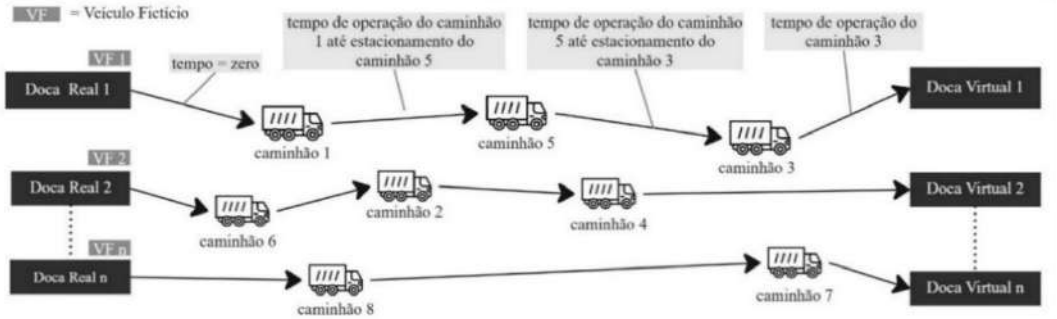


Figura 1: Representação do Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos para alocação de docas

A comparação da otimização em diferentes cenários, seja permitindo maior flexibilidade na operação ou restringindo as docas a áreas próximas à armazenagem, busca viabilizar a sinergia entre empresas que compartilham o mesmo CD. Dessa forma, este artigo compara a aplicação do modelo em operações cujas docas são compartilhadas e operações cujas docas são alugadas para definição da melhor configuração em CDs compartilhados, visando redução do tempo de permanência dos caminhões.

Trabalhos semelhantes descrevem a alocação de docas como um problema de programação de caminhões integrada a decisão espacial e temporal (Wolff et. Al, 2021). Boysen (2010) e Monemi e Galereh (2023) abordam o problema de alocação de docas para *cross-docking,* com o objetivo de minimizar tempo de viagem/operação considerando restrições de recursos. Não foi encontrado um trabalho que utilize um modelo matemático baseado no Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Múltiplos Depósitos (MD-CVRP) como metodologia de solução para alocação de docas, sendo o principal diferencial nesta pesquisa. Do ponto de vista metodológico, esta pesquisa se alinha à abordagem de modelagem quantitativa axiomática normativa, conforme a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002).

2. GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

A definição dos parâmetros para o modelo matemático, que representa as operações de múltiplas empresas em um mesmo CD, deve considerar as variáveis globais do CD e, simultaneamente, as especificidades inerentes a cada empresa. Dessa forma, adota-se um horizonte de planejamento de 8 horas contínuas, equivalente a um dia de operação, com tempos fixos de operação conforme o tipo de carga. Esse tempo aumenta proporcionalmente à distância entre a doca e a área de armazenagem. Define-se também um tempo máximo de permanência de 2 horas por veículo, refletindo as restrições operacionais. Essas configurações compõem as instâncias avaliadas neste estudo, sendo testados dois cenários, descritos a seguir.

a) *Cenário Doca-Fixa*: os caminhões são alocados na doca em frente à área de armazenagem destinada à empresa dona da carga que ele transporta.
b) *Cenário Doca-Flexível*: os caminhões são alocados nas docas que minimizem o tempo de permanência total dele no CD. Leva-se em conta o tempo de espera e o tempo de operação. O tempo de operação é dependente da doca que o caminhão estacionará para operar. Assim, o tempo para operar em cada doca é proporcional a distância entre ela e a área de armazenagem.

A Figura 2 ilustra os dois cenários descritos, sendo a carga do Caminhão 1 destinada a área da Empresa 1. No cenário Doca-Fixa, o caminhão deve estacionar na vaga dedicada, enquanto no Doca-Flexível, é possível a alocação na doca mais distante da área de armazenagem para reduzir o tempo de espera do caminhão no CD.

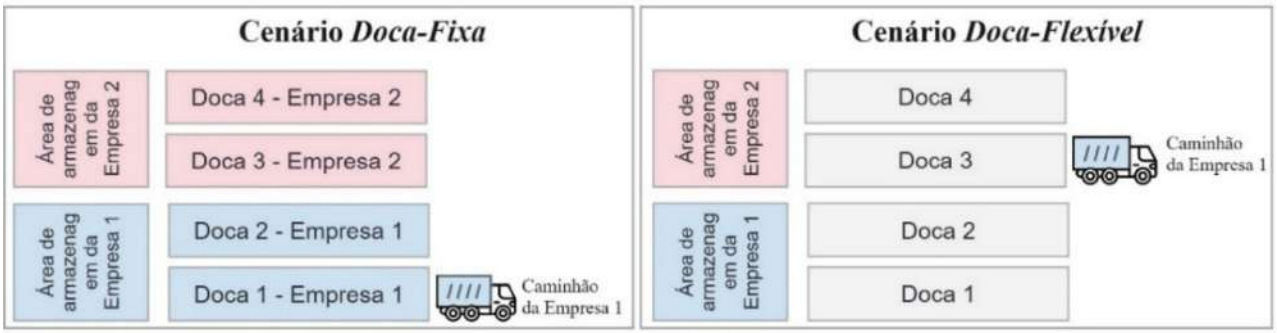


Figura 2: Representação das docas no Cenário *Doca-Fixa* e *Doca-Flexível*

Para testar o modelo, gerou-se 18 instâncias com horários de chegada de caminhões distribuídos aleatoriamente ao longo de um horizonte de planejamento de 8 horas. Essas instâncias foram divididas em dois grupos: 9 para um cenário de *Doca-Fixa*, onde as docas são de uso exclusivo de cada empresa, e 9 para um cenário de *Doca-Flexível*, que permite o compartilhamento de docas. As instâncias foram configuradas com 19 a 30 caminhões para criar condições de alta ocupação e analisar a sinergia entre empresas. Cada instância do cenário *Doca-fixa* possui uma correspondente direta no cenário *Doca-Flexível* (por exemplo: instâncias 01 e 10), compartilhando todos os parâmetros, exceto a flexibilidade de alocação. Os detalhes completos das configurações das instâncias encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Relação entre Instâncias do Cenário Doca-Fixa e o Cenário Doca-Flexível

Cenários	Instâncias								
Doca-Fixa	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Doca-Flexível	10	11	12	13	14	15	16	17	18

3. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Função Objetivo, apresentada na Equação 1, tem como objetivo minimizar o tempo total de permanência dos caminhões no centro de distribuição compartilhado. Este tempo total é dado pela hora o em que o caminhão estaciona na doca (me_{ik}), mais o tempo de operação convencional desta carga (to_{ik}) acrescido do tempo adicional pela distância entre a doca e área de armazenagem (ta_{ik}), subtraído do tempo de chegada do caminhão no CD (a_i).

$$\text{Minimizar} \sum_{i \in NC} \sum_{k \in DR} \left(me_{ik} + (to_{ik} + ta_{ik} - a_i) \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \right) \quad (1)$$

O conjunto de docas é representado por DR, definido como $DR = \{1, \dots, nd\}$, onde nd indica o número total de docas. Os caminhões são agrupados no conjunto NC, com definição $NC = \{nd + 1, \dots, nd + nc\}$, onde nc é a quantidade de caminhão. Para formular o problema, duas variáveis de decisão são propostas. A primeira, $me_{ik} \in \mathbb{R}^+$, é uma variável real positiva que indica o momento de estacionamento do caminhão $i \in NC$ na doca $k \in DR$. A segunda x_{ijk}, é uma variável de decisão binária que determina a alocação, onde $x_{ijk} = 1$ se o veículo fictício vai de i para j na doca k, e $x_{ijk} = 1$ caso contrário.

As restrições 2 a 8 são as restrições clássicas do problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos e uma única viagem. As restrições específicas para a adaptação ao modelo de alocação de docas são apresentadas a seguir.

$$\sum_{k \in DR} \left(x_{i(k+nc+nd)k} + \sum_{j \in NC} x_{ijk} \right) = 1 \qquad \forall\, i \in NC \qquad (1)$$

$$x_{k(k+nc+nd)k} + \sum_{j \in NC} x_{kjk} = 1 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (2)$$

$$x_{k(k+nc+nd)k} + \sum_{i \in NC} x_{i(k+nc+nd)k} = 1 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (3)$$

$$\sum_{ka \in DR} \sum_{i \in DCR} x_{i(k+nc+nd)ka} = 1 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (4)$$

$$\sum_{i \in NC} \left(x_{(k+nc+nd)ik} + x_{(k+nc+nd)kk} \right) = 0 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (5)$$

$$x_{(k+nc+nd)kk} + \sum_{i \in NC} x_{ikk} = 0 \qquad \forall\, k \in DR \qquad (6)$$

$$\left(\left(x_{h(k+nc+nd)k} + \sum_{j \in NC} x_{hjk} \right) - \left(x_{khk} + \sum_{i \in NC} x_{ihk} \right) \right) = 0 \qquad \forall\, h \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (7)$$

$$me_{jk} \geq me_{ik} + (to_{ik} + ta_{ik}) \cdot x_{ijk} - \left((1 - x_{ijk}) \cdot M \right) \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, j \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (9)$$

$$me_{ik} \geq a_i \cdot \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (10)$$

$$me_{i,k} \leq b_i \cdot \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (11)$$

$$me_{i,k} \leq (hp - to_{ik}) \cdot \sum_{j \in DCV} x_{ijk} \qquad \forall\, i \in NC, \forall\, k \in DR \qquad (12)$$

As Restrições 9 impõem precedência temporal: se o caminhão *i* precede o caminhão *j* na doca *k*, o início do estacionamento do caminhão *j* deve ocorrer após o término da operação do caminhão *i*. As Restrições 10 e 11 garantem que o caminhão *i* só estacione após sua chegada ao CD e antes de seu limite máximo de atendimento b_i. Por fim, as Restrições 12 asseguram que o início da operação do caminhão i ocorra antes do fim do horizonte de planejamento, descontando os tempos operacionais, sem considerar hora extra.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, são apresentados os resultados gerados com o uso do solver CPLEX 22.1.0. O computador utilizado é equipado com um processador Intel® Core™ i7-9750H0 operando a 2.60 GHz, 6 núcleos e 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. O solver CPLEX encontrou a solução ótima para todas as instâncias testadas.

A Figura 3 apresenta uma comparação entre o tempo total de permanência do caminhão no cenário *Doca-Fixa* e no *Doca-Flexível*. Os rótulos acima das barras representam o tempo total de permanência dos caminhões no CD para cada instância. Observa-se que na maioria dos pares de instâncias que comparam *Doca-Fixa* com *Doca-Flexível* (2-11 a 9-18), ocorre uma redução no tempo total de permanência para as instâncias com *Doca-Flexível*. A melhoria no cenário é atribuída a um *trade-off* entre o tempo de espera e o tempo de operação do caminhão: as instâncias para cenário *Doca-Flexível* apresentam uma redução no tempo de espera, pois o caminhão pode estacionar em qualquer doca disponível, aumentando a probabilidade de não aguardar para estacionamento. No entanto, ocorre um aumento no tempo de operação devido ao aumento da distância entre a área de armazenagem e a doca e se comparadas aos cenários de *Doca-Fixa*. Apesar desse aumento do tempo de operação, a redução do tempo de espera é compensada pela redução líquida no tempo total de permanência do caminhão.

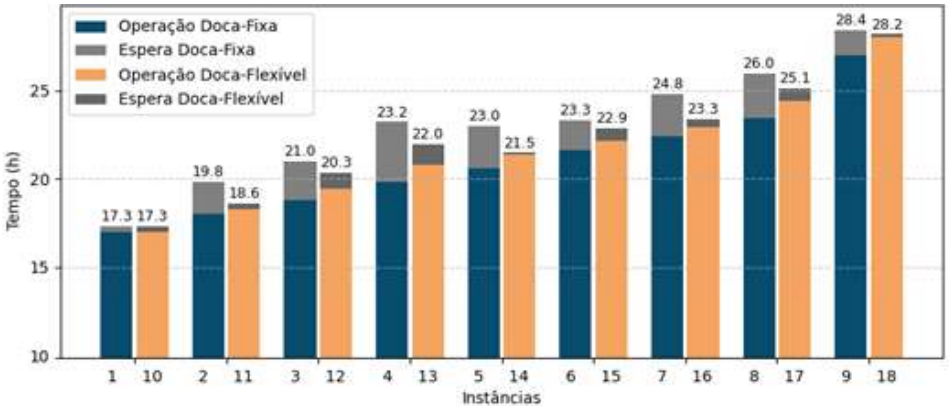


Figura 3: Tempo de permanência (operação + espera) para Doca-Fixa e Doca-Flexível

O único caso em que o tempo total de permanência não se alterou, foi nas instâncias 1 e 10, com 19 caminhões. O resultado é dado devido à baixa ocupação das docas ao decorrer do dia, não sendo necessária a alocação em docas mais distantes e aumento no tempo de operação. Para melhor entendimento na eficiência dos demais cenários, a Figura 4 ilustra o sequenciamento de caminhões e ocupação nas docas ao longo do tempo para as instâncias 5 (*Doca-Fixa*) e 14 (*Doca-Flexível*) para a operação de 23 caminhões no dia. Nota-se que, ao distribuir os 23 caminhões de forma a minimizar o tempo de permanência total destes, a instância 14 (*Doca-Flexível*) apresenta redução do 2,26 horas em relação ao cenário cuja alocação é restrita a doca mais próxima da área de armazenagem (instância 05). Ao analisar a operação da Empresa 2 percebe-se que na Instância 14 há uma folga entre o atendimento dos caminhões na Doca 3 e Doca 4, o que não ocorria para a instância 05.

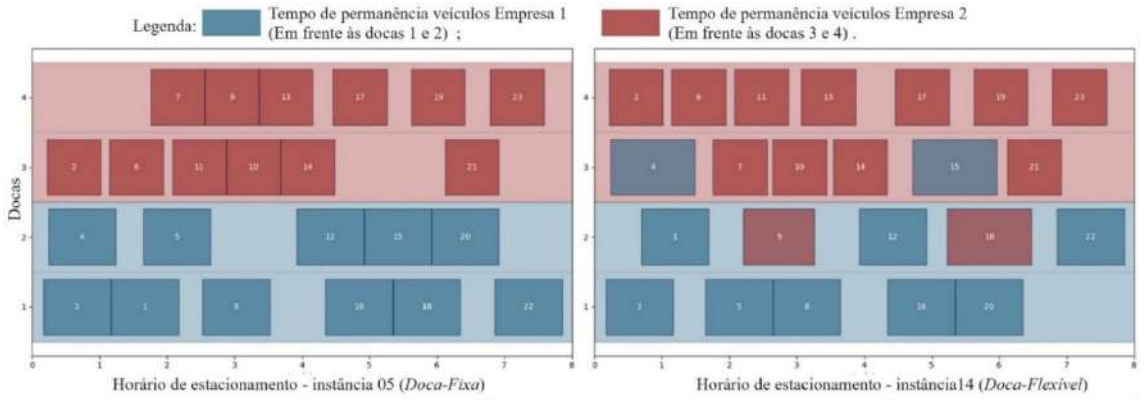


Figura 4: Comparação da alocação dos caminhões para *Doca-Fixa* e *Doca-Flexível*

Pelos resultados apresentados, pode-se concluir que em CDs compartilhados, a adoção de docas flexíveis apresenta uma redução do tempo total de permanência dos caminhões nos CDs.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa empregou uma abordagem de modelagem quantitativa axiomática normativa para analisar se o uso de docas flexíveis é mais eficiente do que o uso de docas fixas em CDs compartilhados, quando analisado o tempo de permanência de caminhões nos CDs. Para isso, um modelo matemático foi proposto para fazer a análise das duas estratégias de alocação de docas. A principal contribuição deste artigo é o sistema de apoio à decisão permitindo o controle otimizado das operações em empresas de pequeno e médio porte.

Os resultados mostraram que o cenário *Doca-Flexível* é mais eficiente, com reduções de até 1,2 horas no tempo de permanência, para instâncias com veículos excedentes e poucas docas disponíveis. A redução do tempo de permanência não só melhora a eficiência operacional, mas também serve como um atrativo comercial no CD compartilhado para novas empresas. Contudo, é importante ressaltar que, apesar da comprovada eficiência do sistema flexível, a ferramenta proposta deve atuar como um sistema de apoio à decisão. A sua aplicação final deve ser ponderada pelo planejador, que precisa avaliar outras influências críticas na operação não contempladas pelo modelo. Fatores como a disponibilidade de equipamentos específicos em cada doca. Sugere-se como trabalhos futuros a inclusão e a adaptação do modelo para diferentes layouts de armazéns e a utilização de meta-heurísticas para análises em CDs de maior porte.

Agradecimentos
Ao CNPq (processo CNPq: 305795/2023-6)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bertrand, J. W. M. e J. C. Fransoo (2002) Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241–264. DOI: 10.1108/01443570210414338.

Boysen, N. (2010) Truck scheduling at zero-inventory cross docking terminals. *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 1, p. 32–41. DOI: 10.1016/j.cor.2009.03.010.

Iwan, S.; K. Kijewska e G. Kijewski (2021) Efficiency of light electric vehicles in last mile deliveries - Szczecin case study. *Sustainable Cities and Society*, v. 74, art. 103167. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103167.

Monemi, N. R. e S. Gelareh (2023*)* Dock assignment and truck scheduling problem: consideration of multiple scenarios with resource allocation constraints. *Computers & Operations Research,* v. 151, art. 106074. DOI: 10.1016/j.cor.2022.106074.

Montoya-Torres, J. R.; López Franco, J.; Nieto Isaza, S.; Felixxola Jiménez e H.; Herazo-Padilla, N. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, v. 79, p. 115-129, 2015. DOI: 10.1016/j.cie.2014.10.029.

Snoeck, A. e M. Winkenbach (2020) The value of physical distribution flexibility in serving dense and uncertain urban markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 136, p. 152-177. DOI: 10.1016/j.tra.2020.02.011.

Wolff, P.; S. Emde e H. C. Pfohl (2021*) Internal resource requirements: the better performance metric for truck scheduling? Omega*, v. 103, art. 102431. DOI: 10.1016/j.omega.2021.102431.

Fernanda H. V. Rodrigues (fernanda.h.rodrigues@edu.ufes.br); *Rodrigo de Alvarenga Rosa* (rodrigo.a.rosa@ufes.br)
Universidade Federal do Espírito Santo, Goiabeiras, CT, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória - ES

DESPERDÍCIO DE FRUTAS E VEGETAIS NAS CEASAS BRASILEIRAS: PERCEPÇÕES DOS ATACADISTAS E SUAS PRÁTICAS LOGÍSTICAS

Dag Mendonça Lima, **Luiz Fernando Ferreira da Silva Neto**, **Andréa Leda Ramos de Oliveira**
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI)
Laboratório de Logística e Comercialização Agroindustrial (LOGICOM)

RESUMO
Este estudo investigou os fatores associados ao desperdício ao longo da cadeia de suprimentos de frutas e vegetais (FV) comercializados nas Centrais de Abastecimento de Alimentos (CEASAs) brasileiras, com foco na percepção de comerciantes atacadistas. Utilizando uma abordagem mista, com análises qualitativa e quantitativa, combinando análise de conteúdo e análise lexical dos depoimentos através do software Iramuteq. A pesquisa foi realizada em 12 CEASAs e revelou que os termos mais frequentes associados ao desperdício foram clima, transporte e manuseio. Embora os atacadistas reconhecem o impacto de fatores climáticos, também destacam deficiências logísticas como causas significativas do desperdício, incluindo falhas no transporte, no armazenamento e no planejamento da demanda. No entanto, muitos comerciantes não se veem como corresponsáveis pelo problema. A pesquisa conclui que a redução do desperdício exige ações coordenadas entre os atores da cadeia de suprimentos de FV, com capacitação, boas práticas logísticas e fortalecimento da responsabilidade compartilhada.

1. INTRODUÇÃO

O desperdício de alimentos é um dos principais desafios para as cadeias agroalimentares em escala mundial. Estima-se que cerca de 30% de toda a produção mundial de alimentos seja perdida ou desperdiçada ao longo da cadeia de suprimentos, desde a produção até o consumo final (FAO, 2023). Esse problema afeta diretamente a segurança alimentar, intensifica os impactos ambientais da atividade agrícola e acarreta perdas econômicas expressivas, estimadas em cerca de US$ 1 trilhão (UNEP, 2024).

As cadeias de frutas e vegetais (FV) são especialmente vulneráveis, em função da alta perecibilidade dos produtos, exigindo cadeias de suprimentos eficientes e integradas. No Brasil, a comercialização de FV ocorre por meio de diversos canais, como as Centrais de Abastecimento (CEASAs), redes privadas de supermercados, atacarejos e feiras livres. A precariedade da infraestrutura, aliada a práticas logísticas frequentemente inadequadas, contribui de forma significativa para o desperdício ao longo da cadeia.

Isto posto, este estudo tem como objetivo identificar os principais fatores associados ao desperdício ao longo da cadeia de suprimentos de FV nas CEASAs brasileiras, a partir da percepção de comerciantes atacadistas.
A pesquisa foi realizada em 12 CEASAs, localizadas em diferentes regiões do Brasil, com o objetivo de captar a diversidade de contextos logísticos e operacionais. Foi adotado uma abordagem mista, qualitativa e quantitativamente, combinando análise de conteúdo e análise lexical dos depoimentos dos comerciantes através do software Iramuteq.

Este estudo se justifica por identificar e analisar a percepção dos comerciantes atacadistas acerca do desperdício de frutas e vegetais, contribuindo para compreender como suas práticas logísticas e operacionais influenciam diretamente o desperdício de frutas e vegetais. Essa perspectiva amplia a literatura ao integrar a visão dos agentes que atuam no cotidiano da comercialização com abordagens metodológicas pouco usuais neste contexto como a análise lexicométrica. Nossa pesquisa, avança na compressão de fatores críticos do desperdício, ao destacar a interação entre variabilidade climática, transporte e manuseio, e evidencia a importância da responsabilidade compartilhada na cadeia de suprimentos. Além da contribuição acadêmica, os resultados subsidiam políticas, infraestrutura e capacitação, destacando a importância de estratégias integradas para reduzir o desperdício contribuindo para estabelecer sistemas de abastecimento resilientes e sustentáveis

2. METODOLOGIA

A metodologia do estudo está dividida em duas etapas. A primeira, apresenta o processo de coleta de dados junto aos comerciantes atacadistas. A segunda, descreve as técnicas analíticas utilizadas, com o uso do software Iramuteq.

2.1. Descrição dos dados

A coleta de dados foi realizada em 12 CEASAs, distribuídas por todas as regiões do Brasil. A seleção dessas unidades foi em função de seu caráter estratégico, considerando sua relevância na comercialização de FV e nos volumes expressivos de movimentação. Além disso, buscou-se contemplar a diversidade regional, a fim de assegurar a representatividade nacional das práticas comerciais e logísticas analisadas. Essa abordagem está alinhada com Lima e Oliveira (2021), que destacam a importância de considerar as especificidades regionais na análise de perdas e desperdícios ao longo das cadeias de FV.

As CEASAs selecionadas foram: CEASA Belém (PA), CEASA Maracanaú (CE), CEASA Caruaru (PE), CEASA Paulo Afonso (BA), CEASA Goiânia (GO), CEASA Belo Horizonte (MG), CEASA Rio de Janeiro (RJ), CRAISA Santo André (SP), CEAGESP São Paulo (SP), CEASA Campinas (SP), CEASA Curitiba (PR), CEASA Porto Alegre (RS). Em 2024, as 12 CEASAs juntas respondem por aproximadamente 61% do volume total e 65% dos recursos financeiros da comercialização de FV no país (CONAB, 2024).

Para a análise da cadeia logística, foram selecionados sete produtos: alface, banana, batata, laranja, mamão, melancia e tomate. Esses produtos representam, em suas respectivas categorias, os itens mais consumidos pela população brasileira, segundo a última Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF 2017–2018) do IBGE (2019). O questionário foi aplicado junto a comerciantes atacadistas das CEASAs, com questões voltadas às práticas comerciais, condições de transporte, armazenamento, manuseio pós-colheita, prestação de serviços, estratégias de marketing e ações de pós-venda.

2.2. Análise Lexical e de Conteúdo do Discurso

A presente pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, com foco na análise textual das respostas fornecidas por comerciantes atacadistas sobre suas percepções e práticas relacionadas ao desperdício de alimentos nas CEASAs. Para isso, foram utilizadas técnicas de análise de conteúdo e ferramentas de análise lexicométrica, com o apoio do software Iramuteq, que permite identifcar relações entre palavras e categorias em grandes volumes de dados textuais.

As respostas foram organizadas em Segmentos Textuais (ST), que representam unidades estruturadas do corpus e servem de base para as análises. A categorização foi realizada por meio da técnica de associação livre de palavras, agrupando respostas com significados semelhantes em conjuntos homogêneos, conforme os princípios de clareza interna e distinção externa entre categorias (Perry e Krippendorff, 2013). Essa organização facilitou a identificação de padrões temáticos relacionados à logística e ao desperdício de frutas e vegetais. Complementarmente, foi realizada a análise da diversidade lexical, utilizando quatro indicadores: Type Token Ratio (TTR), Proporção de Hapax, Índice de Guiraud e Índice de Herdan (Aversa et al., 2023). Esses indicadores permitiram avaliar a variabilidade e a riqueza linguística dos textos, contribuindo para a robustez da análise interpretativa e estatística.

As análises lexicométricas foram complementadas por métodos estatísticos oferecidos pelo Iramuteq, como análise de similitude, análise de correspondência e análise fatorial de correspondência (AFC) (Chaves et al., 2017), permitindo explorar relações entre palavras e categorias. O uso integrado dessas técnicas possibilitou uma leitura aprofundada das práticas comerciais e operacionais que contribuem para o desperdício de alimentos nas Centrais analisadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A nuvem lexical (Figura 1) apresenta um total de 1.161 ocorrências, considerando o critério de frequência mínima ($F \geq 3$), o que resultou em 81 palavras distintas. Observa-se que o fator climático foi o mais frequentemente associado ao desperdício, evidenciado pela densidade de ocorrência dos termos mais recorrentes, especialmente clima, transporte e manuseio. O transporte, prática mais citada, foi descrito como causa do desperdício devido a falhas de armazenamento e ausência de refrigeração, que resultam em danos mecânicos e aceleram a deterioração das frutas e vegetais. O manuseio, também recorrente, foi apontado como fator crítico, já que impactos físicos durante carga, descarga e armazenagem comprometem a qualidade e aumentam a rejeição dos produtos nos mercados atacadistas. Além disso, fatores climáticos, embora menos controláveis, intensificam os efeitos negativos, ampliando a vulnerabilidade da cadeia de suprimentos. Esses

achados corroboram Huang et al. (2021), Kasso e Bekele (2018) e Lima e Oliveira (2021), reforçando que a interação entre variabilidade climática e práticas logísticas inadequadas constitui uma das principais causas do desperdício em cadeias de frutas e vegetais.



Figura 1: Nuvem de palavras associadas ao maior desperdício de FV

As condições climáticas são reconhecidas por vários autores como um fator crítico na logística e comercialização de FV, afetando diretamente a qualidade e durabilidade dos produtos hortifrutigranjeiros (Aldaco et al., 2020). As operações de manuseio e transporte destacam a importância de procedimentos adequados para preservar a qualidade de FV uma vez que, danos mecânicos durante o transporte e o manuseio inadequado resultam em níveis significativos de desperdício de FV (Abiad & Meho, 2018; Lima & Oliveira, 2021).

A partir dos depoimentos dos comerciantes atacadistas, analisados por meio da análise de similitude (Figura 2), foram identificadas quatro práticas logísticas fortemente associadas ao desperdício de frutas e vegetais ao longo da cadeia de suprimentos. O gráfico evidencia, em cada grupo, as palavras mais frequentes e aquelas que tendem a ocorrer em conjunto nos mesmos segmentos de texto. A prática mais recorrente foi o transporte, com 136 ocorrências, indicando que falhas como sobrecarga, acondicionamento inadequado e ausência de refrigeração resultam em danos mecânicos e aceleram a deterioração dos produtos, reduzindo sua vida útil. O manuseio, com 130 ocorrências, também se destacou como fator crítico, pois impactos físicos durante carga, descarga e armazenamento comprometem a qualidade e ampliam as rejeições no mercado. Esses resultados corroboram estudos anteriores (Abiad & Meho, 2018; Kasso & Bekele, 2018; Lima & Oliveira, 2021), que identificam transporte e manuseio inadequados como causas diretas do desperdício, cujos efeitos se intensificam quando associados a condições climáticas adversas.

O manuseio também se destacou, com 130 ocorrências. Práticas inadequadas durante a movimentação e o armazenamento, como impacto físico e exposição em ambientes impróprios, foram apontadas como fatores diretamente associados ao aumento do desperdício de FV. Kasso e Bekele (2018) destacam que o desperdício na cadeia de suprimentos de FV pode ser causado por manuseio inadequado, operações de movimentação de carga e descarga, exposição inadequada para venda, excesso de oferta e baixa demanda. A utilização da cadeia do frio, por meio de câmaras frias, transporte refrigerado e embalagens adequadas, contribui para reduzir os níveis de desperdício ao longo da cadeia de suprimentos de FV (Kasso e Bekele, 2018).

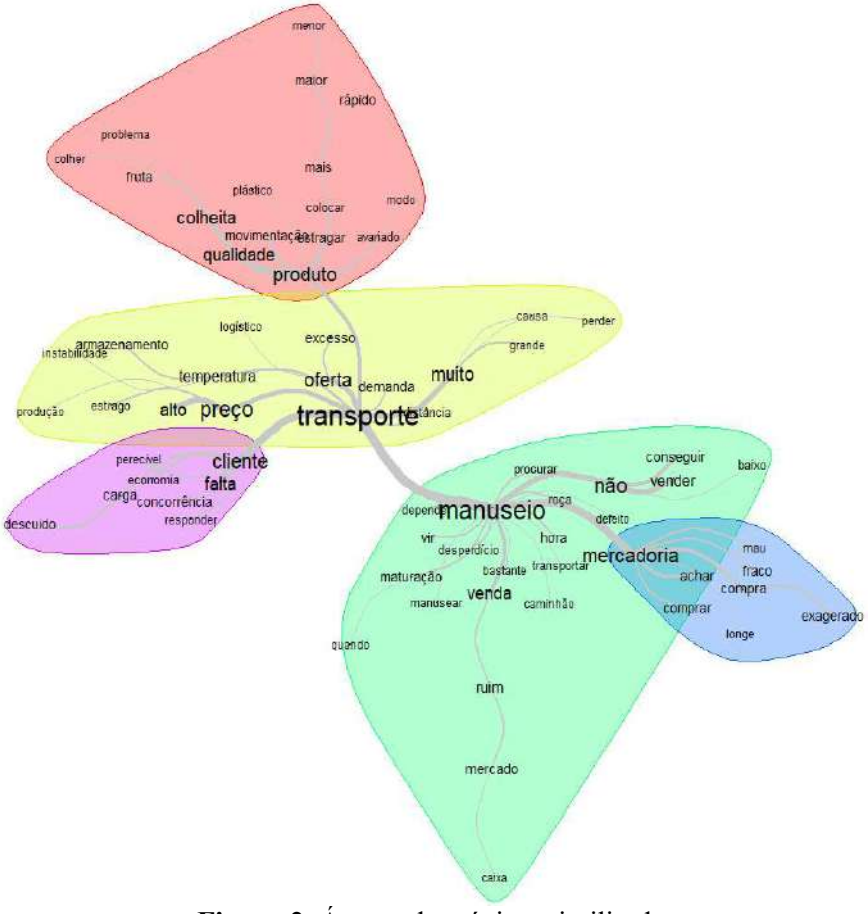


Figura 2: Árvore de máxima similitude

4. CONLUSÃO

As principais condutas em não conformidade associadas ao alto desperdício de FV nas CEASAs brasileiras estão fortemente associadas às práticas logísticas inadequadas, especialmente no que se refere ao transporte e ao manuseio dos produtos. Embora fatores climáticos também sejam apontados pelos comerciantes atacadistas como relevantes, observa-se que decisões operacionais ao longo da cadeia de suprimentos, como falhas no acondicionamento, armazenagem e movimentação, desempenham papel central no agravamento do desperdício. A análise lexical realizada com o apoio do software Iramuteq permitiu identificar padrões temáticos recorrentes, revelando a percepção dos atacadistas sobre os principais pontos críticos da logística de FV.

A conclusão reforça a necessidade de ações coordenadas entre os diferentes agentes da cadeia de suprimentos, com foco na capacitação dos envolvidos, na adoção de boas práticas logísticas e na promoção de uma cultura de responsabilidade compartilhada. Investimentos em infraestrutura, como transporte refrigerado, embalagens adequadas e câmaras frias, podem reduzir significativamente os níveis de desperdício. Além disso, é fundamental que os próprios comerciantes reconheçam seu papel no processo, contribuindo ativamente para a construção de sistemas de abastecimento mais eficientes, sustentáveis e alinhados às demandas da segurança alimentar.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) - Processo 403419/2021-2 e Processo 311191/2022-3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abiad, M. G. e Meho, L. I. (2018). Food loss and food waste research in the Arab world: a systematic review. *Food Security*, v.10, n. 2, p. 311–322. DOI: 10.1007/s12571-018-0782-7

Aldaco, R.; Hoehn, D.; Laso, J.; Margallo, M.; Ruiz-Salmón, J.; Cristobal, J.; Kahhat, R.; Villanueva-Rey, P.; Bala, A.; Batlle-Bayer, L.; Fullana-i-Palmer, P.; Irabien, A. e Vazquez-Rowe, I. (2020). Food waste management during the COVID-19 outbreak: a holistic climate, economic and nutritional approach. *Science of the Total Environment*, 742. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140524

Aversa, D.; Adamashvili, N.; Fiore, M.; Spada, A. (2023). Scoping Review (SR) via Text Data Mining on Water Scarcity and Climate Change. *Sustainability*, v. 15, n. 70. DOI: 10.3390/su15010070

Chaves, M. M. N.; Santos, A. P. R.; Santos, N. P.; Larocca, L. M. (2017). Use of the Software IRAMUTEQ in Qualitative Research: An Experience Report. In: Costa, A., Reis, L., Neri de Sousa, F., Moreira, A., Lamas, D. (eds) Computer Supported Qualitative Research. Cham: Springer, p. 39-48. DOI: 10.1007/978-3-319-43271-7_4

CONAB. (2024). Comercialização Total de Frutas e Hortaliças. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/hortigranjeiros-prohort (acesso 10/06/2025).

FAO (2023). The State of Food and Agriculture 2023. FAO. DOI: 10.4060/cc7724en

Huang, I. Y.; Manning, L.; James, K. L.; Grigoriadis, V.; Millington, A.; Wood, V. e Ward, S. (2021). Food waste management: A review of retailers' business practices and their implications for sustainable value. *Journal of Cleaner Production*, v. 285, 125484. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125484

Kasso, M. e Bekele, A. (2018). Post-harvest loss and quality deterioration of horticultural crops in Dire Dawa Region, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 17, n. 1, p. 88–96. DOI: 10.1016/J.JSSAS.2016.01.005

Lima, D. M. e Oliveira, A. L. R. (2021). Waste assessment in distribution and marketing logistics of horticultural products: evidence from Brazil. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, v. 53, n. 1, p. 207–219. DOI: 10.48162/rev.39.020

Perry, G. T. e Krippendorff, K. (2013). On the reliability of identifying design moves in protocol analysis. *Design Studies*, v. 34, n. 5, p. 612–635. DOI: 10.1016/j.destud.2013.02.001

UNEP (2024). *Food Waste Index Report 2024. Think Eat Save: Tracking Progress to Halve Food Waste*. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45230 (acesso 10/03/2025).

Dag Mendonça Lima (limadm@unicamp.br)
Luiz Fernando Ferreira da Silva Neto (l240469@dac.unicamp.br)
Andréa Leda Ramos de Oliveira (aleda@unicamp.br)
LOGICOM, FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas
Av. Cândido Rondon, 501 - Barão Geraldo 13083-875 - Campinas/SP

ESTRATÉGIAS PARA A MITIGAÇÃO DO DESPERDÍCIO DE FRUTAS E VEGETAIS: UMA CONTRIBUIÇÃO DE INDICADORES ASSOCIADOS À CADEIA DE SUPRIMENTOS

Dag Mendonça Lima, Andréa Leda Ramos de Oliveira
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

RESUMO
O desperdício de frutas e vegetais compromete a segurança alimentar, gera perdas econômicas e afeta a sustentabilidade dos sistemas agroalimentares. Este estudo teve como objetivo avaliar se a combinação de boas práticas logísticas pode mitigar o desperdício em Centrais de Abastecimento (CEASAs). Foram aplicados questionários aos atacadistas de sete produtos em sete CEASAs brasileiras. A partir da análise de 17 variáveis, foi aplicada uma técnica de mineração de dados com o algoritmo Apriori para identificar regras de associação entre práticas adotadas e os níveis de desperdício. Os resultados indicam que determinadas combinações logísticas, como uso de câmara fria, classificação e reclassificação dos produtos, uso de embalagens adequadas, aplicação de preços promocionais e controle do desperdício, estão fortemente associadas ao baixo desperdício, com confiança igual ou superior a 0,94. Conclui-se que a adoção simultânea dessas práticas contribui para a redução do desperdício ao longo da cadeia de suprimentos.

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 30% das frutas e vegetais (FV) produzidos globalmente não são consumidos devido à perda da qualidade ao longo dos canais de distribuição (HLPE, 2014). O crescente aumento da população, o aumento de indivíduos em situação de fome, os custos ambientais e econômicos associados às perdas e ao desperdício de alimentos aumentaram a conscientização de gestores públicos e privados sobre as perdas e o desperdício de alimentos.

A questão do desperdício de alimentos afeta toda a cadeia de suprimentos de frutas e vegetais nos mercados atacadistas pois, para além de impactar negativamente a sustentabilidade da cadeia de suprimentos, reduzem a oferta de alimentos, geram receitas menores para os produtores rurais e comerciantes, aumentam os preços para os consumidores finais e apresentam efeito negativo sobre o meio ambiente pela utilização não sustentável dos recursos naturais. Por tudo isso, o enfrentamento, o entendimento do desperdício e de suas causas é fundamental para mitigar o desperdício de alimentos, a redução dos níveis de desnutrição e da fome globalmente (HLPLE, 2014).

A identificação dos pontos críticos nas cadeias de suprimento de frutas e vegetais associados ao desperdício pode contribuir significativamente para a redução do desperdício, o que permitiria a médio e a longo prazo a adoção de práticas sustentáveis e eficientes, refletindo em benefícios econômicos e ambientais para os produtores agrícolas e comerciantes atacadistas (Cunha, 2015).

A comercialização de FV, tradicionalmente realizada por produtores, comerciantes atacadistas e varejistas, passa por contínuos e sistemáticos processos de adequação, com ajustes frequentes na cadeia logística e que podem ser percebidos pela conexão direta dos grandes varejistas com os produtores. A maioria dos comerciantes atacadistas de frutas e vegetais está concentrada nas Centrais de Abastecimento (CEASAs), que exercem um papel central na organização do mercado ao reunir a maior parte da oferta, organizar as relações comerciais e oferecer serviços especializados (Cunha, 2015).

Entre 2017 e 2023, as CEASAs vinculadas à CONAB comercializaram aproximadamente 111 milhões de toneladas de frutas e vegetais. As maiores concentrações de volume ocorreram nas regiões Sudeste e Nordeste, não apenas devido à alta densidade populacional, mas também em razão da infraestrutura logística consolidada, presença de polos industriais e conectividade intermodal mais eficiente, o que reforça a formação de hubs logísticos em áreas com estrutura de fluxo operacional, além da demanda (Etemadnia et al., 2013). Isto posto, o objetivo da pesquisa é avaliar se a combinação de boas práticas na cadeia de suprimentos de frutas e vegetais são capazes de mitigar o desperdício.

O estudo se justifica pela relevância do desperdício de frutas e vegetais que afeta a oferta e a disponibilidade de alimentos, a economia e o meio ambiente. Contribui para a literatura ao analisar importantes CEASAs brasileiras e aplicar técnicas de mineração de dados para identificar práticas logísticas e comerciais associadas à redução do desperdício.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição dos dados

Foram aplicados questionários aos comerciantes atacadistas de alface, banana, batata, laranja, mamão, melancia e tomate em sete CEASAs: Belém (PA), Campinas (SP), Fortaleza (CE), Curitiba (PR), Goiânia (GO), Paulo Afonso (BA) e Santo André (SP). A escolha dos produtos considerou sua participação no consumo alimentar nacional, conforme a última Pesquisa de Orçamentos Familiares – POF 2017-2018, e sua relevância na comercialização nos mercados de abastecimento do Brasil (CONAB, 2022). As unidades foram selecionadas por sua importância regional em volume físico e financeiro transacionado (CONAB, 2022).
Após a consolidação do banco de dados, foram consideradas 17 variáveis logísticas, operacionais e comerciais, relacionadas às práticas adotadas pelos atacadistas. Essas variáveis estão apresentadas e descritas na Tabela 1, de acordo com Lima et al. (2022).

Tabela 1: Descrição das variáveis coletadas junto aos comerciantes atacadistas da CEASA-Campinas e utilizadas para as análises.

Variável	Descrição
Ter operações de manipulação na comercialização	Verificar se há procedimentos de avaliação da qualidade dos produtos comercializados.
Praticar operação de transbordo	Verificar se são realizadas operações de transbordo.
Comercializar em embalagem	Verificar se são utilizadas embalagens na comercialização.
Tipo de controle dos produtos que adquire	Verificar se há controle de qualidade nos produtos adquiridos.
Fornecer embalagem	Verificar se há o fornecimento de embalagens.
Fazer operações de classificação e reclassificação durante a comercialização	Verificar se são realizadas operações de classificação e/ou reclassificação.
Ter câmara fria	Verificar a utilização de câmara fria.
Fazer tratamento pós-colheita	Verificar se são aplicados tratamentos pós-colheita (ex.: cera, fungicidas, secagem).
Tipo de transporte	Verificar o tipo de transporte utilizado nas operações.
Realizar prestação de serviço	Verificar se há prestação de serviços ao cliente (consignação dos produtos, expositores, entre outros).
Preço promocional	Verificar se são praticados preços promocionais.
Acompanhar o movimento dos preços	Verificar se há acompanhamento sistemático da movimentação de preços.
Fazer compras mediante contrato	Verificar se as compras são realizadas mediante contrato formal.
Comprar por oportunidade	Verificar se há compras realizadas por oportunidade.
Dar destino aos produtos não comercializados	Verificar se os excedentes não comercializados são destinados à doação ou ao reaproveitamento e não à destinação para aterros sanitários.
Controle de desperdício	Verificar se há controle sistemático do desperdício.
Ter produtor ou fornecedor fixo	Verificar se os produtos são fornecidos por produtores ou fornecedores fixos.

2.2. Análise dos Dados

A análise do desperdício de FV das CEASAs foi realizada por meio de mineração de dados, utilizando o algoritmo Apriori para extrair regras de associação que evidenciem relações entre variáveis e baixos índices de desperdício. O algoritmo opera de forma iterativa, gerando e avaliando conjuntos frequentes de itens a fim de identificar padrões relevantes no banco de dados. O objetivo dessa abordagem foi revelar padrões relevantes e recorrentes que ocorrem simultaneamente nas transações observadas. Em geral, temos: X (antecedente) ⇒ Y (consequente), em um banco de dados de transações t.

O processo de extração de regras de associação foi inicialmente apresentado em (Agrawal et al., 1993) como uma técnica que encontra relacionamentos entre a ocorrência de itens em transações de uma base de dados. Seja $I = \{i_1, i_2, \ldots, i_n\}$ um conjunto de literais, denominados itens. Um conjunto $X \subseteq I$ é chamado de itemset. Um itemset X com k elementos é chamado de itemset k. Seja D uma base de dados com transações t que envolvem

elementos que são subconjuntos de I. A transação t suporta um itemset X se $X \subseteq t$. Uma regra de associação é uma expressão da forma X→Y, onde X e Y são itemsets (Agrawal et al., 1993).

Na mineração de dados, o suporte indica a frequência relativa das regras e sua aplicabilidade, sendo mais relevantes aquelas com valores elevados (Fayyad et al., 1996). A confiança expressa o poder preditivo da regra, destacando-se qualitativamente quando apresenta altos níveis, ao indicar maior certeza na ocorrência do consequente a partir do antecedente (Fayyad et al., 1996). Na modelagem realizada, o desperdício foi definido como variável meta e as 17 variáveis analisadas como preditoras. Foram adotados suporte mínimo de 0,15, confiança de 0,9 e extração de 10 regras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados permitiu a identificação de um conjunto de práticas realizadas pelos comerciantes atacadistas e o baixo desperdício. As regras com consequente "baixo desperdício" apresentaram níveis elevados de confiança (≥ 0,94), indicando que determinadas combinações de práticas logísticas, operacionais e comerciais estão fortemente associadas à redução das perdas nas centrais de abastecimento analisadas. Essas regras evidenciam que o desperdício de frutas e vegetais tende a ser menor quando determinadas práticas são adotadas de forma conjunta. Entre elas, destacam-se a disponibilidade de câmaras frias, a realização de processos de classificação e reclassificação dos produtos, o uso de embalagens adequadas, o controle sistemático do desperdício e a aplicação de estratégias comerciais, como a oferta de preços promocionais e o monitoramento contínuo da movimentação de preços. A combinação dessas ações contribui para uma gestão mais eficiente ao longo da cadeia de suprimentos, refletindo diretamente na redução do desperdício. (Tabela 2).

Tabela 2: Regras de associação geradas a partir do algoritmo Apriori para todas as instâncias com suporte a 0.3.

Regra	Descrição da Regra {A,B} → C	Confiança
1	{Possui Câmara Fria, Operações de Classificação e reclassificação, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício, Acompanha a movimentação do Preço} → Baixo desperdício	0.96
2	{Possui Câmara Fria, Carga Paletizada, Operações de Classificação e reclassificação, Tipo de Embalagem, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício, Acompanha a movimentação do Preço} → Baixo desperdício	0.96
3	{Possui Câmara Fria, Operações de Classificação e reclassificação, Tipo de Embalagem, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício} → Baixo desperdício	0.95
4	{Possui Câmara Fria, Operações de Classificação e reclassificação, Tipo de Embalagem, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício, Acompanha a movimentação do Preço} → Baixo desperdício	0.95
5	{Possui Câmara Fria, Carga Paletizada, Operações de Classificação e reclassificação, Tipo de Embalagem, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício, Acompanha a movimentação do Preço, Preços Promocionais} → Baixo desperdício	0.95
6	{Tipo de Embalagem, Carga Paletizada, Possui Câmara Fria, Operações de Classificação e reclassificação, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício} → Baixo desperdício	0.95
7	{Possui Câmara Fria, Operações de Classificação e reclassificação, Tipo de Embalagem, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício, Carga Paletizada} → Baixo desperdício	0.95
8	{Tipo de Embalagem, Tratamento Prévio, Carga Paletizada, Possui Câmara Fria, Operações de Classificação e reclassificação, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício} → Baixo desperdício	0.95
9	{Tipo de Embalagem, Carga Paletizada, Realiza Preços Promocionais, Tem Controle do Desperdício} → Baixo desperdício	0.95
10	{Possui Câmara Fria, Carga Paletizada, Tipo de Embalagem, Realiza Preços Promocionais, Acompanha a movimentação do Preço, Preços Promocionais} → Baixo desperdício	0.94

Das 17 práticas possíveis realizadas pelos comerciantes atacadistas na cadeia, nove delas se destacaram. Seis práticas estão presentes em sete das regras associadas ao baixo desperdício: (1) ter câmara fria, (2) realizar operações de classificação e reclassificação, (3) realizar preços promocionais, (4) realizar o controle do desperdício, (5) tipo de embalagem e (6) carga paletizada.

O uso do transporte refrigerado é um atributo importante para a logística, pois em condições de temperaturas controladas é possível trafegar maiores distâncias, sem com isso penalizar a qualidade do produto. Entretanto, essa configuração, quando vista sob a ótica da sustentabilidade, nem sempre é a melhor, afinal, quilômetros rodados se traduzem em maior emissão de poluentes e maiores custos econômicos.

O uso de embalagens adequadas e de cargas paletizadas para cada tipo de fruta e vegetais contribui para mitigar o desperdício. As embalagens de papelão, por exemplo, apresentam-se como uma alternativa mais sustentável por serem de uso único e posteriormente destinadas à reciclagem. Além disso, por suportarem volumes menores, reduzem a necessidade de reembalagem, como ocorre com a batata, frequentemente transportada em sacarias de 50 kg e, em alguns casos, redistribuída em unidades de 25 kg durante a descarga. Situação semelhante é observada no caso do tomate, que chega em caixas plásticas, mas eventualmente é transferido para outras embalagens menores. Segundo Müller e Schmid (2019), dependendo da embalagem, processos biológicos, químicos ou físicos podem ocorrer, levando à deterioração do produto, muitas vezes difíceis de serem avaliados pelos consumidores, portanto, sistemas de embalagem adequados têm grande potencial de crescimento para uso em frutas e vegetais.

A cadeia de frio é uma prática consolidada (Chaudhuri et al, 2018) associada à maior estabilidade das fisiológica de vegetais frescos, principalmente frutas, sendo um recurso tecnológico eficiente para retardar processos fisiológicos associados à degradação de frutas e vegetais. Qualquer inadequação na cadeia de frio causa danos irreversíveis à qualidade do produto, portanto, o monitoramento e a manutenção da temperatura são essenciais para evitar desperdícios.

A prática de preços promocionais permite que o comerciante atacadista acompanhe a movimentação de preços do mercado e mantenha seu produto comercialmente atraente, adaptando-o ao novo nível comercial. Esta é uma prática amplamente explorada para evitar desperdício de alimentos (Lebersorger e Schneider, 2014). Alimentos ainda seguros para consumo, mas não vendidos, podem ser destinados a entidades de assistência social. Alimentos na CEASA Campinas, quando não podem mais ser vendidos, são enviados ao Instituto de Solidariedade para Programas de Alimentação - ISA.

Na comercialização de tomates e laranjas, é comum o uso de embalagens apropriadas, como caixas plásticas, de papelão e sacos de malha, além da realização de tratamentos pós-colheita em packing houses. Já a alface apresenta uma logística distinta, sendo majoritariamente comercializada por pequenos ou médios produtores que também atuam como atacadistas. Nesses casos, a principal estratégia para reduzir o desperdício é o monitoramento de preços e a adoção de promoções ao final do período de venda, prática consolidada segundo Kotler & Keller (2016).

As centrais de abastecimento são responsáveis por cerca de 85% da comercialização da batata de mesa no Brasil, produto vendido in natura e lavado, o que reduz sua vida útil. A predominância de sacos de 50 kg (90%) dificulta o controle de qualidade e causa danos tanto ao produto quanto aos manipuladores (Kaguongo et al., 2014). No caso do mamão, a maioria dos atacadistas utiliza embalagens tipo K, com menor uso de embalagens plásticas ou de papelão. A cadeia se caracteriza por aquisições oportunísticas baseadas em preço, e o transporte é feito, majoritariamente, em caminhões de carroceria aberta, sem refrigeração, o que acelera a maturação e a deterioração do produto (Santos et al., 2020).

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar se a combinação de boas práticas logísticas poderia mitigar o desperdício em Centrais de Abastecimento (CEASAs). Para isso, foram analisadas 17 variáveis relacionadas às dimensões logística, operacional e comercial, aplicando-se o algoritmo Apriori em sete unidades de abastecimento.

Os resultados indicam que a redução do desperdício de frutas e vegetais nas CEASAs está fortemente associada à adoção conjunta de boas práticas logísticas, operacionais e comerciais. As regras de associação, com índices de confiança superiores a 0,94, mostraram que ações como o uso de câmaras frias, a classificação e reclassificação dos produtos, a utilização de embalagens adequadas, o monitoramento sistemático das perdas e a aplicação de estratégias promocionais estão diretamente ligadas a menores níveis de desperdício. Esses achados reforçam a importância de uma gestão qualificada da comercialização como condição essencial para a construção de cadeias de suprimentos mais sustentáveis e resilientes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil

(CNPq) - Processo 403419/2021-2 e Processo 311191/2022-3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, R., Imieliński, T., Swami, A., Imielinski, T., & Swami, A. (1993). Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. In ACM SIGMOD Record (Vol. 22, Issue 2). https://doi.org/10.1145/170036.170072

Agrawal, R., & Srikant, R. (1994). Fast Algorithms for Mining Association Rules. 20th VLDB Conference, 487–499. https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ICSESS.2014.6933618

Chaudhuri, A., Dukovska-Popovska, I., Subramanian, N., Chan, H. K., & Bai, R. (2018). Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review. International Journal of Logistics Management, 29(3), 839–861. https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2017-0059

CONAB. (2022). Conab - Prohort. https://www.conab.gov.br/info-agro/hortigranjeiros-prohort?view=default

Cunha, A. R. A. de A. (2015). Dimensionando o passeio das mercadorias. Uma análise através dos dados do Prohort. Revista de Política Agrícola, 24(4), 55–63. Disponível em: https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1055/980 (acesso em 07/07/2025).

Etemadnia, H., Hassan, A., Goetz, S., & Abdelghany, K. (2013). Wholesale Hub Locations in Food Supply Chains. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2379(1), 80–89. https://doi.org/10.3141/2379-10

Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Magazine, 17(3), 37–54. Disponível em: https://ojs.aaai.org/aimagazine/index.php/aimagazine/article/view/1230 (acesso em 07/07/2025).

HLPE (2014). Food Losses and Waste in the Context of sustainable food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. In FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (Issue June). Disponível em: www.fao.org/cfs/cfs-hlpe (acesso em 07/07/2025).

Kaguongo, W., Maingi, G., Barker, I., Nganga, N., & Guenthner, J. (2014). The Value of Seed Potatoes from Four Systems in Kenya. American Journal of Potato Research, 91(1), 109–118. https://doi.org/10.1007/s12230-013-9342-z

Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). Marketing Management. In 15th (Ed.), *Marketing Management* (Vol. 23, Issue 2). Pearson Education.

Lima, D. M., Marsola, K. B., Oliveira, A. L. de, & Belik, W. (2022). Estratégias para reduzir o desperdício de frutas e hortaliças: a busca por sistemas atacadistas sustentáveis. Horticultura Brasileira, 40(3), 334–341. https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20220313

Lebersorger, S., & Schneider, F. (2014). Food loss rates at the food retail, influencing factors and reasons as a basis for waste prevention measures. Waste Management, 34(11), 1911–1919. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2014.06.013

Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent Packaging in the Food Sector: A Brief Overview. Foods, 8(1), 16. https://doi.org/10.3390/foods8010016

Santos, S. F. dos, Cardoso, R. de C. V., Borges, Í. M. P., Almeida, A. C. e, Andrade, E. S., Ferreira, I. O., & Ramos, L. do C. (2020). Post-harvest losses of fruits and vegetables in supply centers in Salvador, Brazil: Analysis of determinants, volumes and reduction strategies. Waste Management, 101, 161–170. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.007

Singh, D., & Sharma, R. R. (2018). Postharvest Diseases of Fruits and Vegetables and Their Management. In Postharvest Disinfection of Fruits and Vegetables (pp. 1–52). Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812698-1.00001-7

Dag Mendonça Lima (limadm@unicamp.br)
Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação - NEPA|UNICAMP
Andréa Leda Ramos de Oliveira (aleda@unicamp.br)
Laboratório de Logística e Comercialização Agroindustrial - LOGICOM - FEAGRI|UNICAMP
Av. Cândido Rondon, 501 - Barão Geraldo 13083-875 - Campinas/SP

LOCALIZAÇÃO DE UM *CLUSTER* DE TRANSPORTES: O CASO DA RM DE GOIÂNIA

Mateus Silva das Neves[1], **Lucas Thixbai Freitas Fraga**[2], **Cristiano Farias Almeida**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás, [2]Superintendência da Educação Profissional.

RESUMO
O artigo apresenta um tipo de aglomeração denominado *cluster* logístico, considerado neste trabalho como um exemplo detalhado de polo de desenvolvimento. Como na teoria dos polos, estes geram economias externas, assume-se, como hipótese, que só será possível localizar um *cluster* logístico em determinada região se houver economias externas no setor de transportes - visto a importância dada a área de transporte e logística no tipo de polo de desenvolvimento proposto – em uma região, que no presente estudo é a Região Metropolitana de Goiânia (RMG). Isso porque foi detectado anteriormente pelo PDUI da RMG a necessidade de melhoria da divisão territorial do trabalho na região. Através da aplicação de um modelo econométrico com métricas para identificação das externalidades em relação ao número de empregos em transportes (por isso é considerado na pesquisa como *cluster* de transportes). Assim, conclui-se, pelo trabalho, haver possibilidade de localização de um *cluster* logístico na RMG.

1. INTRODUÇÃO

Um polo de crescimento, de acordo com Perroux (1964), ocorre devido ao surgimento de uma indústria motriz, na qual a mesma dinamiza a economia regional e tem um crescimento mais elevado do seu produto do que o crescimento médio do produto nacional. Já um polo de desenvolvimento gera efeitos de expansão e aglomeração como a reunião de atividades complementares geradoras de uma conjuntura cumulativa de ganhos e custos localizada. Isto é, além do crescimento de uma região de determinadas atividades econômicas (como a indústria motriz), tem-se o surgimento de atividades satélites que, conforme Souza (2005), fornece insumos para a atividade principal. Nesse sentido, estudos sobre configurações de concentrações geográficas de empresa corroboram com o conceito.

Dentre as aglomerações produtivas, o cluster logístico possui características específicas que se aproximam do conceito de polo de desenvolvimento, uma vez que apresenta as características de um cluster - este se consiste, segundo Porter (1990), em uma concentração geográfica de empresas e instituições interligadas a ramos da indústria, que se complementam em relações conjuntas de intercâmbio e atividades ao longo de uma ou várias cadeias de criação de valor - além de considerar, conforme Sheffi (2010), serviços e infraestruturas de transporte e logística, dentre outras atividades que subsidiam a atividade principal. Além disso, Almeida *et al.* (2021), por meio da aplicação de uma metodologia - baseada na Ontologia e na Modelagem Estrutural Interpretativa – em Wallonia identifica alguns gargalos a serem controlados com o tempo para manter a eficácia do *cluster* logístico: visão clara do futuro do *cluster*; identificação de polos competitivos na região; competição local entre as empresas; fomentadores legítimos e redes fortes presentes na aglomeração.

A partir disso, tem-se que os ramos da indústria e a cadeia de criação de valor seria aquela composta pela indústria motriz e as atividades satélites seriam as empresas nas quais complementam e se interagem ao longo da cadeia. Os serviços de logística e transporte são um exemplo de atividades que atendem tais indústrias motrizes. A partir disso, pode-se convencionar o *cluster* logístico como um exemplo detalhado do polo de desenvolvimento.

Seguindo o raciocínio, uma aglomeração produtiva (entendida como um polo) – sendo o *cluster* logístico um exemplo - gera economias externas, conforme observado por Marshall (1920), das quais vem sendo estudadas ao longo do tempo, tendo ganhado força com pesquisadores da Nova Geografia Econômica através de estudos como o de Krugman (1991), iniciando um campo de pesquisa no qual há pesquisas inclusive no Brasil relacionadas aos efeitos de atividades econômicas produtivas em determinadas regiões. Desse modo, é possível utilizar métricas usadas para esse fim com o intuito de identificar setores motrizes (esta palavra advém da caracterização de polos de desenvolvimento) em regiões com o intuito de verificar potencialidades para a escolha da localização de um *cluster* logístico. Isso é semelhante ao apontado por Rivera, Sheffi e Welsch (2014), no qual o estudo identificou uma tendência de empresas de transporte e logística se agruparem em determinadas áreas.

O presente estudo, portanto, surge de hipóteses de que: 1) sem o setor de transportes (ainda que a palavra

logístico envolva algo além dos transportes), não há *cluster* logístico; 2) é necessário identificar economias externas, isto é, efeitos de *clusterização*, voltados ao setor de transportes na região a qual se deseja instalar a aglomeração produtiva. Para tanto, será utilizado a expressão "*cluster* de transportes".

Em estudo de Neves *et al.* (2025), foi identificado um município da região em questão como aquele com maior potencial para instalação de um *cluster* logístico voltado para a cadeia do tomate. Tal trabalho, entretanto, já parte da definição prévia de um setor para a instalação da aglomeração. A metodologia da presente pesquisa permite testar a viabilidade de determinado setor produtivo na região – tendo como fundamentação as economias externas - em questão e comparar com os demais para, assim, definir o melhor. Da mesma forma que a aplicação neste experimento é voltada ao setor de transportes, pode-se realizar a aplicação para qualquer setor produtivo. Assim, busca-se aumentar as possibilidades de pesquisa na literatura voltada aos *clusters*.

Tal fundamentação será aplicada à Região Metropolitana de Goiânia (RMG), área de estudos do artigo. A região em questão é composta por 21 municípios e foi instituída pela Lei Complementar nº 27/1999 (Goiás, 1999) e alterada pela Lei nº 54/2005 (Goiás, 2005). O último Plano de Desenvolvimento Integrado da região (RMG, 2017) aponta uma baixa divisão territorial do trabalho provenientes das diferenças econômicas dentro dessa área, de forma a transformar certos núcleos urbanos em cidades-dormitórios.

A partir do exposto, tem-se a possibilidade utilizar um *cluster* de transportes enquanto polo de desenvolvimento para que este posso vir a ser utilizado como um instrumento para redução da divisão territorial do trabalho na região em questão. Nesse sentido, primeiramente é necessário verificar se é viável esse tipo de aglomeração na RMG. E esse é o objetivo do estudo, partindo das hipóteses citadas.

2. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo terá como principal método a aplicação de um modelo econométrico. Sabendo que a econometria em si aplica estatística em teorias econômicas. O modelo a ser aplicado na pesquisa será utilizado para identificar economias externas de dois tipos: de localização; de urbanização. O primeiro tipo foi muito descrito nos trabalhos de Marshall (1920) e em toda uma literatura econômica posterior e se refere a benefícios da especialização de atividades produtivas, tanto em concentração de estabelecimentos em setores semelhantes quanto de trabalhados desse setor, podendo ainda gerar troca de informações e posterior inovação internamente. Já as economias de urbanização foram principalmente descritas por Jacobs (1969), no qual a concentração de atividades diferentes é o que gera o transbordamento de conhecimentos e a incorporação de trabalhos novos aos antigos.

A partir desse contexto, trabalhos como os de Fingleton, Igliori e Moore (2005), Alves e Silveira Neto (2011) e Neves (2022) trazem investigações semelhantes por meio de modelos econométricos e foram utilizadas como base para a montagem do modelo econométrico. Além disso, cabe destacar algumas medidas utilizadas no trabalho para estudo das economias externas as quais entram no modelo. Tais formulações foram encontradas com o auxílio de trabalhos como de Galliano *et al.* (2015), Antunes-Ferreira *et al.* (2018), Begnini e Carvalho (2021); Ferreira e Cirino (2013).

Tabela 1: Medidas utilizadas para a análise de economias externas.

Métricas	Formulação
Quociente Locacional (QL)	$QL = \frac{E_{ij}/E_j}{E_{in}/E_n}$
Herfindahl (HH)	$HH = \sum_{i=1}^{k} (p_i)^2$

No qual:
E_{ij} = Número de empregos do setor i no município/região j;
E_j = Número total de empregos no município/região j;
E_{in} = Número de empregos do setor i em toda a área considerada;

E_n = Número total de empregos em toda a área considerada;
p_i = Participação (em decimal) do setor i no mercado.

Além disso, como forma de tentar verificar o fluxo de conhecimento nos setores, tem-se o Esforço inovantivo na equação (1). Assim, é possível verificar as relações desse indicador com o setor de transportes para testar sua significância estatística. Esta equação se baseia em indicadores utilizados na literatura, como nos trabalhos de Silva (2017) e Paranhos *et al.* (2020).

$$Esf.Inov. = \frac{(P.em\ P\&D * disp)}{E.I} \quad (1)$$

No qual:

- $Esf.Inov.$ – Esforço inovativo por empresa em Goiás;
- $P.em\ P\&D$ – Pessoal em P&D;
- $disp$ – Dispêndio em atividades inovadores;
- $E.I$ – Quantidade de empresas inovadoras.

Além disso, será utilizado uma métrica oficial como o Valor Adicionado Bruto (VAB) real per capita tanto para a indústria quanto para os serviços. Será usado ainda o número de empregos do setor de transportes como variável dependente e a quantidade de estabelecimentos em tal setor como uma das variáveis de controle. Assim, tendo introduzido as principais métricas a ser utilizada no modelo econométrico, apresenta-se este por meio da equação (2).

$$\log empr. = \beta_0 + \beta_1 \log MC^2 + \beta_2 \log HH + \beta_3 \log Esf.inov.^2 + \beta_n\ log\ X + \varepsilon \quad (2)$$

Em que:

- $\log empr.$ – Logaritmo do Número de empregos em cada setor;
- β_i – Coeficientes estimados para a equação da equação, i = 0, 1, 2...;
- $\log MC^2$ – Logaritmo do quadrado de medidas de intensidade de *clusterização*: utiliza-se as opções a métrica do quociente locacional;
- $\log HH$ – Logaritmo do índice de Herfindal;
- $\log Esf.inov.^2$– Logaritmo do quadrado do esforço inovativo;
- $log\ X$ – Logaritmo das variáveis de controle:
  - Quantidade de estabelecimentos industriais presentes em cada setor;
  - Valor Adicionado Bruto real per capita dos setores industriais e de serviços;

Nota-se que foram aplicados logaritmo às variáveis. O objetivo disso foi linearizar a equação e suavizar as curvas para que fosse possível obter melhores conclusões com o modelo. Esse modelo foi aplicado no *software* gretl. A base de dados utilizadas foi principalmente por meio da RAIS-MTE. Além disso, foram utilizados o SIDRA, do IBGE e a PINTEC. Em relação aos dados do setor de transportes, trata-se dos subsetores da classificação IBGE "Materiais de Transportes" e "Transportes e Comunicações". Muito em virtude dessa forma de coleta do setor, o presente trabalho está se referindo a aglomeração como um *cluster* transportes.

3. RESULTADOS

Como a atividade de transportes é um serviço, ao se utilizar do Valor Adicionado Bruto, deve se valer do VAB de serviços nas análises. Isso é importante ao aplicar a equação (2). Desse modo, tem-se o modelo de Mínimos Quadrados Ponderados apresentado na tabela 2 para caracterizar os 21 municípios entre 2002 e 2022 em tais variáveis. Trata-se de resultados nos quais os testes de normalidade dos resíduos e o de dependência de corte transversal não apresentam quaisquer indicativo de algo que torne o modelo inadequado. Foi testado ainda o mesmo modelo mas substituindo o VAB de serviços pelo VAB industrial. Tal ação tem o intuito de verificar a relação do setor de transportes com a indústria. Os resultados podem ser expressos na tabela 3. Com isso, faz-se a análise frente aos serviços - no qual os transportes fazem parte - e com a indústria de transformação, em que os transportes contribuem com a logística de cada uma das indústrias. Testa-se, assim, tais cenários a fim de verificar a presença de externalidades positivas em algum desses.

Tabela 2: Resultados do modelo quando considerados o VAB de serviços.

	Coeficiente	*Erro Padrão*	*razão-t*	*p-valor*	
Const	0,761789	0,207934	3,664	0,0003	***
l_estabtransp	1,08659	0,0135113	80,42	<0,0001	***
l_HHGoias	0,0896833	0,158226	0,5668	0,5711	
l_sq_MC	0,304857	0,0113867	26,77	<0,0001	***
l_sq_EsfInovativ	−0,0310242	0,0141010	−2,200	0,0283	**
l_VABservPcapita	0,254764	0,0368839	6,907	<0,0001	***

A interpretação da tabela 2 mostra que a única variável a não apresentar significância estatística é o índice de Herfindal. Percebe-se ainda a significância do MC bem como o esforço inovativo e o VAB de serviços. Isso revela que, na amostra em questão, os resultados indicam uma maior especialização, de forma que isso influencia no número de empregos gerados no setor de transportes e não há indícios de diversificação. Além disso, é possível notar a constante positiva e estatisticamente significante, no qual percebe-se a existência de resultados não observáveis dos quais estão presentes nessa. Já na tabela 3, percebe-se o esforço inovativo não sendo mais significante e o VAB industrial com menor nível de significância (p-valor > 0,05) em relação ao VAB de serviços da tabela 2. Isso mostra uma influência fraca da indústria na geração de empregos no setor de transportes. É possível notar, assim, um movimento especializado de *clusterização* do setor de transportes. Isso confirma a hipótese estabelecida para essa região de análise.

Tabela 3: Resultados do modelo quando considerados o VAB industrial.

	Coeficiente	*Erro Padrão*	*razão-t*	*p-valor*	
Const	1,49410	0,183048	8,162	<0,0001	***
l_estabtransp	1,13516	0,0129875	87,40	<0,0001	***
l_HHGoias	0,000976497	0,168011	0,005812	0,9954	
l_sq_MC	0,302714	0,0126238	23,98	<0,0001	***
l_sq_EsfInovativ	0,00314388	0,0135860	0,2314	0,8171	
l_VABindPcapita	0,0420687	0,0217161	1,937	0,0534	*

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nas análises econométricas demonstraram uma tendência à especialização no setor de transportes, indicando que esse segmento se organiza de forma concentrada, com baixo nível de diversificação interna. Com isso, tem-se um indicativo do potencial de um *cluster* de transportes na região analisada. Isso porque o resultado converge para tendências globais de empresas de transporte se agruparem nesses espaços buscando maximizar suas economias. Portanto, conforme o escopo estabelecido no presente artigo, é possível haver uma melhor divisão territorial do trabalho na Região Metropolitana de Goiânia.

É possível ainda utilizar o método do presente artigo para a comparação entre regiões diferentes para verificar qual das regiões obtiveram os melhores resultados. A partir disso, tem-se um melhor parâmetro para análise de localização para esse tipo de aglomeração produtiva. Pode-se utilizar também para comparação entre setores, de modo a verificar para qual setor seria voltado um determinado *cluster* pensado para a região. Nota-se, assim, diversas oportunidades de pesquisa para se seguir métodos semelhantes ao aplicado no presente artigo. Com isso, o trabalho se propõe a contribuir quanto a: métodos para localização industrial; aglomerações produtivas e polos de desenvolvimento; *cluster* logístico; economias externas. A partir principalmente dessas três vertentes, é possível que a literatura se desenvolva, principalmente voltada a obter informações para a Região Metropolitana de Goiânia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. F.; YAMASHITA, Y.; COOLS, M.; MARCHAL, J.; PIETTE, B. (2021). Methodology Focused on Identifying Variables Necessary to Develop Logistics Clusters. *Journal of Sustainable Development*, *14* (3), 147. https://doi.org/10.5539/jsd.v14n3p147.

ALVES, J. S; SILVEIRA NETO, R. M (2011). Impacto das externalidades de aglomeração no crescimento do emprego: o caso do cluster de confecções em Pernambuco. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 42, n. 2, p. 333-350.

ANTUNES-FERREIRA, C.; SANTOS-NATÁRIO, M.; MARTINS-BRAGA, A (2018). Análise e avaliação ao

funcionamento dos clusters em Portugal reconhecidos pelo QREN. *Economía Sociedad y Territorio*, Toluca, v. 18, n. 57, p. 585-620.

BEGNINI, S.; CARVALHO, C. E. Identificação de clusters industriais: um estudo quantitativo no estado de Santa Catarina. **INTERAÇÕES**, Campo Grande, v. 22, p. 489-512, Abr./Jul. 2021.

FERREIRA, A. S.; CIRINO, J. F (2013). Análise da estrutura do mercado brasileiro de caminhões, 1990-2010. *Textos de Economia*, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 11-32, Jul./Dez.

FINGLETON, B.; IGLIORI, D.; MOORE, B (2005). Cluster dynamic: new evidence and projections for computing services in great britain. *Journal of Regional Science*, [*s.l.*], v. 45, n. 2, p. 283-311.

GALLIANO, D.; MAGRINI, M-B.; TRIBOULET, P (2015). Marshall's versus Jacobs' externalities in firm innovation performance: The case of French industry. *Regional Studies*, Routledge, vol. 49, n. 11, p. 1840–1858.

GOIÁS. Governo do Estado de Goiás (1999). Lei Complementar Nº 27, de 30 de Dezembro de 1999. Cria a Região Metropolitana de Goiás, autoriza o poder executivo a instituir o Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Goiânia, a Secretaria Executiva e a constituir o Fundo de Desenvolvimento Metropolitano de Goiânia e dá outras providências correlatas. Goiás: Palácio do Governo do Estado de Goiás.

GOIÁS. Governo do Estado de Goiás (2005). Lei Complementar Nº 54, de 23 de Maio de 2005. Altera o CAPUT do Artigo 1º da Lei Complementar Nº 27, de 30 de Dezembro de 1999, que cria a Região Metropolitana, autoriza o poder executivo a instituir o Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Goiânia, a Secretaria Executiva e constituir o Fundo de Desenvolvimento Metropolitano e dá outras providências. Goiás: Palácio do Governo do Estado de Goiás.

JACOBS, J (1969). *The economy of cities***.** New York: Vintage Books.

KRUGMAN P. R (1991). Increasing returns and economic geography, *Journal of Political Economy*. 99, 483 – 499.

MARSHALL, A (1920). *Principles of Economics*: An introductory volume. Londres: Macmillan.

NEVES, M. S (2022). *Identificação de Economias Externas geradas com o advento de Aglomerações Produtivas: Um estudo na Região Metropolitana de Goiânia*. 2022. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro de Transportes) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia.

NEVES, M. S.; ALMEIDA, C. F.; SANTOS, A. M.. (2025). Análise Espacial para Identificação de Local para Implantação de um Cluster Logístico a partir de Variáveis Geoeconômicas para o Estado de Goiás/Brasil. *Revista Jatobá*, *7*. https://doi.org/10.5216/revjat.v7.81191.

PARANHOS, J.; HASENCLEVER, L.; CHAVES, G.; SANTOS, C.; PENNA, A (2020). Os esforços inovativos das grandes empresas farmacêuticas no Brasil: o que mudou nas duas últimas décadas? *Revista Brasileira de Inovação*, v. 19, p. 1-34. DOI: https://doi.org/10.20396/rbi.v19i0.8658367.

PERROUX, F (1968). *L'économie du siécleme XX*. 2ª. ed. Paris, Press Universitaires de France, France,.

PORTER, M. E. The competitive advantage of nations. *Competitive Intelligence Review*, v. 1, n. 1, p. 14-14, 1990.

RIVERA, L.; SHEFFI, Y.; WELSCH, R (2014). Logistics agglomeration in the US. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 59, p. 222-238.

SILVA, E. H. (2017). Taxonomia setorial com indicadores de esforço inovativo. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 16, n. 2, p. 331-358,. DOI: https://doi.org/10.20396/rbi.v16i2.8650540.

SHEFFI, Y (2012). *Logistics cluster*: delivering value and driving growth. Cambridge: The MIT Press., 356 p.

SHEFFI, Y (2013). Logistics-intensive clusters: global competitiveness and regional growth. In: BOOKBINDER, J. H. *Handbook of global logistics***.** New York: Springer , p. 463-500.

RMG (2017). *Plano de Desenvolvimento Integrado*. Região Metropolitana de Goiânia..

SOUZA, N. J (2005). *Desenvolvimento Econômico*. Editora Atlas S.A., 5ª. Edição revisada, São Paulo, Brasil.

LOGÍSTICA AGROINDUSTRIAL E GÊMEOS DIGITAIS: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Thayane Caroline Oliveira da Conceição, Matheus Araújo Maciel, Matheus Melo de Souza, Gleidisom Thyery Souza da Costa, Richardson Costa de Carvalho, Karina Braga Marsola, Andréa Leda Ramos de Oliveira
Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
O Brasil é protagonista na produção e exportação de grãos, mas ainda enfrenta desafios logísticos que comprometem sua competitividade internacional. Embora o país apresente vantagens produtivas, os gargalos logísticos impactam negativamente a eficiência da cadeia de suprimentos. Tecnologias como gêmeos digitais têm potencial para otimizar processos logísticos, especialmente o transporte. Este estudo teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica da literatura científica sobre o uso de gêmeos digitais na logística de grãos, com foco na otimização do transporte, utilizando a ferramenta *Bibliometrix*. Os resultados indicam que termos como *freight cost* e *grain logistics* não figuram como centrais nas publicações, apontando uma lacuna temática. O Brasil aparece apenas na sétima posição em número de publicações nesta temática, atrás de países como China, Estados Unidos e Índia. Dada a dinâmica logística singular do país, com fluxos e volumes continentais, há espaço para ampliar a produção científica nacional, desenvolvendo soluções alinhadas ao perfil e às particularidades da logística agroindustrial brasileira.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil é líder na produção de grãos como soja e milho, mas enfrenta limitações logísticas na distribuição. A infraestrutura de transporte, predominantemente rodoviária, não evoluiu no mesmo ritmo da produção agrícola. Esse descompasso gera ineficiências operacionais e eleva os custos logísticos (Silva et al., 2022). O déficit de armazenagem agrícola intensifica o *rush* de vendas no período da colheita. Isso força o escoamento rápido da produção, eleva os custos logísticos e reduz a competitividade internacional. (USDA, 2025). O custo com o frete representa um dos principais entraves à rentabilidade do agronegócio. Em algumas regiões, o custo interno de transporte ultrapassa o custo de exportação, o que distorce o mercado e desestimula a produção local (Asai *et al.,* 2020). A ausência de multimodalidade e a ineficiência da logística nacional contribuem para o chamado "Custo Brasil", que compromete as margens dos produtores e a competitividade do país no comércio internacional. Diante de gargalos estruturais como este, é preciso que tecnologias sejam exploradas para melhorar a eficiência logística. Nesse contexto, os gêmeos digitais (GDs) surgem como ferramentas estratégicas, pois permitem modelar rotas multimodais de escoamento da soja, simulando diferentes cenários de transporte (rodoviário, ferroviário, hidroviário) e avaliando seus impactos sobre custos de frete, tempo de transporte e emissões de carbono. Aliados a sensores, internet das coisas e inteligência artificial, os GDs possibilitam ainda simular, monitorar e otimizar cadeias logísticas em tempo real (Espinosa-Jaramillo *et al*., 2024). Aliados a sensores, internet das coisas e inteligência artificial, os GDs viabilizam planejamento preditivo, redução de custos, maior resiliência e decisões orientadas por dados (Lam *et al*., 2023). A integração de dados operacionais e financeiros nos GDs amplia a capacidade de avaliar *trade-offs* logísticos em diferentes cenários (Kim *et al*., 2025). Apesar do avanço na pesquisa internacional sobre GDs, sua aplicação no contexto da logística de grãos no Brasil ainda é incipiente. A literatura carece de estudos que abordem diretamente a redução do custo de frete no setor agrícola por meio dessa tecnologia (Bolfe *et al*., 2020).

Isto posto, este artigo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica da literatura científica sobre o uso de gêmeos digitais na otimização da logística de grãos, identificando tendências, lacunas e contribuições da pesquisa brasileira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa realizou um mapeamento bibliométrico da produção científica sobre o uso de gêmeos digitais e tecnologias de simulação aplicadas à logística agrícola. Os dados foram coletados manualmente na base de dados *Scopus*, com abrangência do período de 2000 a 2024. Utilizou-se uma estratégia de busca composta por combinações de termos relacionados ao tema central, incluindo: *Digital Twin, Simulation, Virtual Modeling, Cyber-Physical Systems, Smart Logistics, Freight Transport, Freight Cost, Logistics Cost, Transportation Costs, Logistics Optimization, Supply Chain Management, Agricultural Logistics, Grain Logistics, Bulk Transport, Soybean Transport, Agricultural Supply Chain, Agri-food Supply Chain, Decision Support Systems, Operational Efficiency e Transport Modeling.*

As análises foram conduzidas com a linguagem R, utilizando o pacote *bibliometrix* e sua interface gráfica *Biblioshiny*. As etapas compreenderam a importação, limpeza e estruturação dos dados bibliográficos. Em seguida, foram executadas análises descritivas e estruturais, incluindo produção anual de publicações, análise de palavras-chave, mapeamento temático, estrutura conceitual e redes de coocorrência. Além disso, foi utilizada a regressão segmentada para análise dos dados.

O mapeamento temático é uma análise visual e quantitativa da produção científica que busca identificar a dinâmica e as tendências de pesquisa em um domínio específico, revelando temas emergentes, consolidados ou em declínio (Moresi *et al*., 2019; Moraes e Souza, 2023). A estrutura conceitual, por sua vez, refere-se a um modelo abstrato que organiza e representa o conhecimento por meio da sistematização de conceitos e das relações semânticas entre eles, sendo fundamental para a recuperação eficiente da informação (Brascher e Café, 2008; Brascher e Café, 2013). Já as redes de coocorrência são técnicas bibliométricas que analisam o aparecimento conjunto de palavras em textos científicos (como títulos, resumos ou palavras-chave) para inferir relações conceituais e temáticas, refletindo o conteúdo de um *corpus documental* (Urbizagástegui-Alvarado, 2022). Em conjunto, essas ferramentas permitem uma compreensão aprofundada da pesquisa, identificando tendências, lacunas e oportunidades de colaboração, otimizando a gestão e a descoberta do conhecimento (Gerotti Franco e Faria, 2019). E por fim, a regressão segmentada é utilizada para modelar relações que apresentam mudanças estruturais, permitindo estimar diferentes inclinações e interceptos entre segmentos de dados, identificar pontos de mudança e avaliar efeitos imediatos ou graduais ao longo do tempo ou de um contínuo explicativo (Muggeo, 2003; Taljaard *et al.*, 2014; Nakajima; Ninomiya, 2025).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A base final contou com 5.725 artigos extraídos da base *Scopus* (2000–2024), após remoção de 858 duplicatas e exclusão de documentos não classificados como artigos.

A análise de regressão segmentada indicou que o ponto de inflexão na tendência de crescimento das publicações ocorreu no final de 2019 (2019,65 ± 0,25). Até esse momento, o crescimento anual era relativamente moderado, com uma inclinação média de 13,52 publicações por ano. Após o ponto de inflexão, observou-se um aumento acentuado na taxa de crescimento, com uma variação positiva de 263,38 unidades, resultando em uma inclinação total de aproximadamente 276,90 publicações anuais no período subsequente. O modelo ajustado apresentou elevado poder explicativo, com um R^2 ajustado de 0,9685 (Tabela 1). Esse aumento pode ser atribuído ao avanço das tecnologias digitais, como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e plataformas em nuvem, que ampliaram significativamente as possibilidades de pesquisa e aplicação prática. Tecnologias emergentes têm impulsionado a produção científica ao promover soluções inovadoras em diversas áreas, como cidades inteligentes, logística, energia e saúde, o que justifica o aumento do interesse acadêmico e o consequente crescimento nas publicações (Lima *et al.*, 2024; Bibri e Krogstie, 2020; Angelidou *et al*., 2022).

Tabela 1: Parâmetros estimados da regressão segmentada para identificação do ponto de inflexão no crescimento anual de publicações.

Parâmetro	Valor estimado	Erro padrão
Ponto de inflexão (ano)	2019,65	±0,25
Inclinação antes do ponto	13,52	±2,62
Mudança na inclinação (após)	263,38	±21,52
R^2 ajustado	0,9685	—

A análise temática evidenciou quatro agrupamentos principais. Os temas motores, como *optimization, efficiency e genetic algorithms*, apresentam alta centralidade e desenvolvimento, demonstrando consolidação na literatura e foco em técnicas voltadas à eficiência operacional. Em contraste, temas como *artificial intelligence*, *internet of things* e *blockchain* aparecem como centrais, mas ainda pouco desenvolvidos, caracterizando-se como temas básicos com potencial de crescimento. Já o grupo de temas emergentes e em declínio reúne termos como *costs, commerce e investments*, sugerindo menor relevância e desenvolvimento atual. Os temas de nicho, como *sustainable development* e *energy utilization*, embora desenvolvidos, apresentam baixa centralidade, indicando abordagens mais específicas ou isoladas. Observa-se, no entanto, a ausência de termos diretamente relacionados ao custo de frete ou à logística de grãos como eixos centrais, o

que indica uma lacuna relevante na aplicação de gêmeos digitais a essas áreas, especialmente no contexto da logística agrícola. No caso brasileiro, um gêmeo digital da logística de grãos poderia integrar dados de bases oficiais (ANTT, CONAB, USDA), permitindo simular cenários de variação no preço do diesel, gargalos de infraestrutura e disponibilidade de modais. Essa modelagem apoiaria decisões de produtores, tradings e formuladores de políticas públicas (Figura 1).

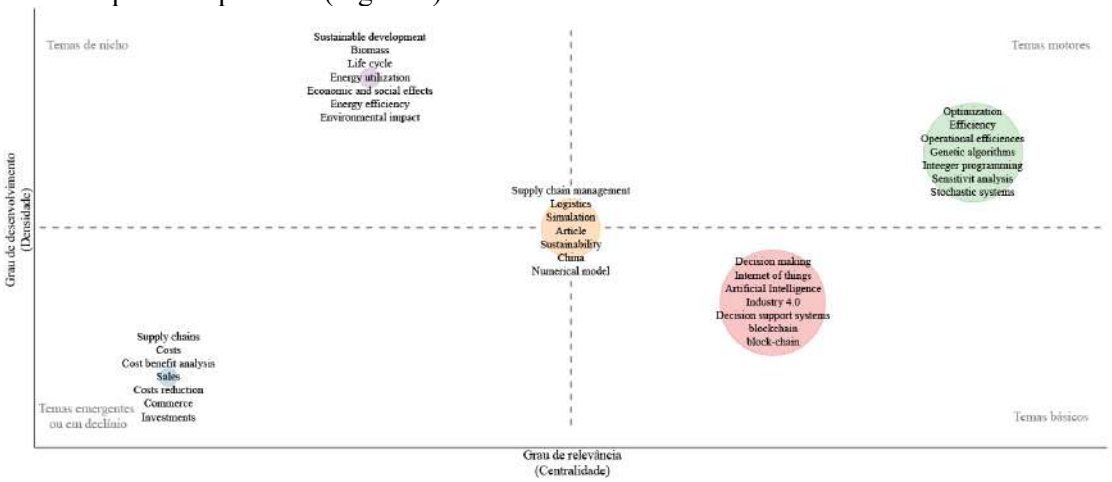


Figura 1: Mapa temático da literatura sobre gêmeos digitais e logística, estrutura conceitual por densidade e centralidade.

A análise temporal dos termos mostra a evolução dos principais conceitos abordados na literatura ao longo dos anos. Onde, a delimitação pelas barras indica o primeiro e o último ano de ocorrência. O círculo representa o ano de maior frequência de uso do termo, e seu tamanho é proporcional à quantidade de vezes que o termo foi citado naquele ano. Observa-se que termos como *artificial intelligence*, *internet of things*, *decision making* e *genetic algorithms* ganharam destaque a partir de 2020, indicando o crescente interesse por tecnologias digitais aplicadas à logística e à gestão da cadeia de suprimentos. Por outro lado, termos mais tradicionais, como *costs*, *logistics* e *supply chains*, apresentam maior recorrência em períodos anteriores, sugerindo uma transição temática ao longo dos anos. Embora o uso de tecnologias digitais esteja em ascensão, a aplicação à cadeia logística de grãos ainda é pouco explorada. A ausência de termos específicos como *freight*, *grain logistics* ou similares reforça a existência de uma lacuna temática relevante, indicando uma oportunidade para aprofundamento científico sobre o uso de gêmeos digitais em contextos agroindustriais (Figura 2). O Brasil desempenha um papel central na cadeia logística global de grãos, sendo responsável por 39% da produção mundial de soja, com 153 milhões de toneladas (USDA, 2024). No entanto, o avanço da infraestrutura logística nacional não tem acompanhado esse crescimento produtivo (Péra, 2025; Netto, 2025). Isso reforça a necessidade de investir em pesquisas voltadas à modernização da logística, como o uso de tecnologias emergentes que podem oferecer soluções mais eficientes e alinhadas à escala da produção brasileira.

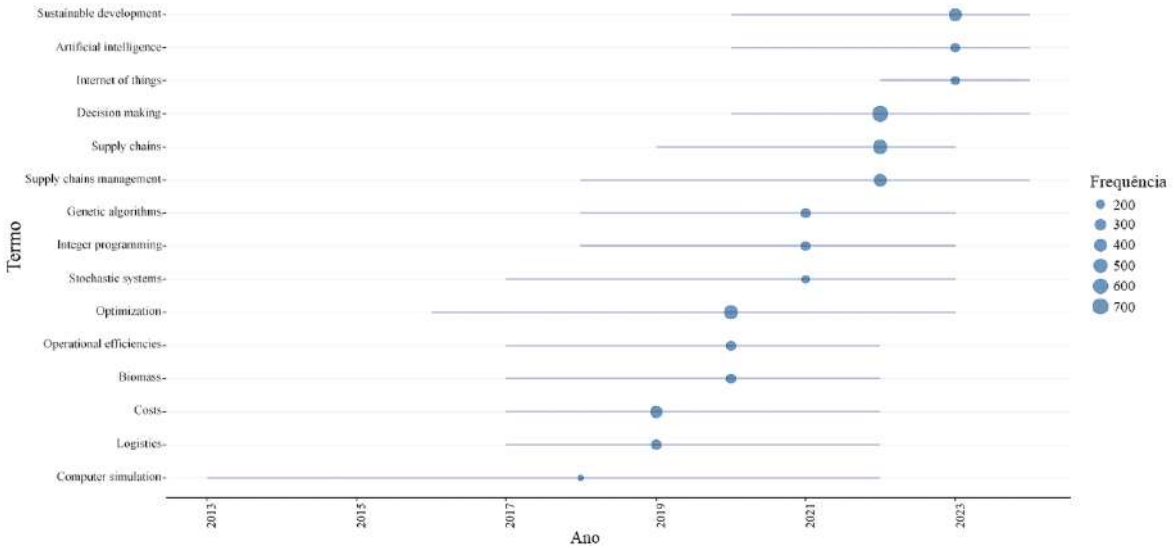


Figura 2: Evolução temporal dos tópicos emergentes na literatura sobre gêmeos digitais e logística de frete.

A análise geográfica revela a concentração das publicações em países como China (3.705 publicações), Estados Unidos (1.242) e Índia (1.023). O Brasil, com apenas 354 documentos, aparece como pouco representativo no campo. A visualização do fluxo de colaborações reforça a forte concentração dessas colaborações entre países da Ásia, Europa e América do Norte. A China lidera essas interações, com destaque para colaborações com Estados Unidos (138 coautorias), Reino Unido (100), Hong Kong (86) e Austrália (59). Estados Unidos, Reino Unido e Índia também se destacam como centros de conexão científica. Esses blocos de colaboração consolidam polos de pesquisa voltados à integração entre simulação, digitalização e otimização logística. Em contraste, o Brasil se posiciona de forma periférica nesse sistema, com baixa conectividade visível no mapa e reduzido engajamento em colaborações estratégicas (Figura 3). Tal cenário reforça a necessidade de ampliar sua atuação científica no tema, sobretudo diante da relevância do país na produção e escoamento de grãos no cenário global.

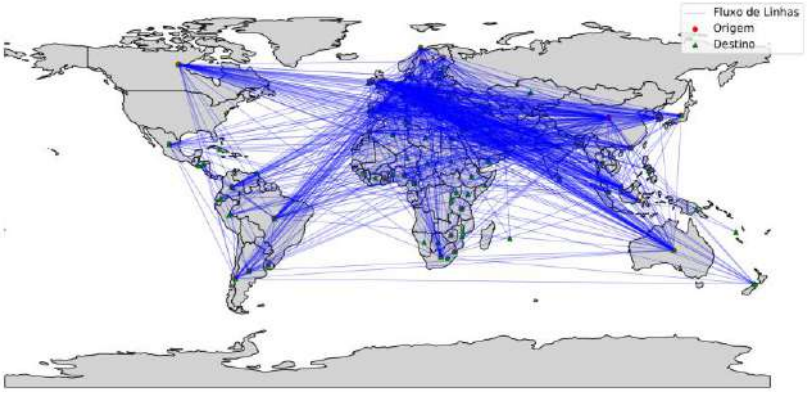


Figura 3: Mapa de Colaborações Internacionais das Publicações Científicas.

4. CONCLUSÕES

Este estudo realizou uma análise bibliométrica da produção científica sobre o uso de gêmeos digitais na logística de grãos, com foco na otimização do transporte. A partir da extração de 5.725 documentos na base Scopus e análise via *Bibliometrix*, foi possível identificar um crescimento recente das publicações, principalmente após 2019. Os resultados mostram forte presença de temas como otimização e tecnologia, mas evidenciam a ausência de termos diretamente ligados à logística agrícola e ao frete de grãos. A participação do Brasil ainda é limitada, tanto em volume de publicações quanto em colaborações internacionais. A partir disso, foi possível observar que, apesar da consolidação dos gêmeos digitais como ferramenta para eficiência logística, existe uma lacuna na aplicação dessa tecnologia ao setor agroindustrial brasileiro. Desenvolver GDs voltados à logística de grãos pode contribuir para reduzir custos de frete, aumentar a resiliência da cadeia e fortalecer a competitividade internacional da soja brasileira. A superação dessa lacuna pode ajudar o país a enfrentar seus desafios estruturais, tornando a cadeia de escoamento de grãos mais eficiente, competitiva e integrada ao cenário global de inovação logística.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angelidou, M., Politis, C., Panori, A., Bakratsas, T., & Fellnhofer, K. (2022). Emerging smart city, transport and energy trends in urban settings: Results of a pan-European foresight exercise with 120 experts. *Technological Forecasting and Social Change, 183*, 121915. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121915.

Asai, G.; C. A. Piacenti e A. C., Gurgel (2020) Impactos no comportamento do frete: Uma aplicação de equilíbrio geral computável para os produtos agropecuários do brasil. *Internext*, 15(3), 17–33. DOI: 10.18568/internext.v15i3.556.

Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2020). The emerging data–driven Smart City and its innovative applied solutions for sustainability: The cases of London and Barcelona. *Energy Informatics, 3*, 5. https://doi.org/10.1186/s42162-020-00108-6.

Bolfe, É. L.; L. A. D. C., Jorge; I. D., Sanches; A. Luchiari Júnior; C. C. da Costa; D. D. Victoria; R. Y. Inamasu; C. R. Grego; V. R. Ferreira e A. R. Ramirez (2020) Precision and digital agriculture: Adoption of technologies and perception of brazilian farmers. *Agriculture*, 10(12), 653. DOI: 10.3390/agriculture10120653.

Brascher, M. e L. Café (2008) Organização da informação ou organização do conhecimento? In: Anais do IX Encontro

Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação (São Paulo, SP). São Paulo: ENANCIB, p. 1-14. Disponível em: http://enancib.ibict.br/index.php/enancib/ixenancib/paper/viewFile/3016/2142.

Dominguez Santana, L; R. M. Martins; L. B. R. Chagas; F. C. M. Pereira.; G. A. Lima e M. A. Moura (2013) Sistemas de organização do conhecimento: análise comparativa e modelagem de instrumentos de representação do conhecimento. Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação, v. 29, n. 1, p. 1–27. DOI: 10.5007/1518-2924.2024.e97708.

Espinosa-Jaramillo, M. T.; M. E. C. Zuta; C. Koneti; S. Jayasundar; S. R. P. Zegarra e V. F. Carvajal-Ordoñez (2024) Digital twins in supply chain operations bridging the physical and digital worlds using AI. *Journal of Electrical Systems*, 20(10s), 1764–1774. DOI: h10.52783/jes.5434.

Gerotti Franco, N. M. e L. I. L. D. Faria (2019) Colaboração científica intraorganizacional: Análise de redes por coocorrência de palavras-chave. *Em Questão*, 87–110. DOI:10.19132/1808-5245251.87-110.

Kim, D.-H.; G.-Y. Kim e S. D. Noh (2025) Digital twin-based prediction and optimization for dynamic supply chain management. *Machines*, 13(2), 109. DOI: 10.3390/machines13020109.

Lam, W. S.; W. H. Lam; e P. F. Lee (2023). A bibliometric analysis of digital twin in the supply chain. *Mathematics*, 11(15), 3350. DOI: 10.3390/math11153350.

Lima, M. F. S. de, Silva, B. S. F., Silva, L. S. da, Cardozo, R. L. V., & Oliveira, R. C. R. de. (2024). Análise bibliométrica de publicações científicas sobre Internet das Coisas e cidades inteligentes utilizando o software VOSviewer. *Siti*, 6, e199.

Moraes, D. D. S. B. D. e C. H. M. D. Souza (2024) Teorias do currículo e produção científica: Mapeamento conceitual a partir da bibliometria. *Educação em Revista*, 40, e45051. DOI: 10.1590/0102-469845051.

Moresi, E. A. D.; I. Pierozzi Junior; L. H. M. de Oliveira e A. de M. Brandão (2019) Organização e representação de conhecimento: incrementos metodológicos e tecnológicos para o mapeamento conceitual. In: Anais do Congresso Ibero-Americano em Investigação Qualitativa, 8, Lisboa. Investigação qualitativa em ciências sociais: investigación cualitativa en ciencias sociales: atas. [S.l.: s.n.], 2019. v. 3, p. 269-178. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1110463.

Muggeo, V. M. R. (2003). Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine, 22*(19), 3055–3071. https://doi.org/10.1002/sim.1545.

Nakajima, K., & Ninomiya, Y. (2025). Akaike information criterion for segmented regression models. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2506.08760v1.

Nascimento, V. V. F. D.; G. F. X. Pereira; C. C. V. Melo; A. I. Freire; F. B. M. D. Souza e A. D. Martins (2022) Análise logística na produção de grãos no Brasil. *Research, Society and Development*, 11(7), e47911730597. DOI: 10.33448/rsd-v11i7.30597.

Netto, A. E. S (2025) Infraestrutura e logística no agronegócio brasileiro: desafios e perspectivas para o escoamento, armazenagem e integração multimodal. *Jusbrasil*. Disponível em: https://www.jusbrasil.com.br/artigos/infraestrutura-e-logistica-no-agronegocio-brasileiro-desafios-e-perspectivas-para-o-escoamento-armazenagem-e-integracao-multimodal/3555653890.

Péra, T. G. Logística no agro: oportunidades para enfrentar o desafio do escoamento da produção (2025). *Jornal USP*. Disponível em: https://jornal.usp.br/artigos/logistica-no-agro-oportunidades-para-enfrentar-o-desafio-do-escoamento-da-producao/ esalqlog.esalq.usp.br+3associacoes.org.br+3jornal.usp.br+3.

Rocha, L. A. (2023). Práticas pedagógicas no ensino superior com Internet das Coisas: metodologias, ferramentas e perspectivas futuras. *Texto Livre: Linguagem e Tecnologia, 16*, e38608. https://doi.org/10.1590/1983-3652.2023.38608.

Taljaard, M., McKenzie, J. E., Ramsay, C. R., & Grimshaw, J. M. (2014). The use of segmented regression in analysing interrupted time series studies: an example in pre-hospital ambulance care. *Implementation Science, 9*(77). https://doi.org/10.1186/1748-5908-9-77.

United States Department of Agriculture – USDA. (2024) Production – Soybeans. Disponível em: https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/2222000.

United States Department of Agriculture – USDA. (2025) Grain: world markets and trade. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf.

Urbizagástegui-Alvarado, R. (2022) Bibliometria brasileira: Análise de copalavras. *Transinformação*, 34, e220004. DOI: 10.1590/2318-0889202234e220004.

Thayane Caroline Oliveira da Conceição (carolinethayane13@gmail.com)
Matheus Araújo Maciel (matheus1914maciel@gmail.com)
Matheus Melo de Souza (matheuusmelodesouza@gmail.com)
Gleidisom Thyery Souza da Costa (Thyery1808@gmail.com)
Richardson Costa de Carvalho(r175550@dac.unicamp.br)
Karina Braga Marsola (kbraga@unicamp.br)
Andréa Leda Ramos de Oliveira (aleda@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Laboratório de Logística e Comercialização, Av. Candido Rondon, 501 - Barão Geraldo, Cidade Universitária, Campinas, São Paulo, Brasil.

PROPOSTA DE MODELO HÍBRIDO PARA DIMENSIONAMENTO DE TECA: ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS FAA E MCKINSEY APLICADA AO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS

Gabriel Lauria Gouveia Gonçalves Valadares[1], **Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira**[1], **João Paulo Sousa Lima**[1], **Wellington Luiz Rocha da Silva Filho**[2]
[1]Universidade Federal de Goiás, [2]Instituto Tecnológico de Aeronáutica

RESUMO
Neste estudo é feito a análise comparativa dos métodos FAA e McKinsey & Company de dimensionamento de terminais de carga aérea, aplicados no Terminal de Cargas do Aeroporto Internacional de Guarulhos. A partir de parâmetros como volume de carga anual, os métodos foram aplicados separadamente por tipo de operações (importação e exportação). A partir disso, nota-se que pelo método FAA o TECA-GRU deve ter uma área de armazenamento de 46.069 m² e 38.926,15 m² pelo método McKinsey. A análise mostrou que o método McKinsey tende a subdimensionar a importação e superdimensionar a exportação. A partir dessas diferenças, propõe-se uma abordagem híbrida, que combine a robustez normativa do método FAA com a flexibilidade operacional do modelo McKinsey.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte aéreo de cargas é uma das modalidades de transporte que mais se destaca no ambiente logístico operacional por ser rápido, eficiente e seguro. De acordo com Suryani *et al.* (2012), o crescimento do modal aéreo tem colaborado significativamente para o processo de globalização, por conta da capacidade de movimentar cargas de alto valor e sensíveis ao tempo, que precisam da conexão de pontos distintos. Estima-se que entre 2015 e 2024 o transporte aéreo de carga no Brasil teve um crescimento em 29,22%, evidenciando o fortalecimento do setor, influenciado pelo avanço tecnológico, aumento das movimentações comerciais e ascensão do *e-commerce*. Entretanto, esse desempenho é vulnerável a externalidades como o caso do COVID-19, que causou impactos negativos para o setor global. No Brasil, estima-se que a crise de 2019 provocou uma queda de -23,63% da movimentação de cargas em 2020. Mesmo assim, já em 2024 a retomada foi rápida, com um crescimento de 11,32% (Horus Labtrans, 2025).

Estes fatos, reforçam a necessidade da estruturação da infraestrutura dos terminais de carga aérea (TECA), que é vulnerável a variações extremas de demanda. O dimensionamento é diretamente impactado pelo volume de carga movimentado, pois esse parâmetro pode influenciar na determinação das áreas funcionais e na capacidade de armazenamento do TECA (INFRAERO, 2006). Segundo Gonçalves (2010), um terminal com dimensionamento abaixo do necessário implica na eficiência operacional, enquanto o superdimensionamento pode causar baixa produtividade. A carência de investimentos na infraestrutura logística do setor aéreo é um limitante da performance dos aeroportos brasileiros. Dados do Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT), mostraram que de 2007 a 2023 apenas 5,6% dos investimentos para infraestrutura de transporte foram destinados para o modal aéreo. Tal fato resulta em terminais logísticos operando no limite de sua capacidade, dificultando o atendimento à demanda futura.

Neste âmbito, se faz necessário utilizar abordagens técnicas de dimensionamento como o método da *Federal Aviation Administration - FAA* (1964) e da *McKinsey & Company* (2010), que consideram parâmetros como volume anual de carga, tipo de operação (importação/exportação), previsão de crescimento, entre outros. Entretanto, esses métodos apresentam abordagens normativas e operacionais diferentes, e por isso é importante que seja feita uma análise comparativa das aplicações. Assim, objetiva-se neste estudo realizar a avaliação comparativa entre os métodos FAA e McKinsey & Company, a partir da aplicação no TECA do Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR), considerado o maior do Brasil em movimentação de carga do País. Busca-se reconhecer as convergências, limitações e adequação aos diferentes frente a demanda real do terminal. Além disso, este estudo propõe uma abordagem híbrida que une ambos os métodos, como uma nova proposta para analisar o dimensionamento do TECA, combinando suas principais características, as normas técnicas com eficiência operacional.

2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Este trabalho adota uma abordagem descritiva, analítica e aplicada. A estratégia metodológica contempla duas etapas: (i) o mapeamento e a análise técnica dos métodos existentes na literatura especializada e (ii) a aplicação

prática dos métodos FAA e McKinsey & Company ao Terminal de Carga do Aeroporto Internacional de Guarulhos (TECA-GRU), permitindo uma avaliação comparativa dos resultados obtidos.

Na primeira etapa, foram sistematizadas as publicações técnicas e acadêmicas. A análise compreendeu a identificação dos parâmetros, nível de detalhamento metodológico e exemplos de aplicação documentados em trabalhos acadêmicos e dados disponíveis em livros, normas e relatórios técnicos.

Na segunda etapa, realizou-se a comparação entre os métodos FAA e McKinsey & Company. Essa decisão objetivou examinar diversas abordagens técnicas e períodos históricos, possibilitando uma investigação mais ampla dos fatores de dimensionamento ao longo do tempo. Aplicou-se os dois métodos no TECA-GRU, utilizando dados como movimentação de carga no ano de 2024, sendo 365.300,00 mil toneladas de carga, 168.216,00 t importada e 197.084,00 t exportada, conforme informações do Horus LabTrans/UFSC (2025).

2.1. Método Federal Aviation Administration - FAA

Criado em 1964 pelo órgão regulador da aviação nos Estados Unidos (*Federal Aviation Administration*), tratado pela Circular AC 150/5360- 2 (FAA, 2024), Airport Cargo Facilities, como um componente do empenho na elaboração de infraestrutura aeroportuária para sustentar o grande crescimento do sistema aéreo. O método estabelece equações para determinar as áreas do terminal de cargas, apresentadas no Tabela 1.

Tabela 1: Fórmulas para dimensionamento - Método FAA.

Objetivo	Equação	Nomenclaturas
Área de influência	$V_{ano} = V * (1+g)^t$	V_{ano}: volume de carga ao longo do tempo; V: volume atual de carga anual; g: taxa de crescimento anual de carga; t: projeção de crescimento.
Área do armazém (Importação e Exportação)	$A_a = \frac{V}{T * O} * (C = (1+g)^t)$ ou $A_a = \frac{V}{tn/ano/m^2}$	A_a: área total de armazém; V: volume anual de carga; T: rotatividade média; O: ocupação; C: fator de crescimento
Pátio de aeronaves	$A_p = n * S * F$	S: espaço médio por aeronave; n: quantidade de aeronaves simultâneas; F: Fator de separação.
Docas para caminhão	$N = \lambda * T$	N: número de docas; λ: quantidade de caminhões que chegam/hora; T: tempo médio de operação.
Áreas auxiliares (administrativas)	$A_{aux} = 0{,}1 * A_a$	A_{aux}: áreas auxiliares; 0,1: 10% da área de armazenagem; A_a: área de armazenagem;

A área de influência se dá a partir do processamento de carga para a demanda futura pela multiplicação do volume anual de carga (V) sobre taxa de crescimento anual da carga (g) para um período de projeção de anos (t) de 20 anos. Considerou-se, respectivamente, os seguintes valores para os parâmetros citados anteriormente: 365.300 mil t. de cargas (importação e exportação) em 2024 e uma taxa de crescimento anual de 3% com considerando a projeção de crescimento de carga entre os anos de 2019 até 2024.

Á área de armazenamento é segregada por tipo de operação (importação/exportação), ou seja, é necessário calcular ambas as áreas a partir dos parâmetros de volume anual de carga; rotatividade (T) de 6 dias (Reis, 2020); taxa de ocupação média do espaço (O) de 70%; crescimento projetado (c) para 20 anos.

Além disso, é possível identificar as áreas de armazenamento por uma alternativa secundária, considerando volume anual de carga pela produtividade média (t/ano/m²), sendo 7,93 para importação e 16 para exportação. Neste estudo considerou-se os dados obtidos por esta aplicação devido sua proximidade com os dados reais do TECA. Para a área do pátio de aeronaves considera-se os tipos de aeronaves que operam no Aeroporto (Boeing 747-400), pois as características como comprimento e envergadura podem influenciar no tamanho do espaço médio por aeronave e fator de separação (Horus Labtrans, 2025).

A quantidade de docas para caminhão é obtida pelo número de caminhões/dia que passam no TECA. A determinação desse número se deu a partir de um cenário crítico com elevada demanda de chegada de

caminhões/hora no terminal e o tempo médio de operação por caminhões. Sendo assim, adotou-se como veículo crítico o modelo VUC (3,5 t), fator de ocupação de 70% (com base em dados sobre a média do peso das cargas, obtidos a partir de Conhecimento de transporte eletrônico - (CTE) disponibilizados por transportadoras), tempo de operação diária de 24 horas e média de movimentação diária de carga de 1.000 t. As áreas auxiliares, sendo elas administrativas, acessos e estacionamento, correspondem a respectivamente 10% e 15% da área total de armazenagem. Por fim, a área total é resultado da soma de todas as áreas do TECA.

2.2. Método McKinsey & Company

O objetivo deste método é maximizar a eficiência da operação e diminuir os custos por meio de novas tecnologias. Ressalta-se que a maior área do terminal de carga importada é destinada a área útil de armazenagem e de perdimento, que serão os componentes que indicaram a capacidade do terminal. Além disso, o terminal de importação é dividido em diversos elementos que se distribuem em termos de proporção da área total ocupada do terminal, assim como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Ocupação dos componentes em terminais de importação.

Componentes	Proporção da Área total
Armazenagem de cargas especiais (perecíveis, câmaras frigoríficas, cofres e restritas)	5 a 10%
Atracação-desembaraço	15 a 25%
Doca	5%
Conferência fiscal (Receita Federal), liberação e entrega	10 a 13%
Carga courier	0 a 10%
Carga em trânsito (para EADIs 10, entrepostos industriais ou para outros TECAs)	0 a 25%
Administração e outros escritórios	6 a 10%

Fonte: McKinsey & Company, 2010

Para a área de importação, considera-se parâmetros como volume total de carga anual em 2024, tempo médio de permanência da carga, densidade aparente (para terminais sem transelevadores 0,04 t/m³ e terminais com transelevadores 0,06 t/m³), Altura de empilhamento de 11 metros (GRU cargo, 2024). Já para a área do terminal de exportação, considera-se o volume total de carga no ano e o índice apresentado pela Infraero de 0,16 m² por tonelada por ano. O método utiliza algumas equações (quadro 2) para estabelecer as áreas úteis, de perdimento, área total de importação (somatório das áreas úteis e de perdimento) e área útil de exportação.

Quadro 2: Equações para dimensionamento de terminal de carga - McKinsey & Company

Área	Equação	Descrição
Área útil do terminal de importação (sem área de perdimento)	$A_{útil} = \frac{T * t_m}{365 * \rho * h}$	T: tonelagem anual de importação (t/ano) t_m: tempo médio de armazenamento ρ: densidade (t/m³) h: altura de empilhamento (m)
Área de perdimento (importação)	$A = 0{,}10 * A_{útil}$	0,10: considera-se 10% da área útil; $A_{útil}$: área útil (sem área de perdimento)
Área útil do terminal de Exportação	$A = 0{,}16 * V_{ano}$	0,16: índice infraero; V_{ano}: volume de carga movimentado no ano.

Fonte: McKinsey & Company, 2010.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A definição do método mais pertinente para o planejamento e ampliação futura do TECA-GRU deve considerar as particularidades físicas da infraestrutura, as dificuldades operacionais, as tendências tecnológicas e as exigências logísticas atuais. Este estudo aplicou dois métodos de dimensionamento de terminal de carga aérea: o FAA (1964) de caráter normativo, e o McKinsey & Company (2010), com uma conduta mais prática voltada à eficiência operacional. Ainda que apresentem muita relevância, tem-se algumas limitações quanto aos métodos. O FAA por ser mais antigo pode não refletir cenários com maior automação. Por outro lado, o McKinsey depende de dados detalhados que nem sempre vão estar disponíveis em todos os TECA. Sendo assim, essas limitações necessitam de correções para diferentes terminais.

Os resultados foram segregados por tipo de operação, identificando as diferenças entre os métodos e a infraestrutura atual, mostrando como cada abordagem age em diferentes contextos logísticos, de tal forma que a metodologia FAA fundamenta-se em equações que estabelecem diretrizes padrões, compatível com análises

prévias e estruturas comuns. Já o método McKinsey & Company traz abordagem mais funcional, que segue orientações como eficiência operacional, produtividade e inovações tecnológicas. A partir da análise segregada, foi possível notar que os dois métodos tendem a subdimensionar a área necessária na operação de importação e superdimensionar a área de exportação, assim como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Áreas obtidas para os métodos FAA e McKinsey & Company.

FAA		**McKinsey & Company**	
Área de Armazenamento (t)		***Área de importação (útil + perdimentos em t***	
Área de Importação (tn/ano/m²)	21.214	Armazenagem de cargas especiais	345,65
Área de Exportação (tn/ano/m²)	24.855	Atracação-desembaraço	921,73
Total armazenagem	46.069	Doca (m²)	230,43
		Conferência (Receita Federal), liberação e entrega	530
		Carga courier	230,43
		Carga em trânsito	576,08
		Administração e outros escritórios	368,69
		Total área de importação	7.392,71
		Área de exportação	31.533,44
		Total armazenagem	38.926,15
Áreas Operacionais (FAA)			
Pátio de Aeronaves			40.920
Número de docas (Qtd)			14
Áreas Auxiliares			18.346

Esse tipo de análise permite identificar que os dois métodos utilizam como parâmetro base a movimentação anual de carga que influencia na necessidade de estruturas maiores, mas se diferem no tipo de análise, onde o FAA considera áreas auxiliares e zonas administrativas e o McKinsey foca na área operacional. Esses pontos podem ser colocados como limitações de cada método. Tais limitações evidenciam que quando aplicados separadamente, nenhum dos métodos é capaz de representar a realidade TECA-GRU. Diante deste exposto, este estudo propõe um modelo híbrido, onde a união permite adotar margens seguras, com aplicação do método FAA, sem desconsiderar a racionalização da funcionalidade das áreas, conforme proposto na Figura 1.

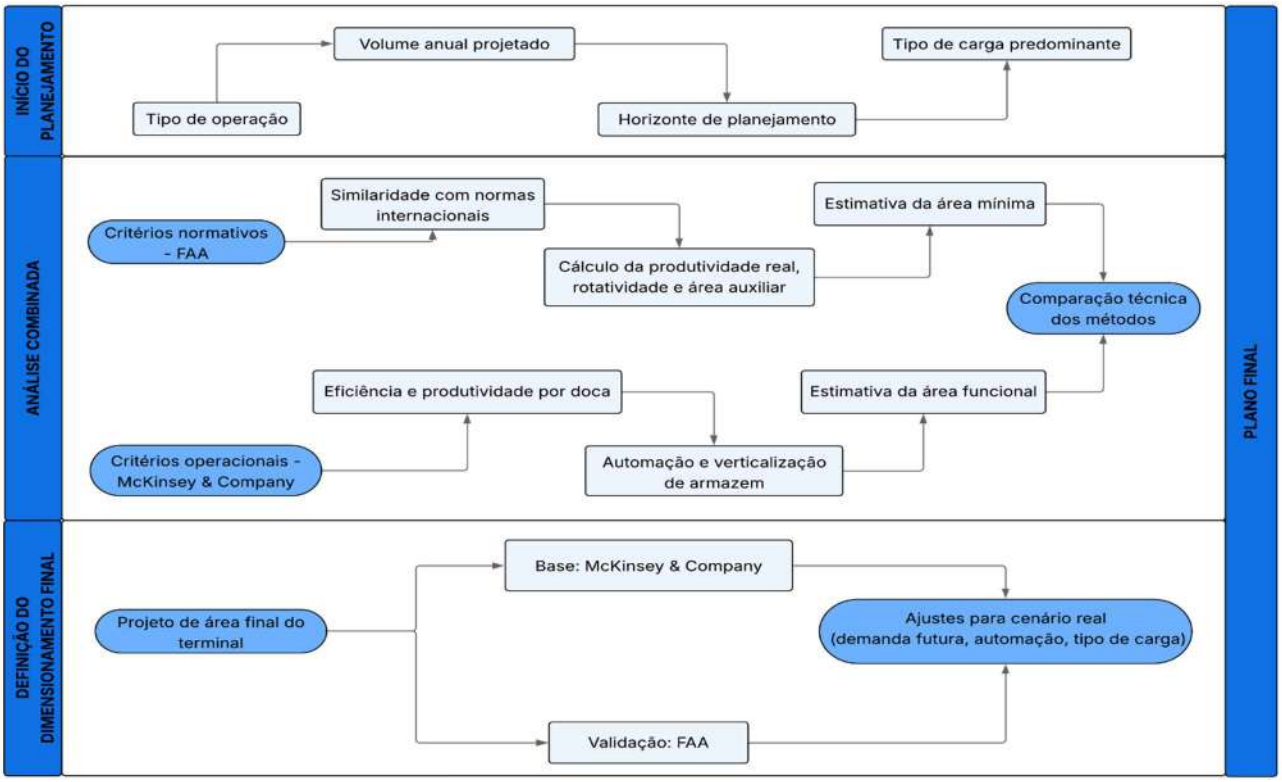


Figura 1. Fluxograma de aplicação híbrida dos métodos FAA e McKinsey & Company. Fonte:Autores.

Os dois métodos mostram valores totais menores que a área real do terminal (69.069,00 m²), sendo a área obtida pelo método FAA 33,3% menor que a do TECA-GRU. Já o método McKinsey apresenta uma área

43,7% menor. Observou-se que o método FAA apresenta pontos mais conservadores, sendo parâmetro de normas mínimas, em destaque para ambientes com poucas tecnologias e que buscam margem de segurança operacional, enquanto o método McKinsey apresenta mais receptividade aos processos logísticos contemporâneos, mais adaptável para terminais com mais automação.

O processo se inicia com o planejamento e definição do escopo e objetivos, considerando parâmetros importantes para a coerência da aplicação dos métodos. Em seguida é feita a análise combinada e a partir disso serão obtidos dois tipos de análise: i) utiliza os parâmetros normativos do método FAA, a partir de equações tradicionais, com foco na produtividade real e áreas auxiliares; ii) aplica os parâmetros operacionais do método McKinsey & Company, como fator de eficiência de produtividade. Assim, é feita a comparação dos resultados obtidos para identificar os principais gargalos e realizar os ajustes conforme o cenário do terminal em análise. O plano final engloba a robustez técnica e eficiência operacional, conforme as oscilações e mudanças futuras.

4. CONCLUSÕES

Diante da análise comparativa dos métodos FAA (1964) e McKinsey & Company (2010) aplicados no TECA-GRU, foi possível dizer que atualmente o TECA-GRU é capaz de operar a demanda futura, uma vez que as áreas obtidas pelos métodos são menores que as áreas reais do terminal. Ao separar os dados de importação e exportação, notou-se que o maior déficit ocorreu nas áreas de importação obtidas pelo método McKinsey & Company que estimou apenas 7.392,71 m² frente aos 46.069 m² reais. Já na exportação houve um superdimensionamento por este método, sendo a área obtida 31.533,44 m² para uma área real de 23.000 m². Portanto, a análise dos resultados e parâmetros utilizados permite dizer que a escolha de métodos pode variar de acordo com o perfil de cada Terminal de Carga.

Portanto, a partir dos resultados, propõe-se a adoção de uma abordagem híbrida, na qual o método FAA seja utilizado como referência de base normativa, e o método McKinsey, como diretriz para decisões operacionais, layout e modernização. Essa combinação garante uma maior flexibilidade e robustez, permitindo que o terminal se adapte estrategicamente a flutuações de demanda, avanços tecnológicos e novas exigências regulatórias. Por fim, para trabalhos futuros aconselha-se realizar a aplicação da abordagem híbrida em outros terminais, para avaliar quais são os impactos causados por novas tecnologias, como sistemas de automatização e rastreabilidade, além de avaliar custo-benefício relacionado à melhoria da infraestrutura do TECA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FAA *Advisory Circular AC 150/5360-2: Airport Cargo Facilities*. Washington, D.C.: Federal Aviation Agency, 6 abr. 1964. Change 1 (com errata). Washington, DC: FAA, 16 ago. 2024.

Gonçalves, Tiago José Menezes et al. Previsão do volume de movimentação de carga no aeroporto de Guarulhos: uma aplicação de ponderação exponencial e de decomposição em séries temporais. In: Anais do Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2010.

Horus – Sistema de Informações Operacionais da Aviação Civil. Informações gerais do Aeroporto de Guarulhos (SBGR). Disponível em: <https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Aeroporto/InformacoesGerais/SBGR>. Última atualização: 30 jun. 2025. Acesso em: 30 jun. 2025.

Horus Labtrans. Plataforma gerencial: evolução da movimentação de carga. Disponível em: https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Movimentacao/Evolucao. Última atualização: 30 jun. 2025. Acesso em: 30 jun. 2025.

Mckinsey & Company. Air freight: The route to profitable growth. McKinsey & Co., 2016. Disponível em: https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/air-freight-the-route-to-profitable-growth. Acesso em: 19 abr. 2025.

Ministério dos Transportes, Portos e Aviação CiviL. PNLT Relatório executivo 2007. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/conteudo/2820-pnlt- relatorio-executivo-2007.html>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Suryani, E., Chou, S. Y., & Chen, C. H. Dynamic simulation model of air cargo demand forecast and terminal. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 28, p. 27–41, 2012.

Gabriel Lauria Gouveia Gonçalves Valadares (biellauriagyn@gmail.com)
Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira (michelle.galvao@ufg.br)
João Paulo Silva Lima (joaoplima@ufg.br)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás. Estr. Municipal, Qd e Área 04, Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia - GO, 74971-45.
Wellington Luiz Rocha da Silva Filho (nome@email.com.br)
Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Departamento de Transporte aéreo e Aeroportos, Divisão de Engenharia Civil, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, São José dos Campos - SP, 12228-900.

Transporte de carga e intermodalidade

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS EVENTOS CLIMÁTICOS NA MOVIMENTAÇÃO INTERMODAL DE CARGAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Vinicius da Rosa, Giovana Denardi Parcianello, Vanessa Teresinha Alves, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Este estudo apresenta uma análise sobre os impactos de eventos climáticos extremos recentes na prática da intermodalidade no Rio Grande do Sul, com ênfase na movimentação de cargas ferroviárias e hidroviárias, incluindo as consequências logísticas e econômicas. A metodologia utilizada baseou-se em dados oficiais no período de 2020 a 2024, tratados e analisados através de ferramentas como Power BI e geoprocessamento. Os resultados demonstraram a alta vulnerabilidade da infraestrutura de transporte do estado e evidenciam que estiagens, chuvas volumosas e, sobretudo, as enchentes de 2024 provocaram quedas acentuadas na movimentação de cargas, com paralisação de trechos ferroviários e hidroviários essenciais, afetando o escoamento de produtos como combustíveis e grãos, e resultando em graves perdas econômicas. Conclui-se pela necessidade urgente de políticas públicas e investimentos focados na adaptação e resiliência da infraestrutura logística, incluindo modernização e monitoramento, para assegurar a continuidade operacional e a sustentabilidade econômica diante dos desafios climáticos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A infraestrutura é fundamental para o crescimento econômico e a prosperidade da sociedade, influenciando direta ou indiretamente cerca de 72% das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Thacker *et al.*, 2019). No entanto, muitas dessas infraestruturas críticas, como as de transportes, são projetadas para uma vida útil de aproximadamente 50 anos para rodovias e 100 anos para ferrovias, com base nas condições climáticas locais observadas no passado (Tveter e Tomasgard, 2024). Esse modelo de planejamento, geralmente baseado em dados históricos considerados de referência, pressupõe certa estabilidade e previsibilidade climática. Contudo, com as mudanças climáticas, a frequência e a intensidade de eventos extremos, superando os parâmetros para os quais essas infraestruturas foram originalmente projetadas, acabam colapsando e comprometendo a fluidez e eficiência do fluxo de mercadorias (Underwood *et al.*, 2017).

Os impactos econômicos decorrentes da inatividade ou interrupção das operações dos sistemas de transporte afetam diretamente o desenvolvimento de um país, estado ou município. No Estados Unidos, por exemplo, há investimentos significativos em infraestruturas de transporte com o objetivo de evitar colapsos no sistema (USDOT, 2015). Os gastos destinados à recuperação e à melhoria dessa infraestrutura correspondem a 8,9% do PIB do país. Segundo Crainic *et al.* (2018), os sistemas de transporte de carga são, por natureza, complexos, em decorrência das múltiplas interdependências entre os diversos componentes que os compõem, os quais interagem continuamente. Cada ator envolvido no transporte, como operadores logísticos, empresas, órgãos públicos e usuários em geral, possui objetivos próprios e toma suas decisões de forma autônoma, o que torna o sistema ainda mais imprevisível. Nesse caso, Sanchez-Rodrigues *et al.* (2010) destacam que em um sistema intermodal essa complexidade é agravada e fica mais suscetível a vulnerabilidade, incertezas e fatores externos, como instabilidades geopolíticas e eventos climáticos extremos.

No Brasil, a matriz de transporte de cargas é caracterizada por um desequilíbrio estrutural, mais acentuado ainda no Rio Grande do Sul (RS), onde aproximadamente 88% da movimentação de cargas ocorre por rodovias, com apenas 6% por ferrovias e menos de 3% por hidrovias (Rio Grande do Sul, 2017). Nos últimos anos, o estado tem enfrentado um aumento na frequência e intensidade de fenômenos climáticos, como por exemplo as severas estiagens registradas nos anos de 2020, 2022 e 2023 e o episódio de grande volume de chuvas acumulado em novembro de 2023 e a enchente de 2024 (Rio Grande do Sul, 2024). Nessa situação de grave desequilíbrio, o sistema de transporte de carga, após um desastre, de acordo com Abdel-Latif *et al.* (2023), é lançado em crise e sua recuperação pode ser irregular, parcial e prolongada.

Diante desse cenário, este artigo busca investigar, por meio de análise de dados oficiais, os impactos dos recentes eventos climáticos extremos sobre o transporte intermodal de cargas no estado do Rio Grande do Sul, com destaque para a movimentação nos modos ferroviário e hidroviário, avaliando as consequências para a logística e a economia regional e nacional. Dessa forma, o estudo busca contribuir na identificação das principais vulnerabilidades da infraestrutura logística intermodal do estado diante desses eventos, auxiliando na tomada de decisões para planejamento eficiente de medidas de prevenção para o futuro.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em quatro etapas principais apresentadas a seguir.

2.1 Levantamentos de dados secundários

Por meio da consulta a fontes oficiais, foram obtidos dados junto à Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2025), ao Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL, 2025) e à Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2025). Esses dados referem-se aos fluxos de carga dos modos ferroviário e hidroviário nos anos de 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024, permitindo a análise dos últimos cinco anos.

2.2 Organização e tratamento dos dados

Os dados obtidos do modo ferroviário foram organizados por terminais de origem e destino, totalizando 19 terminais ferroviários, incluindo os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com destino ao RS. No modo hidroviário, foram analisados dados de movimentação de carga interior, apenas do RS para RS, com um total de 10 terminais portuários, entre públicos e privados. Para permitir uma análise espacial mais eficaz, os dados foram agrupados conforme o município onde cada terminal está localizado. Essa organização possibilitou identificar padrões regionais de movimentação de carga e avaliar quais regiões foram mais afetadas pelos eventos climáticos. Além disso, os dados brutos passaram por uma etapa de limpeza, padronização e formatação em planilhas eletrônicas. Por fim, foram eliminadas duplicidades, ajustadas nomenclaturas e convertidas unidades de medida, garantindo consistência na análise.

2.3 Elaboração de gráficos temáticos utilizando o software Power BI

Com os dados organizados, foram elaborados gráficos temáticos e *dashboards* no software Power BI, o que permitiu uma análise visual interativa dos fluxos de carga ao longo dos anos de 2020 a 2024. Os gráficos foram estruturados para evidenciar a variação na movimentação em função de eventos climáticos extremos, secas e enchentes. Adicionalmente, os dados foram desagregados por tipo de carga (grãos, derivados de petróleo, fertilizantes, minerais, entre outros), o que possibilitou compreender quais produtos e regiões foram mais afetados. A visualização dinâmica no Power BI também auxiliou na identificação de tendências, sazonalidades e rupturas logísticas relacionadas às condições climáticas adversas, enfrentadas no estado.

2.4 Análise espacial por meio de ferramentas de geoprocessamento (GIS)

A última etapa metodológica consistiu na análise espacial dos dados, utilizando softwares de geoprocessamento (QGIS). Foi realizado o georreferenciamento dos terminais ferroviários e hidroviários, com base em suas coordenadas geográficas, e mapeadas as regiões atingidas por eventos climáticos em 2024. Essa análise permitiu sobrepor os dados de movimentação de carga às áreas afetadas pelas enchentes, possibilitando a identificação das intersecções entre vulnerabilidade climática e infraestrutura logística.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em 2024, o estado do Rio Grande do Sul foi severamente afetado por um dos maiores desastres naturais de sua história, com enchentes que atingiram 478 dos 497 municípios do estado. As operações em ramais ferroviários nas regiões Central, Metropolitana e do Vale do Taquari foram suspensas. A movimentação de combustíveis e produtos agrícolas, minerais e industriais foi significativamente impactada. O estado permaneceu, durante meses após o evento, sem ligação ferroviária com outras regiões do Brasil, tornando-se logisticamente isolada. No setor hidroviário, a elevação do nível dos rios, a força das correntezas e o acúmulo de detritos inviabilizaram a navegação segura nas bacias dos rios Jacuí, Taquari, Caí e na Lagoa do Guaíba, resultando na paralisação temporária das operações portuárias (Rio Grande do Sul, 2024).

Os resultados apresentados nesta seção derivam das principais evidências obtidas das análises realizadas nas duas plataformas indicadas anteriormente. Assim, a partir dos *dashboards*, mediante o software Power BI foram geradas as Figuras 1, 2 e 3, enquanto o georreferenciamento das infraestruturas afetadas pelos eventos climáticos com auxílio do QGIS é mostrado na Figura 4.

A Figura 1 detalha a movimentação mensal de carga no modo ferroviário do RS entre 2020 e 2024. Observa-se que o ano de 2021 se destacou com os maiores volumes transportados, período associado a condições favoráveis, refletindo positivamente um cenário para a produção e escoamento. Os anos subsequentes

apresentaram maior instabilidade: 2022 foi marcado por uma queda significativa associada a um período de estiagem, enquanto 2023 manteve volumes mais moderados, mesmo assim influenciado por secas. O ano de 2024 evidencia o cenário mais severo, com uma redução drástica na movimentação a partir de abril/maio, coincidindo com as enchentes que afetaram o estado e o colapso da infraestrutura, cujo impacto resultou nos menores volumes registrados, um declínio de aproximadamente 200 mil toneladas no período analisado.

No que se refere ao transporte hidroviário, a influência climática também é marcante (Figura 2). Assim como no modo ferroviário, 2021 foi um ano de pico sob condições favoráveis e safras recorde. No entanto, os impactos de outros eventos se manifestam distintamente: a estiagem afetou o início de 2020, enquanto as chuvas acumuladas em 2023 e as enchentes de 2024 causaram interrupções severas. A queda abrupta em maio de 2024 é seguida por uma recuperação significativa no mês seguinte. Essa recuperação rápida reflete, em parte, a normalização das operações no porto privado de Guaíba na região metropolitana, que concentrou um volume expressivo de carga logo após a baixa das águas, contrastando com outras bacias hidrográficas, por exemplo, Jacuí e Taquari, que tiveram sua recuperação mais lenta, de forma similar aos resultados de Abdel-Latif *et al.* (2023).

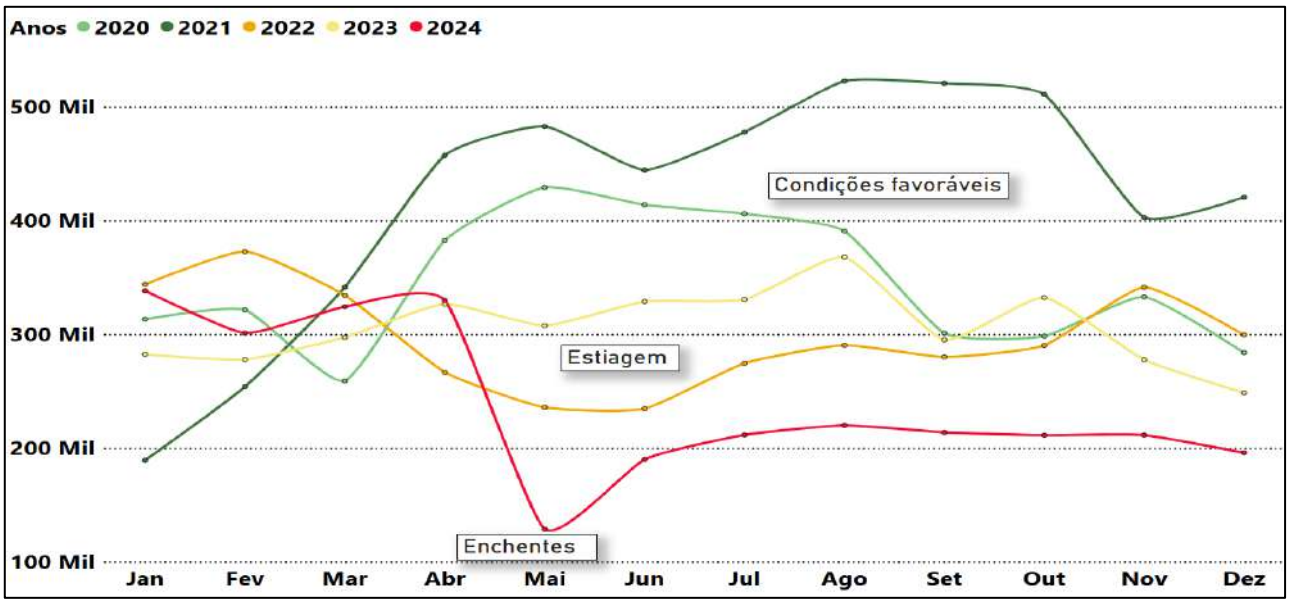


Figura 1: Movimentação de carga ferroviária no período 2020-2024 no Rio Grande do Sul (em toneladas).

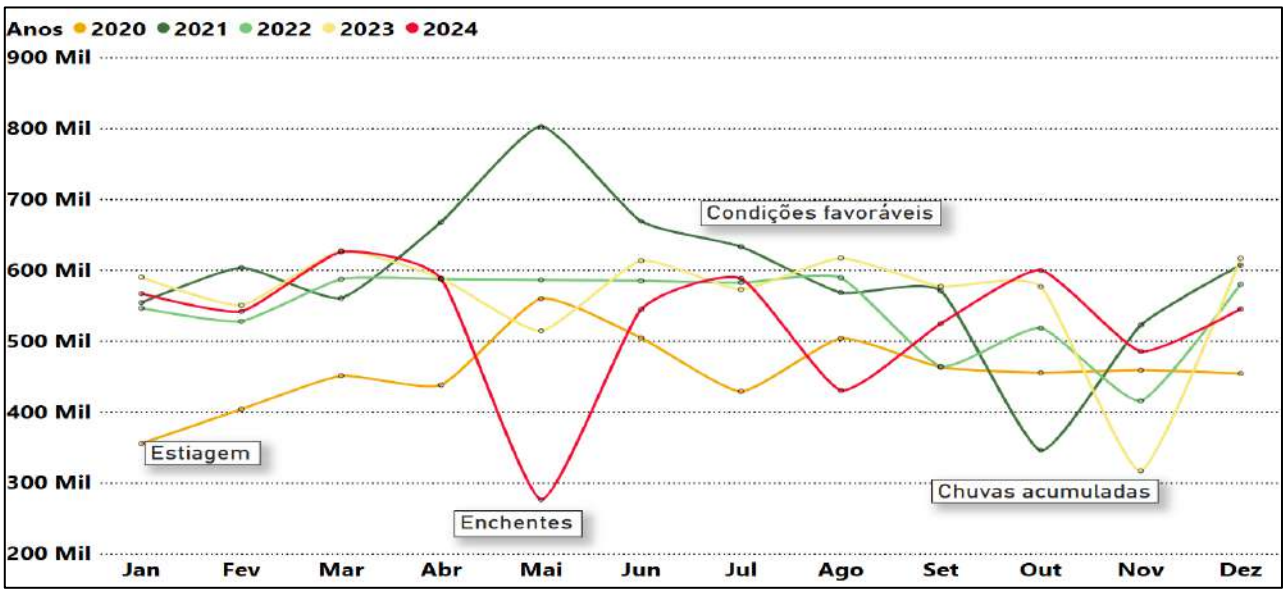


Figura 2: Movimentação de carga hidroviária no período 2020-2024 no Rio Grande do Sul (em toneladas).

A Figura 3 foca no modo ferroviário, para uma análise mais detalhada de seu desempenho e dos produtos movimentados. Pode-se verificar que mercadorias derivadas do petróleo, originadas do terminal industrial de Canoas, foram as mais impactadas e tiveram suas operações suspensas em 2024. O terminal abastecia diversas regiões do estado, como Santa Maria, Passo Fundo, Ijuí, Cruz Alta, Santo Ângelo e outros estados como Paraná e Santa Catarina. Com isso, a principal operadora ferroviária do estado registrou prejuízos econômicos no segundo trimestre de 2024, sendo influenciada diretamente pela catástrofe climática. Esses custos acarretaram em um maior deslocamento de mercadorias pelo modo rodoviário, resultando em perdas econômicas significativas para o estado, o que corrobora a importância de investimentos robustos em infraestrutura resiliente, conforme observado por USDOT (2015) e Underwood *et al.* (2017).

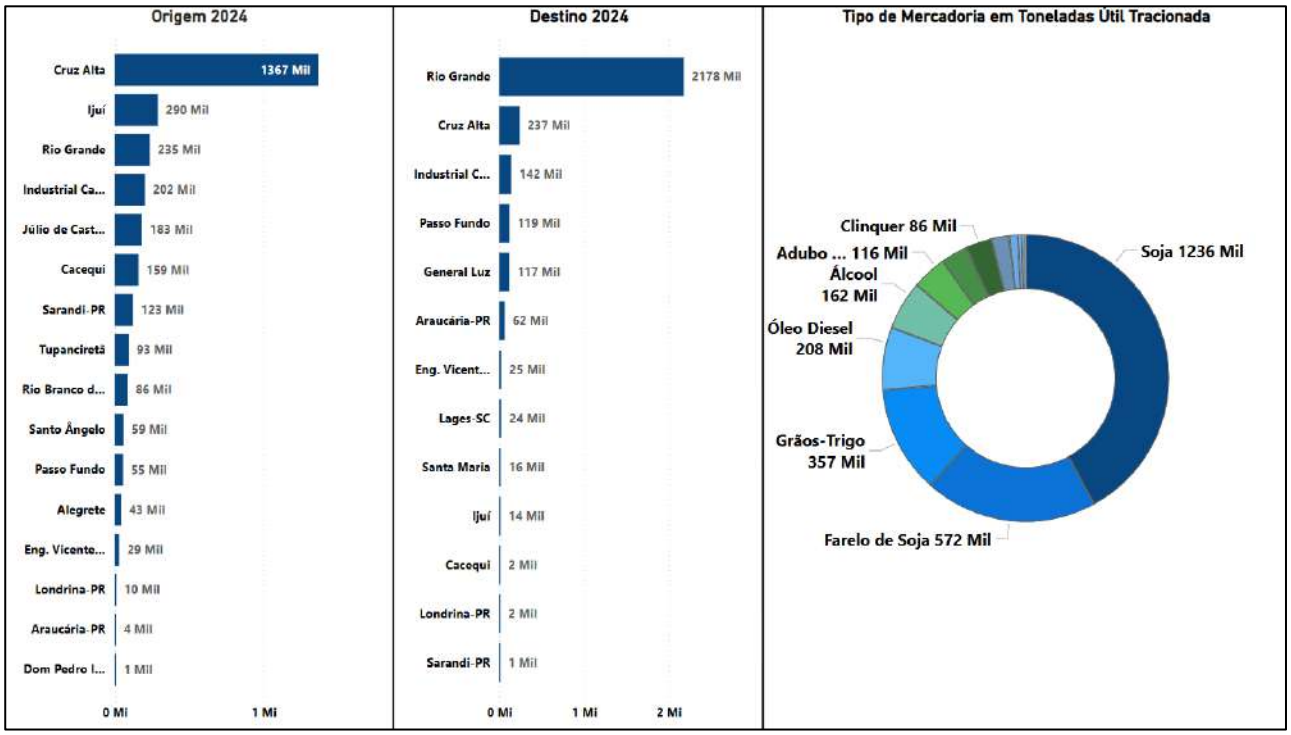


Figura 3: *Dashboard* sobre o modo ferroviário, principal modo afetado nos eventos climáticos em 2024 no RS.

Os impactos dos eventos climáticos extremos de 2024 sobre a infraestrutura intermodal do estado do Rio Grande do Sul são mostrados na Figura 4 de forma integrada e georreferenciada. O destaque negativo recai sobre a malha ferroviária, pois a análise espacial revela um cenário preocupante: apenas um trecho ferroviário permanece em operação, enquanto grande parte da malha encontra-se inativa devido aos danos provocados pelas enchentes, os deslizamentos e demais consequências das chuvas. Essa situação de recuperação prolongada evidencia a vulnerabilidade da infraestrutura logística frente a eventos extremos, com implicações diretas para a mobilidade de cargas no estado.

Diante disso, os resultados obtidos por meio dos gráficos visuais e análise georreferenciada constituem uma base sólida de evidências. Esses achados são essenciais para a formulação de políticas públicas e para a necessidade de direcionamento de investimentos com foco na adaptação e resiliência, incluindo a modernização de trechos vulneráveis, a implementação de sistemas de monitoramento avançados e a promoção da integração intermodal. A articulação sistêmica entre mitigação de riscos, estratégias ambientais e desenvolvimento territorial é, portanto, fundamental para assegurar a continuidade operacional, a segurança logística e a sustentabilidade econômica do Rio Grande do Sul frente aos desafios climáticos futuros, subsidiando um planejamento eficiente de medidas preventivas e de resposta.

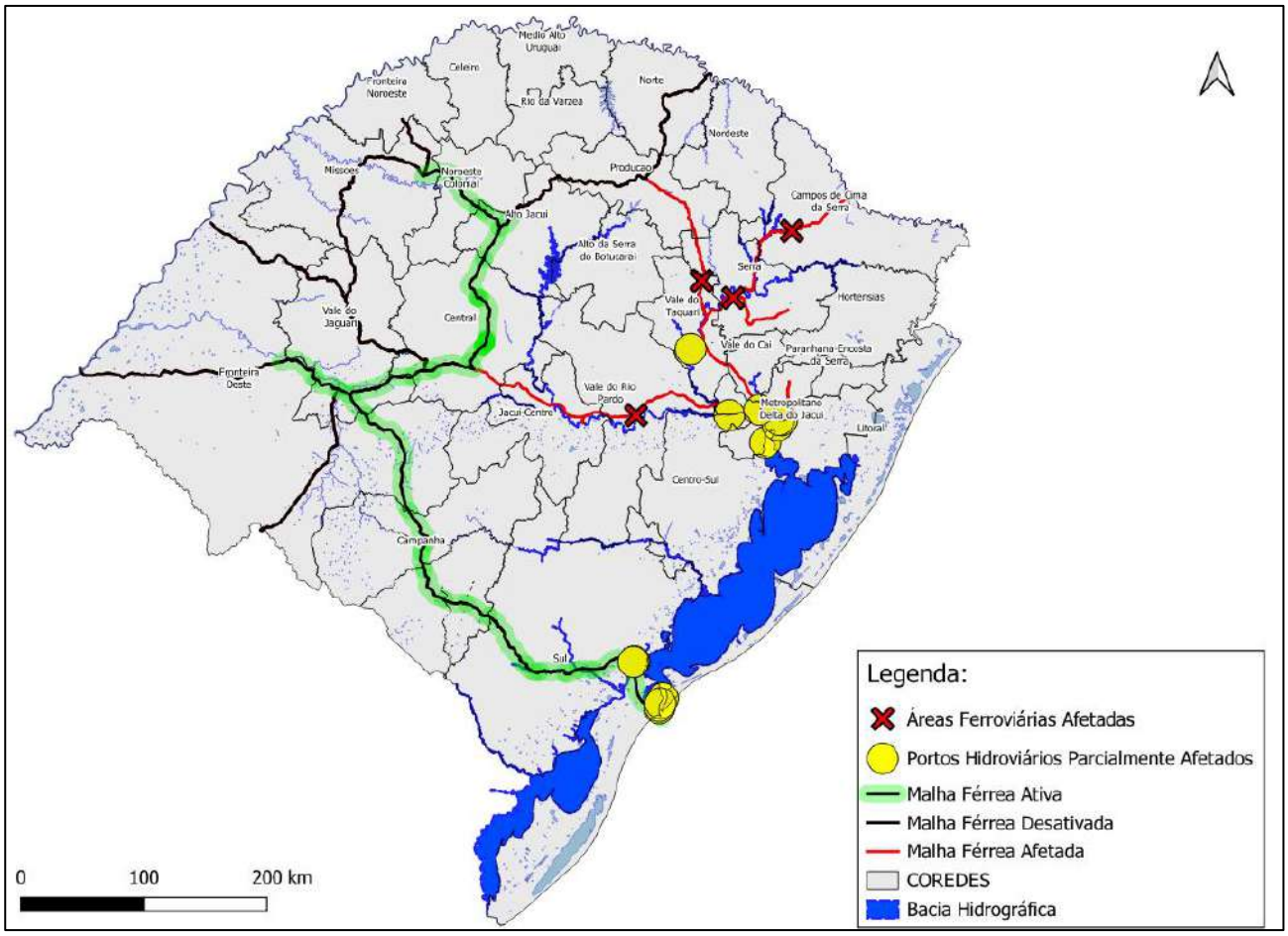


Figura 4: Impactos das enchentes de 2024 na malha ferroviária e hidroviária do RS.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou os efeitos de eventos climáticos extremos no transporte intermodal de cargas no estado do Rio Grande do Sul, com base em dados oficiais da CNT (2025), ONTL (2025) e ANTAQ (2025) e a relação com a localização geográfica da infraestrutura e dos terminais ferroviários e hidroviários. Para isso, foram utilizadas ferramentas como QGIS e Power BI, permitindo o processamento de dados georreferenciados e a visualização de *dashboards* das variações de movimentação de carga.

As análises demonstraram de forma contundente a vulnerabilidade desses modos e fornecem percepções cruciais para a resiliência da infraestrutura logística diante da sucessão de estiagens e enchentes, que afetam os volumes de demanda de transporte e a disponibilidade da prática intermodal. O estudo evidenciou a paralisação atual de extensos trechos da malha ferroviária e as frequentes interrupções da navegação em hidrovias, confirmando um cenário de recuperação complexa e prolongada após cada desastre. O colapso logístico derivado afetou diretamente o transporte de produtos essenciais, como combustíveis e grãos, aumentando a dependência do modo rodoviário e os custos de transporte, com prejuízos econômicos significativos, diante da impossibilidade da prática intermodal para boa parte das cargas e regiões do estado.

Assim, fica evidente a urgência de uma abordagem integrada para a resiliência logística no estado, baseada em fundamentos históricos, técnicos e geográficos, como os mostrados no presente estudo. Para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar a análise com a inclusão de dados do modo rodoviário, reconhecendo a dificuldade inerente à obtenção dessas informações. A aplicação de modelos matemáticos e de análise multicritério poderia oferecer uma visão ainda mais completa dos impactos e subsidiar a formulação de políticas públicas mais eficazes. Complementarmente, análises preliminares sobre os possíveis efeitos da ausência de medidas de adaptação apontam para a tendência de agravamento das interrupções logísticas e das perdas econômicas e sociais, reforçando a importância de se avançar em estratégias de modernização da infraestrutura, diversificação de rotas e adoção de sistemas de monitoramento climático. Dessa forma, amplia-se a

contribuição científica e prática do estudo, orientando ações que assegurem a continuidade operacional do sistema de transporte de cargas no Rio Grande do Sul.

Agradecimentos
Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processo 305384/2025-2) e da FAPERGS (Processo 24/25510001005-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Latif, A.; A. Saad–Eldien e M. Marzouk. (2023) System dynamics applications in crisis management: A literature review. *Journal of Simulation*, 17(6), 800–817. https://doi.org/10.1080/17477778.2022.2088306

Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) (2023). Estatístico Aquaviário 2023. Brasília, DF: ANTAQ. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/ transpviasint.html#pt. Acesso em: 7 abr. 2025.

Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2025). Painel CNT do Transporte - Ferroviário. Brasília, DF: CNT. Disponível em: www.cnt.org.br/painel-cnttransporte-ferroviario. Acesso em: 4 abr. 2025.

Crainic, T. G.; G. Perboli, e M. Rosano (2018) Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 401–418. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.061

Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL) (2025) Painéis Analíticos. Brasília, DF: ONTL. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/. Acesso em: 23 mar. 2025.

Rio Grande do Sul (2024) Governo do Estado. Boletins sobre o impacto das chuvas no RS. Porto Alegre: Governo do Estado. Disponível em: www.estado.rs.gov.br/boletinssobreoimpactodaschuvasnors. Acesso em: 2 mar. 2025.

Rio Grande do Sul (2017) Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. *Modais de transporte.* Porto Alegre: Atlas Socioeconômico do RS. Disponível em: https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/modais-de-transporte.

Sanchez-Rodrigues, V.; A. Potter e M. Naim. (2010) Evaluating the causes of uncertainty in logistics operations. *The International Journal of Logistics Management*, 21(1), 45-64. https://doi.org/10.1108/95740931080001329

Thacker, S.; D. Adshead; M. Fay; S. Hallegatte; M. Harvey; H. Meller; N. O'Regan; J. Rozenberg; G. Watkins e J. W. Hall (2019) Infrastructure for sustainable development. *Nature Sustainability*, 2(4), 324–331. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0256-8

Tveter, E. e T. Tomasgard (2024) How long do transport infrastructure last: evidences from Norwegian roads and rail network. *European Transport Research Review*, 16(1). https://doi.org/10.1186/s12544-024-00650-4

Underwood, B. S.; Z. Guido; P. Gudipudi, e Y. Feinberg. (2017) Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. *Nature Climate Change*, 7(10), 704–707. https://doi.org/10.1038/nclimate3390

United States Department of Transportation (USDOT) (2015) Transportation in the United States (Bureau of Transportation Statistics). Disponível em: www.bts.gov/. Acesso em 8 abr. 25.

Vinicius da Rosa (vinicius.rosa@acad.ufsm.br)
Giovana Denardi Parcianello (giovana.denardi@acad.ufsm.br)
Vanessa Teresinha Alves (vanessa.alves@ufsm.br)
Alejandro Ruiz-Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE PLANEJAMENTO DE ROTAS DE UMA EMPRESA DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS: ROTAS FIXAS x ROTAS FLEXÍVEIS POR DEMANDA

Pedro Henrique do Amaral Peterle[1], **Nickson Scalzer Souza**[1], **Rodrigo de Alvarenga Rosa** [1]
[1] Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO
Várias empresas atacadistas do ramo alimentício distribuem produtos a partir de centros de distribuição (CDs) utilizando rotas fixas. Neste modelo, os caminhões partem do CD e seguem até o limite legal da jornada de trabalho, pernoitando em cidades escolhidas no trajeto, e retornam ao CD. Este trabalho analisa uma estratégia alternativa baseada em rotas flexíveis, planejadas de acordo com a demanda de cada cidade. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo inspirado na meta-heurística *Ant Colony Optimization*, capaz de definir tanto a sequência de atendimento das cidades quanto as cidades de pernoite. Os resultados das estratégias, fixa e flexível, foram comparados, considerando a eficiência operacional. Verificou-se que as rotas flexíveis podem reduzir a necessidade de caminhões, ainda que com um pequeno aumento (cerca de 2,0%) na distância total percorrida. A análise aponta vantagens em adotar rotas flexíveis planejadas em função da demanda, especialmente em cenários com variações de demanda.

1. INTRODUÇÃO

Em cidades do interior do Brasil, muitos estabelecimentos de pequeno porte são abastecidos por grandes atacadistas. Esses atacadistas, face a concorrência, devem reduzir seus custos para se tornarem competitivos. Dessa forma, um dos maiores custos enfrentados por essas empresas são os custos de distribuição dos produtos vendidos. Dessa forma, estudar diferentes estratégias de distribuição que possam trazer reduções de custo são de vital importância para a sobrevivência dessas empresas atacadistas.

A empresa analisada neste artigo distribui produtos alimentícios não perecíveis no estado de Minas Gerais em diferentes cidades. Cada caminhão da empresa inicia uma rota no CD da empresa, atende várias cidades, respeitando a jornada máxima de trabalho do motorista. O motorista então pernoita em uma cidade e no próximo dia inicia uma nova rota. Essa sequência segue até o motorista regressar ao CD da empresa. Atualmente a empresa adota a estratégia de rotas fixas que atendem sempre um mesmo conjunto de cidades e os pernoites são sempre em cidades também fixas, independente da demanda de cada cidade. Este artigo analisa se é melhor para a empresa utilizar a estratégia de elaborar rotas em função da demanda das cidades e com flexibilidade de escolha da cidade de pernoite do motorista.

A jornada de trabalho do motorista é estabelecida pela Lei 13.103, 2015, conhecida como Lei do Motorista, que define o limite diário de oito horas, com até duas horas extras permitidas, podendo chegar a quatro horas extras mediante acordo entre as partes ou convenção coletiva. Nesta pesquisa, em particular, todas as entregas não precisam ser integralmente realizadas no mesmo dia, também é possível que o motorista do caminhão que faz as entregas durma em uma cidade, para continuar as entregas no próximo dia. Assim, o objetivo é planejar cada uma das rotas dos diferentes caminhões, definindo os clientes a serem atendidos em cada dia da rota e escolher a cidade na qual o motorista deverá descansar para continuar a rota. Tudo isso respeitando a jornada de trabalho do motorista estabelecida pela lei. Ao fim de todas as rotas diárias, o motorista deve retornar para o CD da distribuidora. A escolha da cidade para pernoite do motorista incrementa consideravelmente a dificuldade para encontrar a solução, pois não basta apenas encontrar o caminho mais curto como os demais problemas, é preciso também considerar o período de deslocamento até o hotel e as diferentes jornadas de trabalho (uma para cada dia distinto). Este artigo propõe um algoritmo inspirado no *Ant Colony Optimization* (ACO) e no Problema de Roteamento de Veículos (VRP), Múltiplas viagens, Frota heterôgenea, considerando a escolha da cidade para pernoite e descanso do motorista ao fim da jornada de trabalho.

O artigo que apresenta maior proximidade com a presente pesquisa é o de Kamsopa et al. (2021). Este artigo abordou a previsão de descanso para os motoristas após o término da jornada diária, devendo retornar ao mesmo centro de distribuição que iniciou a rota. No entanto, esse artigo foi desenvolvido com base em instâncias teóricas, não sendo aplicado a casos reais e, também, não faz a análise logística das estratégias de planejamento das rotas. Khanna *et al.* (2025) abordaram o problema que considerava pausas obrigatórias para motoristas de 30 minutos após 8 horas de direção nos EUA e de 45 minutos após 4,5 horas na UE. Ettazi, Najat e Abouchabaka (2021) abordaram o VRP com horário de almoço, considerando a necessidade dos motoristas realizassem pausas obrigatórias durante o expediente para almoço. Coelho, Cordeau e Laporte

(2015) foram os primeiros autores que abordaram o VRP com horário de almoço no setor de entrega de móveis que considerava que os motoristas possuíam períodos obrigatórios de almoço durante a jornada. Porém, esses autores não propuseram o horário de pernoite com diversas rotas contínuas e nem consideram a análise logística da melhor estratégia a ser utilizada a fim de reduzir os custos.

2. GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Este artigo concentrou-se na empresa de produtos alimentícios não perecíveis que possui um centro de distribuição localizado em uma cidade de Minas Gerais (MG) e entrega para toda a região no seu entorno. A empresa adota a estratégia de rotas fixas, mantendo um itinerário constante independente da demanda de cada cidade. Dez rotas são realizadas toda semana (Figura 1) atendendo a 74 cidades utilizando caminhões próprios modelo Truck com baú fechado. Em todas elas, os motoristas, após realizarem várias entregas ao longo do dia, ao fim de sua jornada de trabalho legal, precisam dormir fora da cidade do centro de distribuição devido à distância do retorno e/ou a necessidade de iniciar uma rota no dia seguinte perto da cidade de pernoite. Como as rotas são fixas, elas não se ajustam à demanda, ou seja, o mesmo caminhão seguirá sempre o mesmo percurso, com a única variação sendo a exclusão de cidades onde a demanda for zero, deixando a rota ociosa em termos da jornada do motorista. Devido a capacidade do caminhão e questões de segurança, a empresa adota um limite máximo de 1 pernoite do motorista fora da cidade do CD.

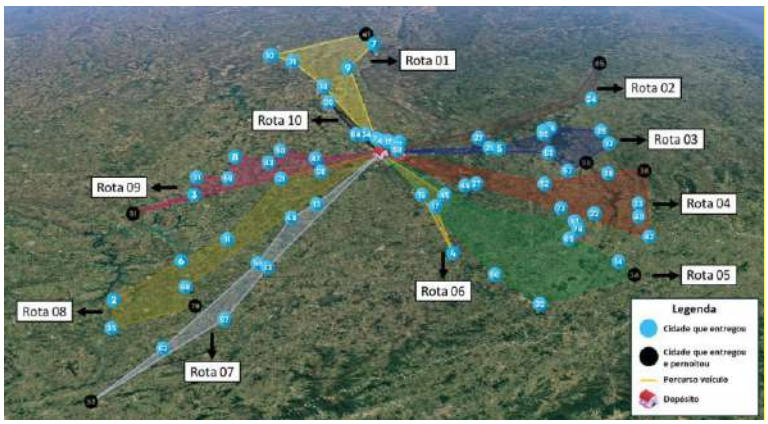


Figura 1: Rotas fixas e cidades atendidas no cenário atual da empresa

As informações foram extraídas do sistema de planejamento logístico da empresa. Os valores analisados compreendem as demandas do período de 30 de setembro a 01 de novembro de 2024. Todas as informações foram tratadas com a devida confidencialidade, seguindo as políticas internas da empresa e normas éticas de sigilo. Por esse motivo, o nome das cidades em que são realizadas as entregas foram omitidos e substituídos para uma identificação numérica. Foram analisados ao todo 5 cenários, cada um com 10 rotas fixas com 1 pernoite com base em dados reais coletados ao longo do período supramencionado (Tabela 1).

Tabela 1: Apresentação dos cenários atuais utilizando a estratégia de rotas fixas adotado pela empresa

Cenário	Qtd. de cidades (un)	Demanda total (un)	Dist. total (km)	Qtd. de caminhões (un)
1	54	491	6.716,34	10
2	56	362	6.658,90	10
3	56	317	6.768,06	10
4	58	294	6.778,25	10
5	58	418	6.652,56	10

3. ALGORÍTMO PROPOSTO

O algoritmo proposto para o problema tratado nesta pesquisa é inspirado na meta-heurística ACO. O pseudocódigo do algoritmo proposto pode ser visto na Quadro 1. Na linha 9 do Quadro 1 é iniciado um loop para encontrar a solução, ele apenas é finalizado quando todas as cidades foram atendidas, para isso, é verificado se precisa adicionar mais um caminhão na solução. Se o caminhão atual possui capacidade em peso e volume para realizar pelo menos uma viagem ele será utilizado. Caso ele não consiga realizar novas entregas e/ou pernoite e/ou retornar ao depósito central, então será adicionado um novo caminhão a solução. Na linha

10 do Quadro 1 é utilizada uma função para encontrar a próxima viagem do caminhão entre dois nós a ser realizada, a fim de atender todas as restrições propostas como a jornada de trabalho, carga máxima e a possibilidade de pernoitar durante o trajeto. O objetivo é reduzir o número de caminhões na rota e a distância total percorrida. A Figura 2 representa a lógica necessária para identificar qual o tipo de viagem deve ser realizado entre dois nós da rota e as respectivas condições para cada um.

Quadro 1: Pseudocódigo do Algoritmo

```
1   leituraDosArquivos();
2   inicializarVariaveis();
3   int iteracao = 0;
4   int solucao = 0;
5   ENQUANTO (iteracao < iteracoesMaximas)
6       limparSolucoes();
7       limparFeromonioRotas();
8       ENQUANTO (solução < qtdSolucoes)
9           ENQUANTO (!solucao.finalizouPercurso())
10              solucao.utilizaNovaFormiga();
11              Viagem viagem = selecionarProximaViagem(solucao);
12              solucao.visitarLocalidade(viagem);
13          FIM – ENQUANTO
14          atualizarFeromonioRotas();
15          solução++;
16      FIM – ENQUANTO
17      atualizarMelhorSolucao();
18  iteracao++;
19  FIM – ENQUANTO
20  gerarRelatorio();
```

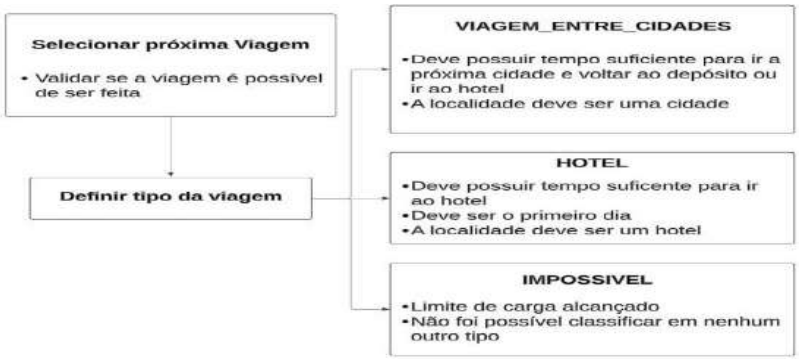


Figura 2: Lógica para selecionar o tipo de viagem

Os parâmetros para execução do algoritmo foram definidos a partir de vários testes como sendo: 1) Importância do resíduo do feromônio para o cálculo do feromônio (α) = 5; 2) Importância da distância para o cálculo do feromônio (β) = 15; 3) Porcentagem da evaporação dos feromônios (ρ) = 0,85; 4) Quantidade total de feromônio (Q) = 10.000; 5) Porcentagem para realizar uma viagem aleatória = 0,1; 6) Quantidade de iterações = 15.000; 7) Quantidade de soluções para cada iteração = 400.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

O computador utilizado tem dois processadores Intel Xeon Silver, com 16 núcleos cada, e 128 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. A Tabela 2 contém as rotas geradas pelo algoritmo proposto para o Cenário 2 e, a Figura 3 as apresenta graficamente. A Rota 9 possui apenas uma cidade a ser visitada, sendo essa cidade a mesma escolhida para pernoitar, o que reduz os custos de rota. Isso provavelmente porque a cidade é muito distante do CD e não daria para ir, entregar e retornar, forçando assim o motorista a pernoitar na cidade. Nesse contexto, é possível concluir que a rota possui um custo relativo maior, pois não está usufruindo de toda a capacidade do caminhão. Uma possível solução seria postergar a entrega, se possível, para agrupar com outras entregas em cidades próximas e não ter que realizar uma rota com alto custo para atender somente uma cidade.

Na Rota 4, como a empresa não autoriza o pernoite em todas as cidades que existem entregas a serem

realizadas, a cidade 38 foi visitada na rota somente para o pernoite, sem existir qualquer entrega para ela, pois nas cidades 55 e 1, o motorista não estava autorizado a pernoitar. Se a empresa flexibilizasse essa questão, eventualmente o algoritmo conseguiria reduzir a distância total percorrida. Percebe-se assim que a dispersão geográfica das cidades atendidas impacta diretamente na melhoria da solução e a restrição de onde pernoitar aumenta ainda mais a complexidade de se encontrar soluções melhores.

Tabela 2: Rotas do Cenário 2 geradas pelo algoritmo proposto

Rota	Sequência de cidades visitadas	Cidade pernoite	Dist.Total (km)
1	CD→72→48→64→47→28→21→43→50→8→**31**→ 59→3→11→6→44→13→CD	31	865,43
2	CD→46→45→16→17→4→60→**30**→34→14→69→ 74→73→52→57→CD	30	845,40
3	CD→**53**→62→35→2→68→33→CD	53	903,93
4	CD→29→63→55→**38**→1→36→12→25→26→19→ 66→CD	38	685,98
5	CD→20→71→**49**→CD	49	720,61
6	CD→**41**→7→CD	41	855,07
7	CD→24→**65**→CD	65	883,32
8	CD→**70**→67→CD	70	618,72
9	CD→**42**→CD	42	567,22

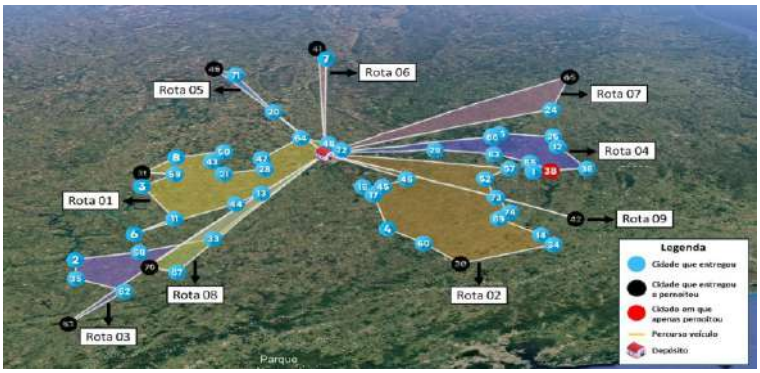


Figura 3: Mapa das Rotas do Cenário 2 geradas pelo algoritmo proposto

De acordo com os objetivos do trabalho de comparar a estratégia de rotas fixas adotada atualmente pela empresa com a estratégia de rotas flexíveis ao utilizar o algoritmo proposto, a Figura 4 apresenta numericamente a comparação entre ambas as estratégias em termos de quantidade de caminhões, enquanto a Figura 5 apresenta a comparação em termos da distância total percorrida por todos os caminhões para cada cenário. Pode-se perceber que a estratégia de rotas flexíveis proposta (Figura 4) gerou uma redução de pelo menos 1 caminhão em cada cenário testado, representando, assim, uma possível redução da frota de caminhões e, por conseguinte, uma possível redução da quantidade de motoristas, o que poderia levar a uma redução dos custos de distribuição para a empresa. Ressalta-se que no Cenário 3 houve uma redução de dois caminhões.

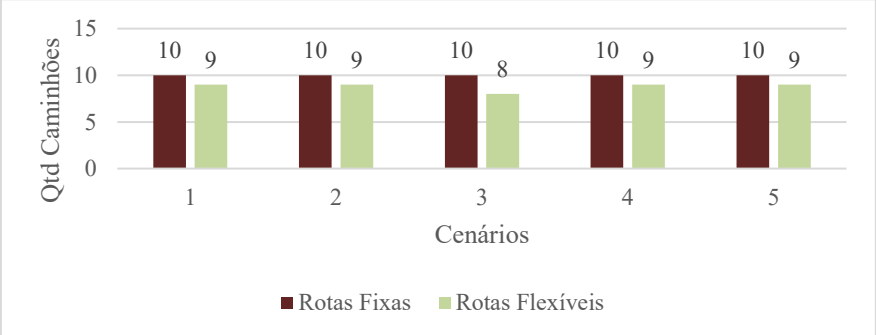


Figura 4: Comparação das estratégias em termos da quantidade de caminhões

Quando comparadas as estratégias em termo de distância (Figura 5), pode se perceber na estratégia proposta (rotas flexíveis) houve um aumento médio de 2,3% na distância total percorrida, contudo, em termos de distância isso representou no máximo 287,5 km no pior caso que foi o Cenário 5, mas em contrapartida, no

Cenário 3, a estratégia de rota flexível proposta representou uma redução de 2,0% na distância total percorrida, ou seja, uma redução de 136,3 km.

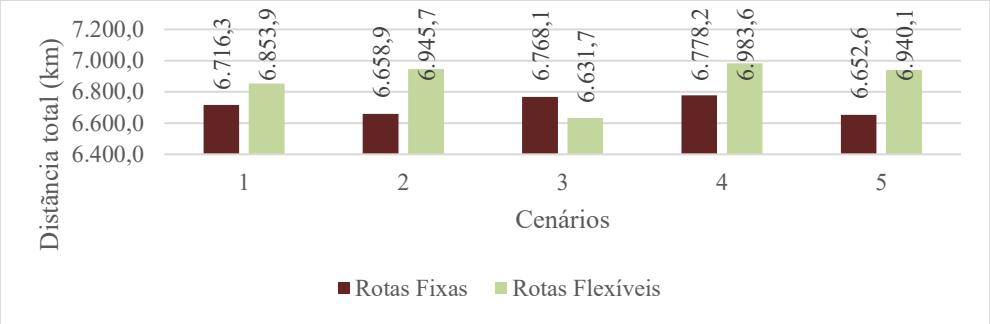


Figura 5: Comparação da distância total percorrida entre as estratégias

Com base nesses resultados vistos, a estratégia proposta de rotas flexíveis se mostra uma alternativa viável para reduzir os custos da empresa, sobretudo, o imobilizado que são os caminhões, e também o custo variável, que são os motoristas e, em alguns casos, no Cenário 3, até mesmo a redução da distância total percorrida.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar se a estratégia proposta de elaboração de rotas flexíveis em função da demanda alcançaria melhor resultado do que as rotas fixas adotadas pela empresa estudada, que não considera a demanda por distribuição de produtos. Para responder isso, foi elaborado um algoritmo computacional inspirado na meta-heurística ACO. Além da análise das estratégias de logística de distribuição, esta pesquisa se diferencia das demais por propor um algoritmo para o problema de selecionar cidades para pernoite dos motoristas ao longo da rota o que aumenta em muito a complexidade do problema tratado. Destacam-se ainda a consideração dos limites da jornada de trabalho do motorista.

A análise dos resultados de cinco cenários reais distintos demonstrou vantagens em utilizar a estratégia de rotas flexíveis, especialmente pela redução na quantidade de caminhões necessários, reduzindo de 1 a 2 caminhões em cada cenário quando comparado com a estratégia atual da empresa de rotas fixas. Caso a estratégia de rotas flexíveis seja adotada, ela poderia levar a reduções de custo de caminhões e, também, de motoristas. Em um cenário houve também a redução da distância total percorrida

Como sugestões para trabalhos futuros: 1) Propõe-se a realização de uma análise econômico-financeira destes potenciais ganhos apresentados por usar rotas flexíveis; 2) Inserir no algoritmo proposto períodos de recebimento dos clientes, restrição de acesso de certos caminhões às cidades, dentre outras restrições que no caso estudado não foram consideradas; 3) Incluir no algoritmo o descanso de 30 min após 5 horas de direção.

Agradecimento
CNPq (processo CNPq: 305795/2023-6)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coelho, L. C.; Cordeau, J. F.; Laporte, G. Solving the vehicle routing problem with lunch break arising in the furniture delivery industry. Journal of the Operational Research Society, 2015. https://doi.org/10.1057/jors.2014.92.

Ettazi, H.; Najat, R.; Abouchabaka, J. GRASP Combined with ILS for the Vehicle Routing Problem with Time Windows, Precedence, Synchronization and Lunch Break Constraints. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, v. 12, n. 5, p. 169-177, 2021. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120521

Kamsopa, K.; Sethanan, K.; Jamrus, T.; Czwajda, L. Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Period Vehicle Routing Problem with Mixed Pickup and Delivery with Time Window, Heterogeneous Fleet, Duration Time and Rest Area. Engineering Journal, v. 25, n. 10, p. 71-84, 2021. https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.10.71.

khanna, A.; Liu, F.; Gupta, S.; Pavia, S.; Mukhopadhyay, A.; Dubey, A. PDPTW-DB: MILP-Based Offline Route Planning for PDPTW with Driver Breaks. In: 26th International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN 2025), Hyderabad, India, January 04-07, 2025. ACM, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3700838.3700854

Pedro Henrique do Amaral Peterle (pedro@phpeterle.com); *Nickson Scalzer Souza* (nickson.souza@edu.ufes.br); *Rodrigo de Alvarenga Rosa* (rodrigo.a.rosa@ufes.br)
Universidade Federal do Espírito Santo, Goiabeiras, CT, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória - ES

CONSOLIDAÇÃO DE CARGAS PARA OTIMIZAÇÃO DE TRANSFERÊNCIAS LOGÍSTICAS: UM ESTUDO SOBRE REDUÇÃO DE CUSTOS E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Gabriel Guilherme Batista Ferreira, Jeniffer De Nadae, Beatriz Vilas Boas Jorge , Isabelly Pinto de Morais
Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
A consolidação de cargas é uma alternativa relevante para reduzir custos e aumentar a eficiência logística em empresas com elevado volume de transferências. Este estudo, realizado em uma empresa do setor Pet Nutrition, teve como objetivo propor uma estratégia para diminuir o número de transferências mensais e otimizar a utilização dos veículos. A metodologia envolveu análise de dados operacionais, simulação de cenários e avaliação de impactos financeiros e operacionais, por meio de um estudo de caso. A solução consistiu na adoção de rodotrens com compartimentos separados, permitindo o transporte conjunto de matéria-prima e embalagens e substituindo oito transferências mensais por seis. Os resultados mostraram redução de 21,8% nos custos logísticos, maior previsibilidade nas entregas, menor impacto ambiental, reduzindo a emissão de CO2 pela quantidade de viagens e maior segurança das cargas. Conclui-se que a consolidação é uma estratégia viável e replicável, com benefícios econômicos, operacionais e ambientais.

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário de competitividade global, a eficiência logística tornou-se uma prioridade estratégica para as organizações. A logística de transporte, em especial, exerce papel central na movimentação de insumos e produtos finais, sendo diretamente responsável por atender às exigências do mercado com agilidade, custos reduzidos e sustentabilidade (Ballou, 2006). No entanto, a falta de integração e de planejamento adequado pode gerar processos ineficientes, impactando negativamente os custos operacionais e a performance da cadeia de suprimentos (Chopra et al., 2021). Dados recentes do Instituto de Logística e *Supply Chain* apontam que os custos logísticos no Brasil chegaram a 18,4% do PIB em 2023, evidenciando a importância do tema para a competitividade nacional (ABOL BRASIL, 2023). Além disso, práticas como o uso inadequado da capacidade dos veículos e a fragmentação dos transportes acarretam desperdícios e aumentam as emissões de poluentes (Ballou, 2006).

Frente a esses desafios, estratégias como o *Just-in-Time* (JIT) e a gestão enxuta (*lean*) têm sido amplamente adotadas, visando sincronizar o fornecimento com a demanda e reduzir estoques e deslocamentos desnecessários (Ohno, 1997). Entre essas abordagens, destaca-se a consolidação de cargas, que consiste em agrupar diferentes volumes ou tipos de carga em um único transporte, otimizando a ocupação dos veículos e reduzindo custos operacionais, rotas e emissões de CO_2 (Bowersox et al., 2014). Contudo, a consolidação de cargas também impõe desafios logísticos, como a necessidade de maior coordenação entre áreas e o risco de atrasos, especialmente quando há variação na demanda dos produtos transportados (Chopra e Meindl, 2021). Ainda assim, quando bem implementada, pode representar uma solução eficaz para empresas com operações complexas.

Este estudo concentra-se em uma empresa do setor de Pet Nutrition que realiza transferências regulares de matéria-prima e embalagens entre sua matriz (Empresa A) e uma filial (Empresa B). Atualmente, são realizadas quatro viagens mensais para cada tipo de material, utilizando rodotrens para a matéria-prima e carretas para embalagens. Apesar de funcional, esse modelo logístico apresenta altos custos e dificuldades de planejamento, especialmente pela volatilidade da demanda e pela ineficiência do transporte segregado. As carretas, especificamente, apresentam custos elevados apesar de sua menor capacidade de carga, em função da elevada demanda por esse tipo de transporte no mercado. (Localiza Frotas, 2024).

Assim, pretende-se propor uma solução baseada na consolidação de cargas, com o uso exclusivo de rodotrens equipados com compartimentos separados para transportar, simultaneamente, ambos os materiais. Tendo como objetivo objetivo propor uma estratégia para diminuir o número de transferências mensais e otimizar a utilização dos veículos. A proposta visa manter o volume total de abastecimento, reduzindo a quantidade de

viagens e elevando a eficiência operacional, com ganhos financeiros e ambientais (Bowersox; Closs; Cooper, 2014).

Para validar essa proposta, a metodologia do estudo inclui a análise de dados logísticos reais da empresa, a identificação de gargalos no fluxo atual, e a simulação de cenários alternativos, por meio de um estudo de caso. As etapas envolvem ferramentas como o MPS (*Master Production Schedule*) e o DRP (*Distribution Requirements Planning*), além de modelagens no Excel para mensurar os impactos financeiros e operacionais.

A empresa analisada é considerada de grande porte e opera com alto grau de complexidade, sendo referência nacional em nutrição animal e contando com estrutura logística robusta. O modelo de transporte atual, porém, apresenta limitações que comprometem a integração e o aproveitamento de recursos. A pesquisa pretende contribuir com a área de logística empresarial ao demonstrar, de forma aplicada, como a consolidação de cargas pode reduzir custos, aumentar a eficiência e gerar impacto positivo no desempenho operacional. Sua replicabilidade em outros contextos com demandas similares reforça seu potencial estratégico no setor logístico.

2. METODOLOGIA

A pesquisa adota um estudo de caso com abordagem aplicada, baseando-se em dados reais da operação logística da empresa. A Empresa selecionada (Empresa A) atua no mercado de Pet Nutrition há mais de quatro décadas no Brasil, destacando-se pela qualidade de seus produtos e pela capacidade de inovação. Além disso, atua como um *player* importante no segmento, lidando com desafios típicos de empresas de grande porte e com a complexidade da gestão de múltiplos fluxos logísticos. Diante de uma extensa rede de distribuição e de uma cadeia de suprimentos altamente complexa, a empresa enfrenta desafios logísticos significativos, especialmente no transporte de matérias- primas e embalagens entre sua Matriz e a Filial, cuja distância entre elas é de aproximadamente 2.200 kilometros.

Sua operação logística é essencial para garantir o abastecimento contínuo de matérias-primas e embalagens, que são utilizadas na produção de alimentos para animais de estimação. A Filial B, situada em uma região estratégica, atua na realização de etapas do processo produtivo e na distribuição dos produtos acabados. A relação logística entre a matriz e a Filial é intensa, com transferências constantes de materiais essenciais para a produção. Contudo, o modelo atual de transporte apresenta-se de forma fragmentada, gerando ineficiências operacionais e custos elevados.

Atualmente o transporte de materiais entre a Empresa A e sua Filial B é realizado de forma segregada. A matéria-prima é transportada em quatro rodotrens mensais, enquanto as embalagens são enviadas em quatro carretas mensais. Esse modelo foi estabelecido para atender às demandas específicas de cada material, mas apresenta várias limitações. Foram coletados dados de fluxos logísticos, custos de frete, capacidade de carga e histórico de demanda. Utilizaram-se ferramentas como MPS, DRP e simulações de cenários no Microsoft Excel para validar a viabilidade da proposta. Os dados foram coletados por meio de entrevista com os gestores de logística e transporte e análise de dados secundários, como relatórios e informações disponíveis no sistema.

A estratégia desenvolvida foi a consolidação dos dois fluxos em seis viagens mensais com rodotrens de 80 toneladas, mantendo o mesmo volume total transportado (160 t de matéria-prima e 80 t de embalagens). O modelo foi avaliado com base em indicadores operacionais, financeiros e ambientais.

3. RESULTADOS

Atualmente, o transporte entre a Empresa A e sua Filial B é realizado de forma separada, com quatro rodotrens mensais para matéria-prima e quatro carretas mensais para embalagens, resultando em ineficiências logísticas. Os principais problemas identificados incluem a subutilização da capacidade dos veículos, aumento de custos operacionais, impacto ambiental elevado devido ao número excessivo de viagens, dificuldades no planejamento logístico, falta de integração entre os fluxos e custos adicionais de coordenação. Esses fatores comprometem a eficiência operacional e a competitividade da empresa.

A implementação da nova estratégia de transporte entre a Empresa A e sua Filial B requer um planejamento detalhado que contempla a alteração no cronograma de envios e a utilização de rodotrens com compartimentos separados para o transporte simultâneo de matéria-prima e embalagens. Atualmente, são realizadas oito transferências mensais — quatro de matéria-prima e quatro de embalagens —, mas com a consolidação de cargas, esse número será reduzido para seis, mantendo o mesmo volume de materiais e eliminando o uso das carretas, que operavam com subutilização da capacidade. A nova estratégia prevê envios semanais com rodotrens transportando ambos os tipos de materiais conforme a demanda, integrando o planejamento ao MPS e ao DRP da empresa. O MPS e o DRP foram utilizados e alinhados nos cronogramas de envio para garantir que os materiais cheguem à Filial B no momento adequado para atender à demanda de produção.

Os compartimentos serão segregados para garantir a integridade dos produtos, dimensionados conforme o volume médio transportado, e projetados com flexibilidade para variações de demanda, incluindo sistemas de proteção para garantir a segurança da carga. A proposta será implantada gradualmente, com acompanhamento por indicadores de desempenho (KPIs) para avaliar sua eficácia operacional e impacto na produção. A consolidação de cargas traz projeções de benefícios significativos, como a redução do número de transferências, simplificação da gestão de transportes, diminuição de custos operacionais e melhor aproveitamento da capacidade dos veículos. Essa otimização promove ganhos logísticos, como rotas mais eficientes, menor número de viagens, integração dos fluxos de materiais e maior controle da operação. Com maior agilidade na resposta à demanda e melhoria no planejamento, a Empresa A fortalece sua competitividade no setor de Pet Nutrition, entregando um serviço mais eficiente, sustentável e com maior valor agregado para o mercado.

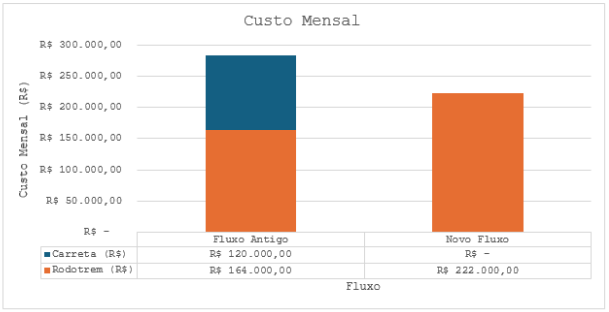
A consolidação de cargas entre a Empresa A e sua Filial B foi proposta como estratégia para otimizar transferências logísticas, integrando o transporte de matéria-prima e embalagens em rodotrens com compartimentos separados. A nova configuração reduziu o número de transferências mensais de oito para seis, mantendo o mesmo volume de abastecimento (160 t de matéria-prima e 80 t de embalagens), eliminando o uso de carretas subutilizadas. O planejamento logístico foi reorganizado para garantir entregas semanais, alinhadas ao MPS e ao DRP. Cada rodotrem opera com segregação de carga, compartimentos ajustáveis à demanda e sistemas de segurança, garantindo integridade e flexibilidade. A implementação foi acompanhada de KPIs para monitoramento de eficiência e impacto na produção. Os benefícios projetados incluem a redução de viagens, melhor utilização da capacidade dos veículos, menor complexidade de gestão, corte de custos operacionais e maior previsibilidade. A proposta também simplifica o planejamento logístico e eleva o controle da operação, aumentando a agilidade frente a oscilações de demanda.

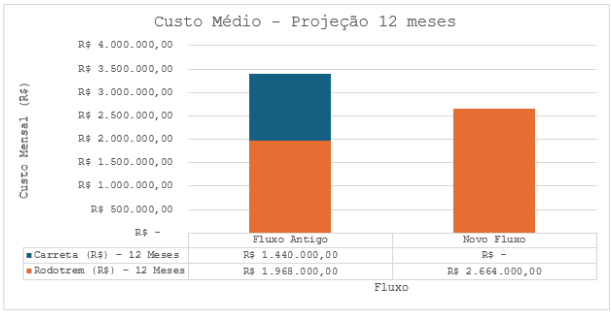
A simulação do novo fluxo logístico revelou ganhos substanciais: com a consolidação, o custo mensal caiu de R$ 284.000 para R$ 222.000, resultando em economia anual estimada de R$ 744.000 (redução de 21,8%), conforme Figura 1. Cenários de alta ou baixa demanda demonstraram resiliência operacional, com manutenção da eficiência mesmo com variações de até 10% no volume transportado. Qualitativamente, a estratégia trouxe maior integração entre as áreas, redução da carga administrativa, melhoria na rastreabilidade, no tempo de trânsito e na sustentabilidade da operação.

Assim, no último trimestre de 2024, a simulação da nova estratégia logística mostrou melhorias significativas na organização do fluxo, com maior previsibilidade e integração entre planejamento, suprimentos e produção. A consolidação de cargas reduziu o número de fornecedores, facilitou a rastreabilidade das entregas e diminuiu a carga de trabalho da equipe de fretes. Além disso, a redução das viagens contribuiu para a diminuição das emissões de poluentes, alinhando-se às metas de sustentabilidade da empresa. O novo modelo também aumentou a capacidade de resposta a imprevistos, melhorou a comunicação interna e fortaleceu a cultura organizacional voltada à eficiência e sustentabilidade, gerando impactos positivos na produtividade e na imagem da empresa.

Fluxo	Rodotrem (R$)	Carreta (R$)	Delta Fluxo
Fluxo Antigo	R$ 164.000,00	R$ 120.000,00	R$ 62.000,00
Novo Fluxo	R$ 222.000,00	R$ -	

Fluxo	Rodotrem (R$) - 12 Meses	Carreta (R$) - 12 Meses	Delta Fluxo
Fluxo Antigo	R$ 1.968.000,00	R$ 1.440.000,00	R$ 744.000,00
Novo Fluxo	R$ 2.664.000,00	R$ -	





Projeção: Na projeção, foi considerada a forma linear. Apesar de não ser a mais indicada, levou-se em consideração o contrato entre as empresas, ou seja, não haverá alteração do custo dos veículos já definidos em contrato.

Figura 1: Projeção mensal e anual

4. CONCLUSÃO

Os objetivos propostos neste trabalho foram atendidos. A estratégia do processo atual permitiu identificar ineficiências como a fragmentação do transporte e a subutilização de veículos, que resultavam em custos elevados e dificuldades de planejamento. Em resposta, foi proposta uma estratégia consolidada que eliminou o uso de carretas, permitindo o transporte simultânea de matéria-prima (160 tonelada/mês) e embalagens (80 tonelada/mês) em rodotrens de 80 toneladas de capacidade, reduzindo as transferências de oito para seis mensais. As simulações no Microsoft Excel comprovaram o impacto financeiro positivo, com uma economia mensal de R$ 62.000 (21,8% de redução), totalizando R$ 744.000 anuais. Qualitativamente, a equipe operacional relatou maior previsibilidade, melhor coordenação e rastreabilidade, além de menor carga de trabalho com fretes. A taxa de ocupação dos veículos atingiu o máximo, melhorando segurança e tempo de trânsito.

A análise de cenários de demanda volátil confirmou a flexibilidade da nova estratégia. Em cenários de aumento ou queda (simulada em 10% de queda), o modelo manteve a eficiência e o custo por tonelada, adaptando-se sem comprometer a operação. Isso também promoveu a padronização e a comunicação interdepartamental. Do ponto de vista ambiental e organizacional, a redução do número de viagens também contribuiu para a diminuição da emissão de poluentes, alinhando-se às metas de sustentabilidade da empresa. Internamente, houve melhora na percepção dos stakeholders sobre a maturidade do processo logístico. A consolidação contribuiu para o desenvolvimento de uma cultura organizacional voltada à eficiência e à sustentabilidade, gerando impactos positivos tanto na produtividade interna quanto na percepção externa da marca como empresa comprometida com boas práticas logísticas.

Apesar dos resultados positivos, é importante destacar algumas limitações do estudo. A análise foi restrita a uma rota específica e não considerou variáveis como sazonalidade, indisponibilidade de frota ou mudanças abruptas na demanda. Além disso, fatores como custos indiretos, disponibilidade de motoristas e questões regulatórias podem influenciar a aplicabilidade da proposta. Ainda, não foram mensurados a quantidade de CO2 que foi reduzida.

Com base nos resultados, recomenda-se que a empresa implemente a estratégia proposta de forma gradual, priorizando rotas com características operacionais semelhantes. A integração da consolidação com ferramentas de planejamento, como MPS e TMS, pode potencializar os ganhos, além de permitir um

monitoramento contínuo da eficiência. Este estudo também contribui para fomentar pesquisas futuras, como a expansão da aplicação da consolidação de cargas em outras regiões do Brasil, a utilização de tecnologias de roteirização baseadas em inteligência artificial, a análise dos impactos no nível de serviço e a avaliação dos benefícios em termos de redução da pegada de carbono. A proposta aqui apresentada contribui com a área de logística empresarial ao demonstrar, de forma prática, como uma estratégia simples de consolidação pode gerar resultados significativos em termos de custo, desempenho e sustentabilidade.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abol Brasil. Custo Logístico No Brasil Atingem 18,4% Do Pib Em 2023. São Paulo, 2023. Disponível Em: Https://Abolbrasil.Org.Br/Noticias/Noticias-Do-Setor/Custos-Logisticos-No-Brasil-Atingem-184-Do-Pib-Em-2023. Acesso Em: 24 Set. 2024.

Ballou, Ronald. Gerenciamento Da Cadeia De Suprimentos: Planejamento, Organização E Logística. 5. Ed. Porto Alegre, 2006.

Bowersox, Donald; Closs, David; Cooper, Bixby. Gestão Logística E Da Cadeia De Suprimentos. 4. Ed. Porto Alegre, 2013.

Bowersox, Donald; Closs, David; Cooper, Bixby. Supply Chain Logistics Management. 5. Ed. Nova Iorque, 2014.

Chopra, Sunil; Meindl, Peter. Supply Chain Management: Strategy, Planning, And Operation. 7. Ed. Noida, 2021.

Christopher, Martin. Logistics & Supply Chain Management. 5. Ed. Nova Iorque, 2016.

Confederação Nacional Do Transporte - Cnt. Pesquisa De Rodovias 2022. Disponível Em: Https://Pesquisarodovias.Cnt.Org.Br/. Acesso Em: 27 Set. 2024.

Coyle, John Joseph.; Bardi, Edwar.; Novack, Robert. Management Of Transportation. 7. Ed. Texas, 2011.

Cscmp - Council Of Supply Chain Management Professionals. Supply Chain Management Terms And Glossary. 2020.

Dc Logistics Brasil. A Consolidação De Cargas Na Importação Aérea. Itajaí, 2024. Disponível Em: Https://Dclogisticsbrasil.Com/A-Consolidacao-De-Cargas-Na-Importacao-Aerea. Acesso Em: 15 Jan. 2025.

Epl – Empresa De Planejamento E Logística. Plano Nacional De Logística: Pnl 2025 – Relatório Executivo. Brasília, 2018. Disponível Em: Https://Www.Epl.Gov.Br/Pnl. Acesso Em: 17 Nov. 2024.

Kembro, Joakim Hans; Norrman, Andreas. Warehouse Configuration In Omni-Channel Retailing: A Multiple Case Study. International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management, V.50, 2020.

Lambert, Douglas; Stock, James; Ellram, Lisa. Fundamentals Of Logistics Management. Boston, 1998.

Localiza Frotas. Rodotrem: O Que É, Vantagens E Quando Usar Na Sua Frota. Belo Horizonte, 2024. Disponível Em: Https://Frotas.Localiza.Com/Blog/Rodotrem. Acesso Em: 20 Jun. 2025.

Mecalux. Consolidação De Cargas: Agrupar Envios Para Facilitar O Transporte. São Paulo, 2023. Disponível Em: Https://Www.Mecalux.Com.Br/Blog/Consolidacao-Carga. Acesso Em: 07 Jan. 2025.

Muckstadt, John; Sapra, Amar. Foundations Of Supply Chain Management. 1. Ed. [S. L.], 2010.

Mundial Log. Consolidação De Cargas: 10 Estratégias Para Reduzir Custos Logísticos. São Paulo, 2024. Disponível Em: Https://Mundiallog.Com.Br/Consolidacao-De-Cargas-Estrategias-Para-Reduzir-Custos/. Acesso Em: 20 Jun. 2025.

Ohno, Taiichi. O Sistema Toyota De Produção: Além Da Produção Em Larga Escala. 1. Ed. Porto Alegre, 1997.

Rushton, Alan; Croucher, Phil; Baker, Peter. The Handbook Of Logistics And Distribution Management. 5. Ed. Londres, 2014.

Srivastava, Samir. Green Supply-Chain Management: A State-Of-The-Art Literature Review. [S. L.], 2007. Disponível Em:Https://Onlinelibrary.Wiley.Com/Doi/Abs/10.1111/J.1468-2370.2007.00202.X. Acesso Em: 29 Set. 2024.

Stock, James; Boyer, Stefanie. Developing A Consensus Definition Of Supply Chain Management: A Qualitative Study. International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management, V.39, P.690–711, 2009.

Vidal, Carlos; Goetschalckx, Marc. A Survey Of Supply Chain Models For Designing And Managing Supply Chain Networks. European Journal Of Operational Research, V.98, P.1-18, 1997.

Wang, Gang Et Al. Big Data Analytics In Logistics And Supply Chain Management. International Journal Of Production Economics, V.176, P.98-110, 2016.

EXCESSO DE PESO EM RODOVIAS: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NA SEGURANÇA E INFRAESTRUTURA

Paulo Bressaglia, Diogenes Cortijo Costa
Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
Este artigo analisa os impactos do excesso de peso em veículos de carga nas rodovias brasileiras, com foco na degradação do pavimento, riscos à segurança viária e limitações na fiscalização. Por meio de revisão narrativa da literatura técnica, normativa e institucional, identificou-se um conjunto de entraves operacionais e regulatórios que comprometem o controle da sobrecarga. São discutidos os efeitos estruturais provocados por veículos com sobrepeso, as tecnologias empregadas na fiscalização e os desafios enfrentados pelos transportadores. Os resultados apontam a necessidade de integrar dispositivos de pesagem, instrumentos legais e soluções tecnológicas com políticas públicas contínuas e coordenação interinstitucional. Conclui-se que o enfrentamento do excesso de peso exige uma abordagem sistêmica, capaz de articular segurança viária, conservação da infraestrutura e eficiência logística.

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira é a espinha dorsal da logística do país. Com mais de 1,7 milhão de quilômetros de extensão, dos quais apenas 12,4% são pavimentados, é responsável por cerca de 65% da movimentação de cargas e 95% do transporte de passageiros (CNT, 2023). No entanto, essa relevância apresenta desafios significativos, como a deterioração precoce da infraestrutura, altos índices de acidentes e fragilidades no controle operacional.

Entre os fatores agravantes, destaca-se o excesso de peso, prática que compromete tanto a durabilidade do pavimento quanto a segurança dos usuários. Pesquisas estimam que a vida útil do pavimento pode ser reduzida em até 70% onde o tráfego de cargas é mais intenso, com custos adicionais anuais da ordem de 1,4 bilhão de reais em manutenções não previstas (CNT, 2014). No campo da segurança, veículos com sobrepeso apresentam menor estabilidade, maior tempo de frenagem e elevado risco de falhas mecânicas, fatores que contribuem para o aumento de colisões e tombamentos (Alves e Marcos, 2020; Vallejo *et al*., 2022).

Estudos pioneiros como DNIT (2006) e Martins e Serravale (2007) já evidenciavam a prevalência de sobrepeso no tráfego de cargas, com alguns trechos atingindo 85% do volume de veículos. Essa situação persiste. De acordo com o Painel de Acompanhamento dos Infratores do Plano Nacional de Pesagem, mais de 1,3 milhão de autuações por excesso de peso foram registradas em rodovias federais nos últimos quinze anos (DNIT, 2025). A literatura técnica também corrobora que a sobrecarga causa impactos diretos no pavimento, como trincas, afundamentos e outros danos estruturais, reduzindo drasticamente sua durabilidade (Vargas, 2021).

Apesar da regulamentação existente, o controle do excesso de peso nas rodovias brasileiras ainda apresenta limitações operacionais. As ações não são permanentes, concentram-se em horários restritos e possuem baixa cobertura territorial, o que favorece a evasão e compromete sua efetividade (Costa *et al*., 2021). Soma-se a isso a carência de recursos humanos e equipamentos, que fragiliza o sistema de monitoramento. Assim, ganham relevância as inovações tecnológicas, como os sistemas de pesagem em movimento (WIM), capazes de ampliar o alcance das fiscalizações sem comprometer a fluidez do tráfego (Alves e Marcos, 2020). A atuação efetiva de mecanismos de controle também tem papel central na conservação da infraestrutura e na segurança viária, com influência direta na redução da degradação dos pavimentos e a prevenção de acidentes associados à instabilidade de veículos sobrecarregados (Costa *et al*., 2021).

Diante desse cenário, este artigo propõe uma análise crítica da infraestrutura de controle do excesso de peso nas rodovias brasileiras, considerando dimensões normativas, operacionais e tecnológicas, com o objetivo de contribuir com a formulação de políticas públicas mais eficazes e para o aprimoramento da gestão rodoviária.

2. METODOLOGIA

Foi adotada a revisão narrativa como estratégia metodológica, que é adequada para temas complexos e interdisciplinares que envolvem dimensões técnicas, legais, econômicas e sociais (Rother, 2007). Para assegurar rigor e transparência, foram seguidas as recomendações da SANRA – *Scale for the Assessment of Narrative Review Articles* (Baethge *et al*., 2019).

A busca por referências ocorreu entre fevereiro e agosto de 2025, considerando publicações de 2005 a 2025, com ênfase em estudos relevantes para o contexto brasileiro. Foram consultadas bases acadêmicas (Google Acadêmico, Scielo), relatórios institucionais (ANTT, DNIT, CONTRAN) e acervos de teses e dissertações de universidades brasileiras (Unicamp, USP, UFSC). Os descritores utilizados incluíram: excesso de peso, rodovia, fiscalização e segurança viária.

O processo de seleção envolveu três etapas: (i) identificação, com levantamento inicial de 113 documentos; (ii) triagem, com exclusão de duplicatas e de trabalhos não relacionados ao tema, resultando em 45 referências; e (iii) elegibilidade e inclusão, com leitura integral e avaliação qualitativa, totalizando 20 fontes.

As fontes foram organizadas em quatro eixos temáticos: impactos no pavimento e segurança (cinco fontes), aspectos legais e normativos (sete fontes), tecnologias de fiscalização (cinco fontes) e percepções e práticas dos transportadores (três fontes). A análise foi conduzida por leitura interpretativa e abordagem qualitativa indutiva (Bardin, 2011), com o objetivo de identificar entraves, lacunas e oportunidades de aprimoramento.

3. RESULTADOS

Nos tópicos a seguir, cada eixo estabelecido na metodologia é apresentado e discutido, com destaque para evidências recentes e suas implicações práticas.

3.1 Impactos no pavimento e segurança

Nos métodos tradicionais de dimensionamento e também modelos modernos como o MeDiNa do DNIT, utiliza-se o conceito de número equivalente de repetições de eixos padronizados para estimar os esforços acumulados sobre o pavimento ao longo do tempo (Vargas, 2021). Por isso, quando há divergência entre o tráfego real e o previsto em projeto, especialmente com a presença de veículos com excesso de peso, ainda que ocasionalmente, o pavimento está sujeito a uma série de patologias que comprometem sua funcionalidade como trincas, afundamentos plásticos, desagregamento superficial e rompimento das camadas inferiores (Costa *et al*., 2021; Ghisolfi, 2018; Lima, 2017). E, mesmo dentro das margens de tolerância permitidas pela legislação, o excesso de peso por eixo já é capaz de acelerar significativamente o processo de degradação (Vallejo *et al*., 2021).

Pesquisas demonstram que veículos com sobrepeso de 20 a 30% podem reduzir a vida útil do pavimento em até 50%, elevando de forma significativa os custos de manutenção (Alves e Marcos, 2020). Além disso, a degradação estrutural das vias afeta diretamente a segurança dos usuários, pois veículos com excesso de carga apresentam menor capacidade de frenagem, perda de estabilidade em rampas e curvas, maior desgaste de freios e suspensão e risco elevado de tombamentos (Vallejo *et al*., 2022).

Essas evidências reforçam que os limites de carga definidos em projeto não constituem apenas um requisito técnico de engenharia, mas um elemento essencial para garantir a durabilidade da infraestrutura e a proteção dos usuários das rodovias.

3.2 Aspectos legais e normativos

O controle do excesso de peso no transporte rodoviário nacional tem como base o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), que determina que os veículos só podem circular dentro dos limites de peso bruto total, peso por eixo e capacidade máxima de tração definida pelo fabricante (Brasil, 2024). O descumprimento desses parâmetros é classificado como infração média, sujeita a multa progressiva, retenção do veículo e obrigatoriedade de transbordo da carga excedente. Em complemento, a chamada Lei das Balanças estabelece tolerâncias de até 5% para o peso bruto total ou combinado e de 12,5% para o peso transmitido por eixo (Brasil, 2021).

No plano regulatório, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), por meio da Resolução nº 882/2021 (CONTRAN, 2021), detalha os limites de pesos e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres, enquanto o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), através da Resolução nº 11/2022 (DNIT, 2022), estabelece normas sobre a circulação de veículos com excedentes de peso e dimensões. Adicionalmente, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) atua na regulação do transporte rodoviário de cargas, sobretudo em relação ao controle da atividade das empresas transportadoras. Um dos

seus principais instrumentos é o Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC) - Resolução ANTT nº 5.982/2022 (ANTT, 2022) - que fixa diretrizes para garantir a regularidade e a rastreabilidade das operações logísticas.

Embora a legislação estabeleça limites e tolerâncias para o peso por eixo e peso bruto total, a efetividade normativa permanece condicionada à capacidade de fiscalização. Além disso, a fragmentação das normas contribui para a persistência do problema, reforçando a necessidade de maior integração regulatória.

Nesse contexto, a análise de experiências internacionais fornece subsídios para possíveis caminhos de aprimoramento da fiscalização. Na Europa, por exemplo, a Holanda emprega sistemas de pesagem em movimento (WIM), associados a câmeras de vídeo em todas as faixas e acostamentos, permitindo não apenas a detecção de veículos em situação irregular, mas também a identificação de evasões. Os dados coletados alimentam bases de fiscalização e servem para classificar empresas transportadoras conforme a frequência de infrações, possibilitando ações educativas e preventivas (Fontenele, 2011). Já nos Estados Unidos, alguns estados regulam o excesso de carga por meio de taxas e permissões, admitindo tolerâncias diferenciadas de até 5% no peso bruto total e 10% por eixo simples ou tandem, desde que a tolerância global do peso bruto total não seja excedida. Essas autorizações são específicas por estado e rodovia, permitindo uma gestão adaptada às características locais da infraestrutura (Vallejo *et al*., 2022).

3.3 Tecnologias de fiscalização

No Brasil, os sistemas de verificação têm se concentrado na aferição do peso por eixo, em conformidade com os limites estabelecidos pela legislação. No entanto, essa abordagem tem gerado críticas recorrentes por parte dos transportadores, que alegam inconsistência entre a pesagem por eixo e o peso total da carga, sobretudo quando está dentro dos limites legais, mas ocorre má distribuição sobre os eixos (Ghisolfi, 2018; Péra *et al*., 2021).

São três os principais sistemas de pesagem utilizados no país: (i) as balanças estáticas, que demandam a parada completa do veículo para a verificação individual de cada eixo, caracterizando-se pela elevada precisão e menor custo operacional, embora apresentem baixa capacidade de processamento e necessidade de infraestrutura complexa; (ii) as balanças semiestáticas, as quais permitem a passagem do veículo em baixa velocidade, geralmente limitada a 5 km/h, oferecendo maior agilidade, porém com precisão inferior e necessidade de controle rigoroso da velocidade; e iii) as balanças dinâmicas, também conhecidas como WIM (*Weigh-In-Motion*) ou HS-WIM (*High Speed Weigh-In-Motion*), que possibilitam a aferição do peso em movimento, com velocidades de até 80 km/h, representando um avanço significativo para a fiscalização por assegurarem fluxo contínuo, elevada eficiência e integração com sistemas automatizados. Todavia, apresentam custos de implantação mais elevados, maior sensibilidade a falhas de calibração e exigem pavimentos em condições adequadas para garantir a confiabilidade das medições (Bock e Brito, 2018; Ghisolfi, 2018; Lima, 2017; Vargas, 2021; TOTVS, 2023).

Outras tecnologias na área de fiscalização viária têm ampliado as possibilidades de controle automatizado do excesso de peso. Por exemplo, os sensores integrados ao pavimento, que elevam a precisão dos sistemas WIM; as câmeras com tecnologia OCR (*Optical Character Recognition*), capazes de identificar automaticamente as placas dos veículos e registrar infrações em tempo real; e a integração com bases de dados fiscais, como o Manifesto Eletrônico de Documentos Fiscais (MDFe) e o Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC).

Apesar do potencial das novas tecnologias, a expansão dos pontos de fiscalização no Brasil enfrenta limitações. Entre os principais entraves para sua ampliação estão o elevado custo de instalação de postos fixos e equipamentos, a escassez de pessoal capacitado, a carência de manutenção, o funcionamento parcial ou intermitente das unidades em operação e a existência de rotas de fuga (Costa *et al*., 2021; Ghisolfi, 2018).

3.4 Percepções e práticas dos transportadores

Sob a perspectiva da logística operacional, carregar maiores volumes em um único veículo pode representar uma estratégia de otimização, promovendo economia de escala e ampliando a margem de lucro (Péra *et al.*, 2021). Assim, é comum que operadores logísticos utilizem as margens de tolerância legal como parâmetro

para o carregamento, operando no limite superior permitido pela regulamentação (Vargas, 2021; Vallejo *et al.,* 2022).

Pesquisas mostram que a prática corrente em ambientes logísticos como portos e centros de distribuição é o dimensionamento da carga pelo peso total transportado, sem considerar, necessariamente, a distribuição entre os eixos do veículo. Além disso, os transportadores argumentam que a verificação por eixo exige a utilização de sistemas de pesagem mais precisos e sofisticados, muitas vezes indisponíveis nos pontos de embarque. Ao longo do percurso, fatores como trepidações, variações climáticas, acelerações, frenagens e inclinações do terreno também podem alterar a distribuição da carga entre os eixos, levando à autuação de veículos corretamente carregados na origem (Péra *et al*., 2021).

Diante desse cenário, Péra et al. (2021) ressaltam a dificuldade do controle preciso do peso por eixo pelos embarcadores, em função da heterogeneidade da frota e das variações que ocorrem ao longo do trajeto, bem como a ausência de consenso técnico na definição das tolerâncias legais, o que reforça os desafios operacionais da logística rodoviária nacional.

Apesar das demandas por margens mais amplas, a regulamentação vigente busca equilibrar os interesses econômicos com a preservação da infraestrutura viária e a segurança do tráfego. Do ponto de vista técnico, limites superiores comprometem a durabilidade dos pavimentos e aumentam o risco de acidentes, e, sob a ótica concorrencial, estimulam práticas desleais que beneficiam operadores que excedem a carga permitida.

4. CONCLUSÃO

O excesso de peso em veículos de carga é um dos principais fatores de degradação da infraestrutura rodoviária e de elevação dos riscos de acidentes no Brasil. Embora haja um arcabouço legal abrangente, sua efetividade é limitada por entraves operacionais, como a baixa cobertura e o funcionamento irregular de postos de pesagem. Os estudos analisados estimam reduções de até 50% na vida útil dos pavimentos devido ao sobrepeso, com custos extras da ordem de bilhões de reais ao ano. Tais situações, ainda que verificadas em diferentes contextos metodológicos, demonstram a dimensão do problema.

Novas tecnologias de fiscalização, como sistemas WIM e câmeras OCR, oferecem potencial para tornar o monitoramento mais eficiente e contínuo. No entanto, sua adoção ainda é incipiente e concentrada em pontos específicos, carecendo de maior investimento e integração nacional. Por outro lado, a perspectiva dos transportadores evidencia a demanda por regulamentações mais compatíveis com as condições operacionais do setor, pautada em estratégias de economia de escala, ainda que em potencial conflito com a preservação da infraestrutura viária e equidade concorrencial.

Portanto, o enfrentamento do excesso de peso exige uma abordagem sistêmica, que articule engenharia de transportes, economia logística e políticas públicas de segurança viária. Somente a integração entre fiscalização efetiva, modernização tecnológica, participação dos agentes logísticos e fortalecimento institucional poderá assegurar a preservação da infraestrutura, a redução dos acidentes e a competitividade sustentável do transporte rodoviário brasileiro.

Nesse sentido, estudos futuros podem comparar detalhadamente as tecnologias de fiscalização rodoviária de peso e seu custo-benefício; aprofundar análises quantitativas que correlacionem sobrepeso, degradação do pavimento e custos de manutenção; avaliar os instrumentos normativos vigentes e suas lacunas frente à realidade operacional do setor logístico; e investigar modelos internacionais de regulação e fiscalização, cujas práticas podem inspirar ações que sejam adequadas ao contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, J. V e M. B. Marcos (2020) Avaliação dos impactos do excesso de peso por eixo em veículos no transporte rodoviário de cargas. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, V, 2020, Campina Grande. *Anais*... Campina Grande: Realize Editora, 2020.

Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). (2022) *Resolução ANTT nº 5.982, de 23 de junho de 2022*. Regulamento para o Transporte Rodoviário de Cargas. Brasília, DF: ANTT.

Baethge, C.; S. Goldbeck-Wood e. S. Mertens. (2019) SANRA - A scale for the quality assessment of narrative review articles. *Research Integrity And Peer Review. Springer Science and Business Media LLC*, v. 4, n. 1, p. 1-7,

mar. 2019.
Bardin, L. (2011) *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2011.
Bock, A. L; L. e A. T. Brito (2018)Fiscalização de cargas rodoviárias: estudo comparativo entre posto de pesagem veicular móvel e um sistema WIM implantado na Rodovia BR-290/RS – Freeway. In: ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 32., 2018, Gramado. Anais [...]. Gramado: ANPET, 2018.
Brasil. (2021) *Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985* (com redação da Lei nº 14.229, de 2021). Dispõe sobre o peso máximo de veículos de transporte de cargas e dá outras providências. Brasília, DF.
Brasil. (2024) *Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997* (com redação da Lei nº 14.861, de 2024). Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF.
Confederação Nacional do Transporte (CNT). (2014) *Sobrepeso em caminhões compromete segurança nas estradas, afirmam especialistas*. Agência CNT, 08 abr. 2014. Disponível em: https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/sobrepeso-caminhoes-ntc-neuto-goncalves-joao-albano-dnit-08042014. Acesso em: 28 mai. 2025.
Confederação Nacional do Transporte (CNT). (2023) *Relatório gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2023*. Brasília: CNT, 2023.
Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). (2021) *Resolução CONTRAN nº 882, de 13 de dezembro de 2021*. Estabelece os limites de pesos e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Brasília, DF: CONTRAN.
Costa, S. P.; E. G. S. Aguiar. L. C. S. Gama e L. F. S. Fonseca . (2021) Impactos gerados pela fiscalização do excesso de peso em veículos comerciais na rodovia BR-153 em Gurupi – TO. *Research, Society And Development*, v. 10, n. 6, p. 1-9, 24 mai. 2021.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2006) *Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem*. Coordenação-Geral de Operações Rodoviárias. Brasília: DNIT, 2006.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2022) *Resolução DNIT nº 11, de 21 de setembro de 2022*. Estabelece normas sobre o uso de rodovias federais por veículos ou combinações de veículos e equipamentos, destinados ao transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso ou dimensões. Brasília, DF: DNIT.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2025) Painel de acompanhamento dos infratores do Plano Nacional de Pesagem – PNP. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/painel-de-acompanhamento-dos-infratores-do-plano-nacional-de-pesagem-pnp. Acesso em: 6 set. 2025.
Fontenele, H. B. (2011) *Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos*. 2011. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Concentração em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
Ghisolfi, V. (2018) *Dinâmica de Sistemas para avaliação de impactos do excesso de peso no transporte rodoviário de cargas*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2018.
Lima, H. J. (2017) A ausência de fiscalização do excesso de peso e o desgaste precoce do pavimento flexível nas rodovias federais. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Operações Rodoviárias) – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasília, 2017.
Martins, R. e A. Serravale. (2007) Gerenciamento do controle de pesagem dos veículos de carga nas rodovias estaduais do estado da Bahia: o futuro de nossas rodovias. In: 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Manaus. ABPv. *Anais...* 2007.
Péra, T. G.; F. V. Rocha. F. P. Bastiani. R. M. Santos. E. V. Costa. A. M. João. e J. V. Caixeta-Filho. (2021) Análise do excesso de peso entre eixos no transporte rodoviário de cargas. *Série Logística do Agronegócio – Oportunidades e Desafios*, V.5, 2021.
Rother, E. T. (2007) Revisão sistemática X revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, v. 20, n. 2, p. v-vi, 2007.
TOTVS. (2023) *Balança rodoviária: para que serve, tipos e como escolher*. 2023. Disponível em: https://www.totvs.com/blog/negocios/balanca-rodoviaria/. Acesso em: 27 mai. 2025.
Vallejo, F. M. L.; C. R. Santos. L. L. B. Bernucci. C. Y. Suzuki. K. V. Savasini. e L. L. Ho. (2022) Análise do excesso de carga de veículos comerciais e seu efeito no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos. *Transportes*, Brasília, DF, v. 30, n. 3, out. 2022.
Vargas, M. R. (2021) Modelagem dos impactos econômicos do excesso de peso de veículos de carga nas rodovias brasileiras. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

Paulo Bressaglia (p179483@dac.unicamp.br)
Diogenes Cortijo Costa (dcortijo@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária, Campinas, SP, Brasil

MODELAGEM DAS Q MELHORES SOLUÇÕES DE LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE TRANSBORDO PARA O TRANSPORTE DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Lucca Matheus Achterberg dos Santos, Cláudio Barbieri da Cunha
Universidade de São Paulo

RESUMO
Este trabalho explora o problema de planejamento de transporte de rejeitos de mineração e é um desdobramento de um trabalho anterior, previamente publicado pelos autores. Rompimentos de depósitos de rejeito levaram a estudos sobre usos alternativos de rejeitos, principalmente no setor da construção civil e pavimentação. Para que a operação de transporte destes rejeitos seja viável, os custos devem ser minimizados. Um modelo matemático *multi-commodity* e multimodal é proposto, adicionando-se restrições complementares para a obtenção das *Q* melhores soluções em relação a custo. Os resultados mostraram compatibilidade com resultados da literatura, com a 20ª melhor solução sendo ligeiramente mais cara do que a solução ótima. Do ponto de vista ambiental, as emissões de CO_2 das soluções quase ótimas foram superiores àquelas da solução ótima em 19 soluções. Pontos de transbordo entre os modos ferroviário e rodoviário se repetem em várias das soluções encontradas, sinalizando pontos importantes para tomadores de decisão.

1. INTRODUÇÃO

Rejeitos de mineração são os resíduos gerados no beneficiamento de minérios, após a separação dos minerais de interesse econômico, geralmente sob a forma de lama ou sedimentos sem valor comercial. Produzidos em grandes volumes — frequentemente superiores a 90% do material extraído — esses rejeitos são tradicionalmente depositados em barragens de contenção. No entanto, desastres ambientais recentes, como os rompimentos das barragens em Mariana e Brumadinho em Minas Gerais, evidenciaram os riscos significativos associados a essa forma de descarte. Como resultado, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para identificar alternativas sustentáveis, como a utilização dos rejeitos como insumos na produção de materiais de construção e utilização em pavimentos. No entanto, o transporte dos materiais gerados a partir dos rejeitos se torna um dos principais desafios operacionais. Por se tratar de um subproduto com valor comercial inferior ao mineral do qual se origina, seu transporte compete por espaço em sistemas já operando à plena capacidade e voltados, muitas vezes, ao transporte de produtos de maior valor agregado. Custos de transporte normalmente representam uma parcela significativa do custo total de uma operação (Hugos, 2024) e, no presente caso, se tornam ainda mais importantes, já que podem inviabilizar economicamente o aproveitamento dos rejeitos.

Cada modo de transporte tem características diferentes em relação a custo, capacidade de transporte, abrangência da rede, e pode ser utilizado de acordo com a disponibilidade. Além disso, nas operações de transbordo existem terminais que permitem a troca de modo de transporte para aproveitar a economia associada ao modo ferroviário e a capilaridade do modo rodoviário. A localização geográfica destes pontos é uma decisão estratégica de grande impacto na cadeia produtiva (Ballou, 2006), e a A decisão de localização de pontos de transbordo possui impacto a longo prazo (Daskin, 1995), sendo o grau de incerteza elevado, de maneira que pequenas modificações em restrições, parâmetros e localizações candidatas podem alterar os resultados (Montibeller e Yoshizaki, 2011). Além dos fatores econômicos, a localização destas instalações tem influência nas emissões de carbono relacionadas ao transporte, uma vez que possuem relação direta com as distâncias percorridas em cada modo de transporte. Dado o compromisso brasileiro de neutralidade climática em relação a emissões de gases do efeito estufa até 2050 (NDC, 2024), o aspecto ambiental deve ser levado em consideração na questão de transportes, uma vez que o setor respondeu por 44% das emissões dos setores de energia e processos industriais no país em 2022 (SEEG, 2023).

A existência dos objetivos econômico e ambiental sugere uma abordagem integrada para a resolução do problema. Contudo, podem existir também fatores não quantitativos que influenciam uma tomada de decisão, mesmo que o aspecto econômico seja preponderante. Desta forma, soluções quase-ótimas do ponto de vista econômico ou ambiental também podem ser consideradas pelos tomadores de decisão para a decisão final. Propõe-se uma abordagem baseada em Guazzelli e Cunha (2018), que propuseram um método para determinar as Q melhores soluções ótimas para o problema de localização de instalações. Aplicado a inúmeras instâncias da literatura, os autores concluíram que a diferença de custo total entre a solução ótima e a vigésima solução (isto é, $Q = 20$) era, na maioria dos casos, inferior a 1%.

Assim, o presente trabalho é uma continuidade da pesquisa de Santos e Cunha (2024), que propuseram um modelo matemático biobjetivo a fim de encontrar a fronteira ótima de soluções de rede em relação aos objetivos

econômico e ambiental para este problema. Os resultados anteriormente obtidos apontaram soluções de custos relativamente maiores ao longo da fronteira de Pareto, e utilizando diferentes pontos de transbordo. Como os pontos utilizados variam de acordo com a solução da fronteira de Pareto, isso levou ao questionamento sobre quais deveriam ser os pontos de transbordo a serem utilizados. Propõe-se neste trabalho um novo modelo matemático de otimização para o transporte de rejeitos de mineração de barragens de cobre e níquel no sudeste do Pará até centros que possam utilizá-los com o objetivo de encontrar as Q melhores soluções (i.e., 1ª, 2ª, q-ésima) em termos de custos, e analisar, para cada uma delas, tanto a variação dos custos ambientais associados quanto dos pontos de transbordo escolhidos. Para isso, serão considerados os aspectos de intermodalidade e custos econômicos e ambientais.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado envolve o aproveitamento de rejeitos de mineração provenientes de três localidades no sudeste do Pará: Sossego, Salobo (barragens de cobre) e Onça-Puma (ferro-níquel). A proposta é avaliar a viabilidade técnica e econômica de direcionar esses materiais para indústrias que possam reutilizá-los, reduzindo a necessidade de armazenamento em barragens. A geração de rejeitos varia significativamente entre os locais. Conforme estudos relacionados ao uso desses resíduos, no contexto mais amplo desta pesquisa, estima-se que, para cada tonelada de concentrado de cobre produzido, são geradas cerca de 100 toneladas de rejeito. Juntas, as barragens recebem anualmente quase 50 milhões de toneladas de rejeitos.

Por ser uma região pouco ocupada, com características ambientais complexas e população reduzida, a rede de transportes no sudeste do Pará apresenta baixa densidade espacial e geográfica, ou seja, há uma quantidade limitada de vias rodoviárias e ferroviárias em comparação com outras regiões do país. Mais especificamente, as barragens estão localizadas próximas à Terra Indígena Xikrin, na Amazônia, o que impõe desafios significativos à logística de transporte.

Embora as principais rodovias estaduais da região estejam asfaltadas, não há dados disponíveis sobre as condições das estradas vicinais. O transporte ferroviário, por sua vez, é pouco estruturado. O principal eixo ferroviário é a Estrada de Ferro Carajás (EFC), que conecta a área produtora de minério em Carajás, no estado do Pará, ao terminal portuário de Ponta da Madeira, localizado em São Luís, no Maranhão.

Desta forma, a viabilidade econômica dos rejeitos de mineração passa pela otimização do seu transporte otimizado até centros de demanda. O problema consiste em encontrar configurações de rede que minimizem os custos econômicos envolvidos na operação, dadas as condições de capacidade disponíveis na região. O objetivo é estudar configurações de abertura de pontos de transbordo que sejam quase ótimas do ponto de vista econômico, mas que forneçam alternativas para o tomador de decisão, verificando a máxima quantidade de rejeito que poderia ser transportada nas atuais condições de capacidade.

3. METODOLOGIA

Para encontrar os custos associados à operação, tratou-se o transporte de rejeitos como um problema de fluxo em rede. O modelo matemático proposto considera uma rede $G = (N, A)$, onde N é o conjunto dos nós que representam pontos de interesse e A os trechos de vias entre nós. O problema é modelado como *multi-commodity*, com dois produtos $k \in K$ que competem pela capacidade da rede, a saber, rejeitos de cobre e níquel. O fluxo total em um arco é o resultado da soma dos fluxos parciais de cada produto que passam pelo mesmo arco. É adotada a premissa de capacidade u_{ij} nos arcos $(i,j) \in A$, e o fluxo de rejeitos x_{ij} como variável linear (Ahuja et al., 1993). O modelo de rede é baseado no problema de transbordo capacitado, mas há uma diferença importante: a capacidade máxima da rede de transporte é insuficiente para satisfazer a todos os potenciais pontos de demanda de rejeitos (a demanda não é igual à oferta). Assim, define-se, para cada ponto de consumo potencial, uma variável de decisão binária y_i^k, a fim de selecionar os pontos de demanda a serem atendidos. Além disso, existem restrições relativas aos nós de transbordo, que devem movimentar um volume mínimo semanal para justificar sua utilização. A formulação matemática é apresentada a seguir:

$$\min \sum_{(i,j)\in A} \sum_{k\in K} c_{ij}^k \, x_{ij}^k + \sum_{k\in K} Cplus^k \, r^k \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^m - \sum_{i \in N} x_{ji}^m = 0, \quad \forall j \in N_{pas}, j \notin N_{dem}, j \notin N_{sup}, \forall k \in K \ (2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij}^k - \sum_{i \in N} x_{ji}^k + d_i^k y_i^k = 0, \quad \forall j \in N_{dem}, \forall k \in K \ (3)$$

$$\sum_{i \in N_{sup}} x_{ij}^k - \sum_{i \in N_{sup}} x_{ji}^k + s_i^k = 0, \quad \forall j \in N_{sup}, \forall k \in K \ (4)$$

$$\sum_{i \in N_{dem}} d_i^k y_i^k + r^k = s^k, \forall k \in K \ (5)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij}, \forall (i,j) \in A_1 \ (6)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} w_{ij}, \forall (i,j) \in A_2, \sum_{k \in K} x_{ij}^k \geq M_{ij} w_{ij}, \forall (i,j) \in A_2 \ (7)$$

$$x_{ij}^k \in \mathbb{R}^+, y_i^k \in \{0,1\}, w_{ij} \in \{0,1\} \ (8)$$

Onde c_{ij}^k e x_{ij}^k são o custo (em R$/t) e o fluxo (em t) da commodity k no arco $(i,j) \in A_1$; $Cplus^k$ é o custo virtual (em R$/t), suficientemente alto, relativo ao transporte do excesso de demanda r^k (em t) não atendido pela rede de transporte; N_{pas} é o conjunto de nós de que não possuem demanda ou oferta de rejeitos a eles associada; d_i^k e y_i^k são a demanda (em t) e a variável binária referentes à commodity k no nó $i \in N_{dem}$ (pontos de demanda); N_{sup}, por sua vez, é o conjunto de nós i da rede dos pontos de oferta de rejeitos (barragens), que possuem, para cada commodity k, uma oferta s_i^k (em t); u_{ij} representa, ainda, a capacidade total de transporte do arco $(i,j) \in A$ (em t); a variável binária $w_{ij} \in A_2$, por sua vez, define fechamento ou abertura de pontos de transbordo, que são modelados na rede como arcos, a fim de considerar sua capacidade.

A função objetivo (1) visa à minimização do custo total da operação. As restrições (2), (3) e (4) se referem a restrições de balanço de massa nos conjuntos de nós contidos em N_{pas}, N_{dem} e N_{sup}, respectivamente, onde $N_{pas} \cup N_{dem} \cup N_{sup} = N$. Já as restrições (5) asseguram o balanço de massa de todo o sistema. As restrições (6) limitam o máximo fluxo para cada arco, enquanto as restrições (7) regem a abertura de pontos de transbordo. Por fim, os domínios das variáveis do modelo são formalizados nas restrições (8).

Para encontrar as Q melhores soluções em termos de custo, é necessário adicionar restrições ao modelo. Utiliza-se a notação Q para o número de soluções desejadas; O_q para o conjunto de pontos de transbordo utilizados na q-ésima solução; e N_q para o conjunto de pontos de transbordo não utilizados na q-ésima solução. Para cada solução q, os conjuntos O_q e N_q são complementares e abrangem todos os pontos de transbordo. A primeira solução ótima é obtida pela formulação original. A partir da segunda solução, adiciona-se uma nova restrição para garantir que novas soluções sejam diferentes das anteriores, conforme a expressão (9).

$$\sum_{j \in O_n} W_j - \sum_{j \in N_n} W_j \leq |O_n| - 1, n = 1, \dots, q-1 \ (9)$$

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados. Por fins de simplificação e falta de dados, não há diferença no custo de transporte dos rejeitos transportados (cobre e níquel).

Tabela 1: Parâmetros utilizados no modelo de otimização de transporte de rejeitos. Fonte: INFRA S.A. (2024).

	Capacidade (em t)	Custo (R$/TKU)	Emissão (kg CO_2/TKU)	Transbordo (R$/t)
Arcos rodoviários	23.400	0,25	0,0500	20,00
Arcos ferroviários	6.800	0,09	0,02736	

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo foi resolvido de maneira exata utilizando o software de otimização Gurobi (Gurobi, 2025). Os pontos de transbordo da rede foram considerados através de estações pré-existentes ao longo das ferrovias conforme o Plano Nacional de Logística de Transporte (PNLT, 2017), mesmo que ainda sem a infraestrutura necessária para uma operação de transbordo. O método proposto permitiu determinar a solução ótima e as 21 melhores

soluções subsequentes em termos de custo para a rede dada. A quantidade de rejeitos transportada até centros de demanda foi constante em todas as soluções (33.694 toneladas por semana). A Figura 1 mostra a variação percentual do custo global da operação em cada uma das soluções, tomando por base a solução ótima, isto é, de menor custo, juntamente com as variações percentuais das emissões de gases do efeito estufa (GEE).

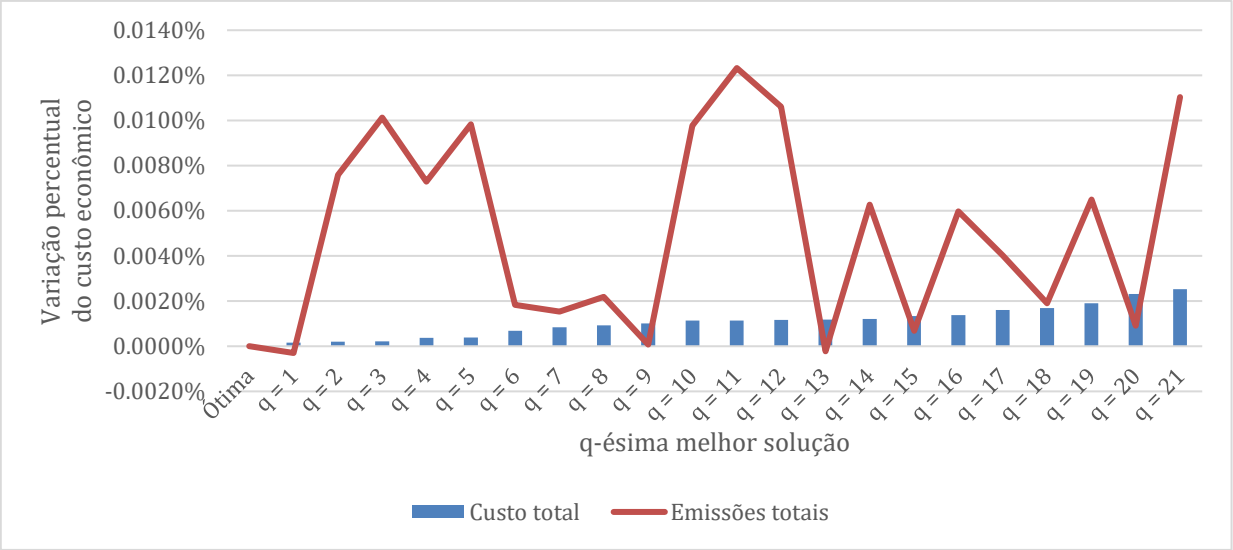


Figura 1: Variação percentual dos custos relativos às Q melhores soluções encontradas.

Nota-se que as $Q = 21$ soluções quase ótimas são muito similares, sendo que a variação entre a 22ª melhor solução e a solução ótima é de apenas 0,003% em termos de custo. O ponto de transbordo funciona como um centro de distribuição de rejeitos para cidades mais próximas. Desta forma, o sistema aproveita o transporte em maior escala proporcionado pelo modo ferroviário, enquanto o modo rodoviário utiliza sua capilaridade para realizar o transporte em trechos mais curtos. Contudo, o fato de as soluções quase ótimas estarem tão próximas da solução ótima se deve ao fato de a rede de transportes ser de baixa densidade na região das barragens. Assim, pequenas mudanças nos pontos de transbordo acabam não surtindo efeito significativo nos custos porque grande parte dos rejeitos já não utiliza o modo ferroviário. Em termos ambientais, ainda, nota-se que as soluções quase ótimas implicam, em sua maioria, maiores impactos ambientais que a solução de mínimo custo. Isso pode estar relacionado a maiores percursos rodoviários, que se traduzem em emissões proporcionalmente maiores do que o aumento de custo, chegando a uma ordem de grandeza de diferença.

A Figura 2 ilustra a configuração de rede correspondente à solução ótima. Quanto mais espessos os arcos, maior é o fluxo de rejeitos. Apesar da utilização total da ferrovia em seu trecho inicial (6.800 toneladas), esta possui uma participação pequena no transporte total de rejeitos, uma vez que é limitada à carga de retorno de carvão na EFC, e a prioridade no transporte ferroviário é para o minério de ferro. É possível notar, ainda, a utilização de alguns pontos de transbordo ao longo do trajeto, geralmente próximos a grandes centros de demanda, como é o caso da região litorânea do Nordeste brasileiro, ou próximo às barragens. A escala de cor nos pontos de transbordo representa a quantidade de soluções em que um determinado ponto é utilizado. É interessante notar que alguns pontos de transbordo se repetem em todas as soluções. Estações próximas às barragens são sempre utilizadas devido à sua proximidade com os centros de oferta de rejeitos, portanto devem ser abertas para o transbordo "rodo-ferro". O mesmo ocorre para o cruzamento entre a Ferrovia Norte-Sul e a EFC. Já estações de "saída", isto é, estações com o objetivo de fazer o transbordo 'ferro-rodo", têm maior variação ao longo das soluções, indicando que a abertura de algumas estações é mais recomendada do que outras.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Rejeitos de mineração representam uma preocupação no Brasil principalmente devido aos altos volumes gerados e aos riscos de armazenagem. Diante dos recentes desastres, torna-se essencial investigar usos alternativos e explorar seu aproveitamento como coprodutos. A viabilidade econômica da operação, com minimização de custos é ponto chave, assim como a consideração das emissões de GEE.

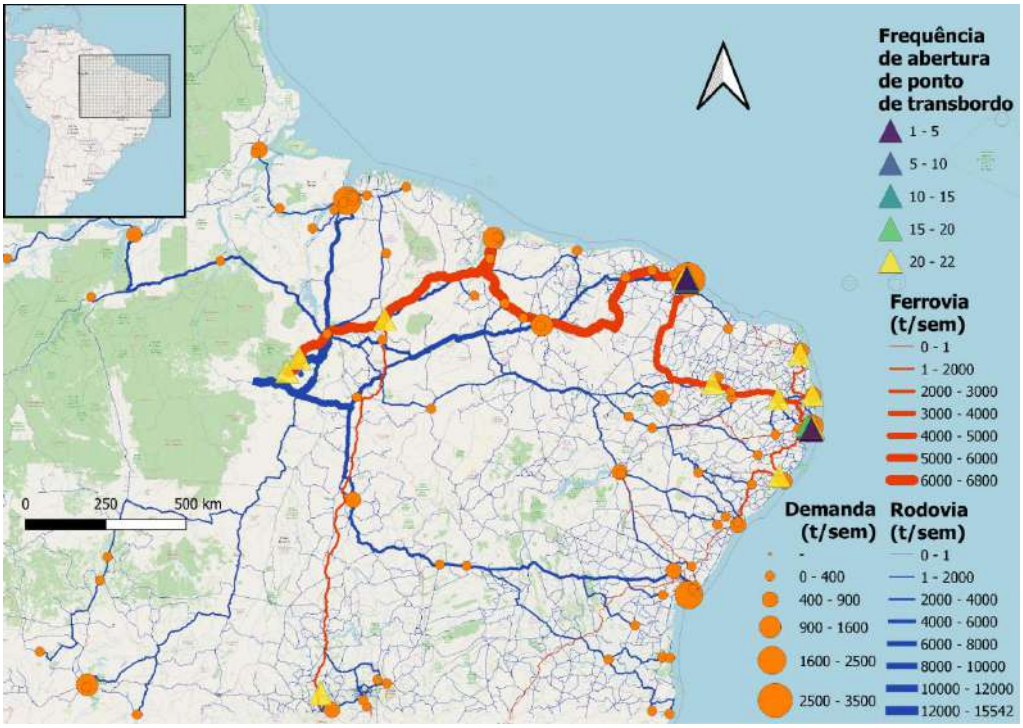


Figura 2: Frequência de abertura de pontos de transbordo.

A abordagem proposta neste trabalho explorou soluções próximas ao ótimo do ponto de vista econômico para o transporte dos rejeitos de mineração. Os resultados mostraram que não haveria redução de emissões em quase nenhuma das Q melhores soluções. Assim, quando avaliado exclusivamente sob esse critério, o modelo não forneceu alternativas úteis do ponto de vista ambiental. Por outro lado, os resultados mostraram similaridade com dados obtidos na literatura, guardada a especificidade do problema aqui trabalhado, com baixa densidade de vias de transporte. Além disso, foi possível notar uma robustez nos pontos de transbordo selecionados pelo modelo, uma vez que alguns deles foram escolhidos diversas vezes nas Q soluções. Isso mostra que, do ponto de vista estratégico, a escolha destes pontos é vantajosa em mais de um cenário. Isso possibilita ao tomador de decisão, tendo em mãos uma visão mais ampla das alternativas, avaliar de maneira mais assertiva estes cenários específicos quanto a outros atributos que não estejam no modelo quantitativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahuja, R. K.; J. Orlin e T. Magnanti, (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall.

Ballou, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. São Paulo: Editora Bookman, 2006.

Daskin, M.S. (1995) *Network and Discrete Location, Models, Algorithms, and Applications*. John Willey & Sons Ltd., Hoboken. DOI: 10.1002/9781118032343

Guazzelli, C.S.; C.B. Cunha (2018). Exploring K-best solutions to enrich network design decision-making. *Omega*, Volume 78, Pages 139-164, ISSN 0305-0483. DOI: 10.1016/j.omega.2017.06.009.

Hugos, M. H. (2024). *Essentials of supply chain management*. John Wiley & Sons. 5. ed.

INFRA S.A. (2024) *Boletim de logística*. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/ (acesso em 07/09/2024).

Montibeller, G.; H. Yoshizaki (2011) A Framework for Locating Logistic Facilities with Multi-Criteria Decision Analysis. In: Takahashi, R.H.C., Deb, K., Wanner, E.F., Greco, S. (eds) Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO 2011. *Lecture Notes in Computer Science*, v. 6576. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-19893-9_35

NDC (2025). *BRAZIL'S NDC National determination to contribute and transform.* República Federativa do Brasil.

Santos, L. M. A. d., C. B. Cunha (2024), *Modelagem De Sistema Logístico Multimodal E Multiobjetivo Para O Transporte De Graneis De Origem Mineral*. Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Campinas: Galoá. 2024.

SEEG (2023). *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021*. Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA, Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima.

Lucca Matheus Achterberg dos Santos (lucca.santos@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes Av. Prof. Almeida Prado, Travessa do Biênio, nº 83, Edificio Engenharia Civil. São Paulo, SP, Brasil.

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA SELEÇÃO DE MODAIS, PORTOS E NAVIOS PARA A EXPORTAÇÃO DE SOJA BRASILEIRA

Gustavo Adolfo Alves da Costa, André Bergsten Mendes, Elcio Ribeiro
RouteLab, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Este trabalho propõe um modelo de programação inteira mista para selecionar simultaneamente rotas, portos e tipos de navios na exportação de soja brasileira. O objetivo é maximizar a margem de contribuição, integrando custos de transporte, operação portuária e afretamento. O modelo foi desenvolvido em Python com o solver Gurobi e aplicado a um estudo de caso envolvendo o escoamento de 1 milhão t de soja de Sorriso (MT) para Xangai (CH), considerando seis portos de embarque, três modais de transporte e cinco categorias de navios. No cenário base, a solução identifica o uso combinado dos portos Santana (AP), Santarém (PA), Vila do Conde (PA) e Santos (SP), gerando margem de US$ 34,6 milhões. No cenário 2, que considera a Hidrovia Teles-Pires-Tapajós operacional e investimentos no aumento da capacidade operacional nos portos de Santarém e Vila do Conde, a solução apresenta um aumento 79,8% na margem, alcançando US$ 62,2 milhões. Os resultados demonstram que a abordagem de modelagem integrada de modais portos e navios apoia decisões de investimentos logísticos e reforça a viabilidade do Arco Norte.

1. INTRODUÇÃO

A soja é hoje o principal produto agrícola brasileiro, respondendo por cerca de 50 % das exportações mundiais do grão desde que o Brasil ultrapassou os Estados Unidos em 2013 (Filassi et al., 2022). Essa liderança, porém, expõe fragilidades na logística de escoamento: o transporte rodoviário ainda movimenta aproximadamente 65 % do volume exportado, percorrendo longas distâncias do Centro-Oeste aos portos do Sudeste e Sul, em rodovias precárias e onerosas (Lopes et al., 2017; Fliehr et al., 2019).

A infraestrutura portuária brasileira também apresenta gargalos. Santos e Paranaguá operam próximo ao limite, gerando filas e atrasos (Filassi et al., 2022). O Arco Norte — Santarém, Itaqui, Barcarena, entre outros - encurta rotas oceânicas e pode reduzir custos logísticos dos produtores mato-grossenses (Thadani & Rocha, 2024), mas exige investimentos em capacidade portuária e conexão multimodal.

Pesquisas recentes apontam caminhos para mitigar esses desafios. Modelos de programação linear mostram que a combinação de rodovias, ferrovias e hidrovias pode diminuir sensivelmente os custos de transporte (Oliveira et al., 2021). Corredores logísticos “verdes” prometem diminuir emissões de CO_2 (Péra et al., 2019) e simulações de eventos discretos demonstram que diversificar portos e modais reduz riscos operacionais (Lopes, Lima & Leal, 2020). No entanto, a maioria desses estudos aborda apenas trechos isolados da cadeia, sem integrar, em um mesmo arcabouço, a escolha de portos, modais terrestres e tipos de navio sob múltiplas restrições econômicas e operacionais.

1.1. Definição do problema

Com base nas limitações logísticas identificadas, o problema central deste estudo consiste em determinar a melhor configuração para a utilização dos portos, rotas de transporte e tipos de navios, de modo a maximizar a margem de contribuição das exportações de soja a partir de uma origem até o destino internacional. O problema envolve múltiplas restrições, como:

- Capacidade portuária limitada, com portos operando próximos ao limite físico de movimentação anual (Filassi et al., 2022);
- Dependência do modal rodoviário, que eleva o custo por tonelada transportada e aumenta as perdas durante o transporte (Fliehr et al., 2019);
- Incompatibilidade porto-navio, resultante de restrições de calado e infraestrutura portuária inadequada para determinados tipos de embarcações (Péra et al., 2019);
- Custos variáveis de transporte, embarque, afretamento, combustível e tarifas portuárias, impactando diretamente na margem operacional.

Considerando essas restrições, a solução do problema requer um modelo capaz de balancear as múltiplas decisões logísticas de forma integrada.

2. MÉTODO

Este trabalho propõe um modelo de otimização formulado como um problema de programação linear inteira mista (MILP), implementado em Python e resolvido o solver Gurobi e. O modelo visa maximizar a margem

de contribuição da exportação de soja, definindo: Quais portos utilizar; Quais rotas de transporte selecionar para cada porto; Quais tipos de navios alocar a cada porto, considerando custos e calado operacional.

A função objetivo maximiza a margem total, definida como a diferença entre a receita de exportação e os custos associados (compra da soja, transporte terrestre, embarque portuário, afretamento, combustível e taxas portuárias). As principais restrições do modelo incluem: (i)Atendimento da demanda total a ser exportada; (ii) Capacidade máxima de atendimento em cada porto; (iii) Escolha da rota de transporte mais econômica por porto; (iv) Ativação condicional de portos com base no uso da rota mais econômica e (v) Compatibilidade entre portos e tipos de navios.

Essa abordagem permite uma análise estratégica e integrada do sistema logístico, proporcionando soluções que podem orientar investimentos em infraestrutura e decisões de planejamento operacional.

2.1. Modelo Matemático

O modelo é formulado como um problema de programação linear inteira mista (MILP) que busca determinar a configuração ótima de portos, rotas e tipos de navios para maximizar a margem de contribuição das exportações de soja.

2.1.1. Conjuntos e Índices

Esta seção de terceiro nível demonstra como deve ser um título de seção de terceiro nível. Este é o último nível para títulos de seção. Não é possível usar um título de seção de quarto nível.

P: Conjunto de portos de exportação disponíveis.
N: Conjunto de tipos de navios disponíveis.
M: Conjunto de rotas de transporte intercontinental.
$p \in P$: Índice que representa cada porto.
$n \in N$: Índice que representa cada tipo de navio.
$m \in M$: Índice que representa a rota de transporte.

2.1.2. Parâmetros da carga

SD: Demanda máxima de soja a ser exportada (ton).
SC: Preço de compra da soja na origem (BRL/ton).
SV: Preço de venda da soja no destino (USD/ton).

2.1.3. Parâmetros dos Portos

P_p^{cap}: Capacidade contratada de atendimento do porto p (ton).
P_p^{prod}: Produtividade no carregamento de soja do porto p (ton/hora).
P_p^{espera}: Tempo de espera para atracação no porto p (dias).
P_p^{dist}: Distância do porto p para o porto de destino (milhas náuticas).
$CT_{p,m}$: Custo de transporte da origem da soja para o porto p utilizando a rota m (BRL/ton).
CE_p: Custo de recepção e embarque da soja no porto p (BRL/ton).
$CP_{p,n}$: Custo de escalar o porto p com o navio do tipo n (BRL).
$NP_{p,n}$: Parâmetro binário indicando se o porto p é compatível com o navio n (1 = compatível).

2.1.4. Parâmetros dos Navios

N_n^{cap}: Capacidade máxima de carga do navio do tipo n (toneladas).
CA_n: Custo de afretamento do navio do tipo n (USD/dia).
N^{vel}: Velocidade média dos navios em viagem (nós).
N_n^{MDOP}: Consumo de MDO do navio do tipo n em porto (ton/dia).
N_n^{MDOV}: Consumo de MDO do navio do tipo n em viagem (ton/dia).
N_n^{VLSFO}: Consumo de VLSFO do navio do tipo n em viagem (ton/dia).

2.1.4. Parâmetros Gerais

CC^{MDO}: Custo do combustível MDO (USD/ton).
CC^{VLSFO}: Custo do combustível VLSFO (USD/ton).
ROE: Taxa de câmbio (BRL/USD).

$BIGM$: Constante grande para restrições de compatibilidade.

2.1.5. Variáveis de Decisão

$x_{p,n}$: Quantidade de soja transportada do porto p com o navio do tipo n (ton) ($x_{p,n} \geq 0$).
$v_{p,n}$: Número de viagens a partir do porto p com o navio do tipo n ($v_{p,n} \geq 0, inteira$).
$y_{p,m}$: Variável binária: 1 se a rota de transporte intercontinental m é selecionada para o porto p, 0 caso contrário.

2.1.6. Variáveis Auxiliares

- Tempo total de navegação entre o porto de embarque *p* e o porto de destino em dias, considerando velocidade média dos navios.

$$T_p^{nav} = \frac{P_p^{dist}}{24 \cdot N^{vel}} \quad (1)$$

- Tempo total de estadia do navio *n* no porto de embarque *p*, em dias, considerando o tempo de espera para atracação, a capacidade do navio do tipo *n* e a produtividade de carregamento do porto *p*.

$$T_p^{est} = P_p^{espera} + \frac{N_n^{cap}}{24 \cdot P_p^{prod}} \quad (2)$$

- Custo unitário do transporte entre a origem do produto e o porto *p* (BRL/ton).

$$CT_p = \sum_{m \in M} CT_{p,m} \cdot y_{p,m} \quad (3)$$

2.1.7. Função Objetivo

Maximizar a margem total da exportação de soja (receita – custos).

$$max\ Z = \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} \left[SV - \frac{1}{ROE}\left(SC + CT_p + CE_p\right) - \frac{CC^{MDO} \cdot \left(N_n^{MDOP} \cdot T_p^{est} + N_n^{MDOV} \cdot T_p^{nav}\right)}{N_n^{cap}} - \frac{CC^{VLSFO} \cdot N_n^{VLSFO} \cdot T_p^{nav}}{N_n^{cap}} - \frac{CA_n \cdot \left(T_p^{est} + T_p^{nav}\right)}{N_n^{cap}} \right] \cdot x_{p,n} \quad (4)$$

2.1.8. Restrições

- O total exportado não pode exceder a demanda.

$$\sum_{p \in P} \sum_{n \in N} x_{p,n} \leq SD \quad (5)$$

- O total exportado pelo porto *p* não pode exceder a capacidade contratada no porto.

$$\sum_{p \in P} x_{p,n} \leq P_p^{cap}, \quad \forall p \in P \quad (6)$$

- Impedir a utilização de navios incompatíveis com os portos.

$$x_{p,n} \leq BIGM \cdot NP_{p,n}, \quad \forall p \in P, n \in N \quad (7)$$

- Calcula o número de viagens necessárias com base na capacidade do navio, assumindo que o navio transporta a máxima capacidade possível.

$$v_{p,n} = \frac{x_{p,n}}{N_n^{cap}}, \quad \forall p \in P, n \in N \quad (8)$$

- Seleção de apenas uma rota de transporte por porto.

$$\sum_{m \in M} y_{p,n} = 1, \quad \forall p \in P \quad (9)$$

- A soja só pode ser exportada de um porto se uma rota de transporte for selecionada.

$$\sum_{n \in N} x_{p,n} \leq SD \cdot \sum_{m \in M} y_{p,n}, \quad \forall p \in P \quad (10)$$

3. ESTUDOS DE CASO

O modelo de otimização MILP, implementado em Python com o Gurobi como solver, é aplicado a um problema de exportação de 1 Mt de soja partindo de Sorriso-MT com destino ao porto de Xangai (CN). Foram definidos cinco portos brasileiros de embarque candidatos – Santana (AP), Itacoatiara (AM), Vila do Conde (PA), Itaqui (MA) e Santos (SP) - duas alternativas de transportes multimodal (rodofluvial e rodoferroviário) e cinco classes de navios oceânicos (Handysize, Supramax, Ultramax, Panamax e Capesize). Avaliaram-se dois cenários: Cenário 1 (Base) com as configurações atuais de infraestrutura e rotas existentes e Cenário 2 considerando a Hidrovia Teles-Pires-Tapajós operacional, que reduz os custos para Santarém e Vila do Conde, e um aumento de capacidade e produtividade nestes dois portos. A comparação entre cenários permite quantificar os benefícios econômicos e operacionais do investimento nas rotas do Arco Norte.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

No cenário 1 (base), o modelo selecionou quatro portos de embarque — Itacoatiara, Santarém, Vila do Conde e Santos — e programou 15 viagens distribuídas entre navios Handysize, Supramax, Ultramax e Capesize. Essa configuração gera uma margem de contribuição de USD 34,6 milhões (Tabela 1). O escoamento pelo Arco Norte ocorre via modal Rodo-Fluvial, enquanto a carga destinada a Santos utiliza o modal Rodo-Ferroviário, refletindo a melhor adequação de cada modal às condições de infraestrutura e distância envolvidas.

Tabela 1: Resultado do Cenário 1.

Porto	Navio	Modal	Viagens	Exportação (ton)	Margem (USD)
Santarém	Handysize	Rodo-Fluvial	1	32,000.00	1,551,289.10
Santarém	Supramax	Rodo-Fluvial	1	52,000.00	3,039,610.50
Santarém	Ultramax	Rodo-Fluvial	1	62,000.00	3,656,132.40
Santana	Handysize	Rodo-Fluvial	1	32,000.00	1,283,780.80
Santana	Ultramax	Rodo-Fluvial	1	62,000.00	3,070,750.70
Vila do Conde	Capesize	Rodo-Fluvial	2	344,000.00	12,092,139.40
Santos	Supramax	Rodo-Ferroviário	8	416,000.00	9,893,598.50
Total			**15**	**1,000,000.00**	**34,587,301.40**

No cenário 2, a margem de contribuição sobe para USD 62.2 milhões (Tabela 2), representando um acréscimo absoluto de USD 27.6 milhões (+79.8 %) em relação ao cenário 1. A nova configuração transfere parte substancial do fluxo de Santos para o Arco Norte. Vila do Conde assume o papel de principal porto de embarque. Esse resultado confirma que a combinação de investimento em Hidrovias e capacidade Portuária potencializa economias de escala nos modais de transporte, reforçando a competitividade logística do corredor Norte.

Tabela 2: Resultado do Cenário 2.

Porto	Navio	Modal	Viagens	Exportação (ton)	Margem (USD)
Santarém	Handysize	Rodo-Fluvial	1	32,000.00	1,840,815.20
Santarém	Supramax	Rodo-Fluvial	6	312,000.00	21,067,042.80
Santana	Handysize	Rodo-Fluvial	1	32,000.00	1,283,780.80
Santana	Ultramax	Rodo-Fluvial	1	62,000.00	3,070,750.70
Vila do Conde	Supramax	Rodo-Fluvial	3	156,000.00	9,437,047.90
Vila do Conde	Capesize	Rodo-Fluvial	2	344,000.00	23,973,563.80
Santos	Ultramax	Rodo-Ferroviário	1	62,000.00	1,505,120.30
Total			**15**	**1,000,000.00**	**62,178,121.50**

O modelo foi concebido de forma inteiramente parametrizável, permitindo ao pesquisador ajustar custos, capacidades e tempos de cada elo logístico, criar múltiplas configurações de infraestrutura e, assim, quantificar de maneira sistemática o impacto de diferentes políticas de investimento sobre a margem de contribuição das exportações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lopes, H. S., Lima, R. S., & Leal, F. (2020). Simulation project for logistics of Brazilian soybean exportation. International Journal of Simulation Modelling, 19(4), 571-582. https://doi.org/10.2507/IJSIMM19-4-529.

Filassi, M., & de Oliveira, A. L. R. (2021). Competitiveness drivers for soybean exportation and the fundamental role of the supply chain. Revista de Economia e Sociologia Rural, 60, e235296. https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.235296.

dos Santos Lopes, H., da Silva Lima, R., Leal, F., & de Carvalho Nelson, A. (2017). Scenario analysis of Brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of Mato Grosso State. Research in Transportation Business & Management, 25, 66-75. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.09.002

Fliehr, O., Zimmer, Y., & Smith, L. H. (2019). Impacts of transportation and logistics on Brazilian soybean prices and exports. Transportation Journal, 58(1), 65-77. https://doi.org/10.5325/transportationj.58.1.0065.

Oliveira, A. L. R. D., Filassi, M., Lopes, B. F. R., & Marsola, K. B. (2020). Logistical transportation routes optimization for Brazilian soybean: an application of the origin-destination matrix. Ciência Rural, 51(2), e20190786. http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190786.

Scheuer, L., Lopes, E. C., & Balduino, T. W. Informational Flow Mapping in Soybean Exportation Logistics Operation. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 6(9), 20-29. https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.69.3.

Péra, T. G., Bartholomeu, D. B., Su, C. T., & Caixeta Filho, J. V. (2019). Evaluation of green transport corridors of Brazilian soybean exports to China. Brazilian Journal of Operations & Production Management, 16(3), 398-412. http://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a4.

Filassi, M., Oliveira, A. L. R. D., Elias, A. A., & Braga Marsola, K. (2022). Analyzing complexities in the Brazilian soybean supply chain: a systems thinking and modeling approach. RAUSP Management Journal, 57, 280-297. https://doi.org/10.1108/RAUSP-03-2021-0053.

Lopes, H. D. S., Lima, R. D. S., & Ferreira, R. C. (2016). A cost optimization model of transportation routes to export the Brazilian soybean. Custos e Agronegócio, 12(4), 90-109. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Renato-Lima-3/publication/317747161_A_cost_optimization_model_of_transportation_routes_to_export_the_Brazilian_soybean/links/5a96ce11a6fdccecff0a78be/A-cost-optimization-model-of-transportation-routes-to-export-the-Brazilian-soybean.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail&_rtd=e30%3D. Acesso Julho 2025.

Lopes, H. D. S., & Lima, R. D. S. (2017). Alternatives for the soybean exportation in Brazil: a cost based analysis for transport via the Tocantins-Araguaia waterway. Custos e Agronegócio, 13, 239-261. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Renato-Lima-3/publication/316960072_Alternatives_for_the_soybean_exportation_in_Brazil_A_cost_based_analysis_for_transport_via_the_Tocantins-Araguaia_waterway/links/5a96cdf745851535bcddfac8/Alternatives-for-the-soybean-exportation-in-Brazil-A-cost-based-analysis-for-transport-via-the-Tocantins-Araguaia-waterway.pdf. Acesso em Julho 2025.

Thadani, R. M., & Rocha, A. C. (2024). Mapping Least Cost Transport Corridors for Soybean Exports from Mato Grosso: A Case Study of Logistics from Farm to Port. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Ramesh-Thadani/publication/386018656_Mapping_Least_Cost_Transport_Corridors_for_Soybean_Exports_from_Mato_Grosso_A_Case_Study_of_Logistics_from_Farm_to_Port/links/673f81db27661f7ae6243c68/Mapping-Least-Cost-Transport-Corridors-for-Soybean-Exports-from-Mato-Grosso-A-Case-Study-of-Logistics-from-Farm-to-Port.pdf. Acesso em Julho 2025.

Gustavo Adolfo Alves da Costa (costa@usp.br),
André Bergsten Mendes (andbergs@usp.br),
Elcio Ribeiro (elcio.ribeiro@usp.br).
RouteLab – Research on Optimization, Simulation, Transportation and Environment Laboratory
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes 2231, Cidade Universitária – Butantã, São Paulo – SP, CEP 05508-030

Transporte de carga e intermodalidade

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ESTUDO DE VIABILIDADE DO MODAL FERROVIÁRIO COMO UMA OPÇÃO NO TRANSPORTE DE BENS DE CONSUMO PARA O ESTADO DO MATO GROSSO

Paulo Rogério Zanoli
[1] Centro Universitário de Várzea Grande – UNIVAG, [2] Todimo Materiais para Construção S/A, [3]Brado Logística S/A

RESUMO
Estudos evidenciam que os modais de transporte de massa, como o ferroviário, são economicamente viáveis para o Brasil, devido às suas dimensões territoriais e ao tipo de carga gerada. Especificamente no Mato Grosso, maior produtor nacional de grãos, a operação do modal ferroviário só teve início em 2009. Com expansão da ferrovia para outras regiões do estado, o volume transportado por esse modal apresenta uma curva crescente. Como a região é uma grande geradora de cargas para exportação, esta comunicação técnica apresenta um caso segmentado de uma categoria de bem de consumo que vem se utilizando desse modal no fluxo inverso de escoamento da produção. Como resultado do caso apresentado, tem-se uma redução de custos ao transportar revestimentos cerâmicos via ferrovia de São Paulo para Mato Grosso. Com isso, espera-se estimular outros segmentos a estudarem essa possibilidade de abastecimento utilizando o modal ferroviário.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento de transportes de massa, como o ferroviário, é economicamente viável no Brasil devido à necessidade de transportar cargas das regiões centrais para os portos. No Mato Grosso, um grande produtor de grãos, a oferta do modal ferroviário iniciada em 2009 permite migrar parte do transporte das rodovias para as ferrovias. É nesse contexto, alinhado a projeções de expansão da malha ferroviária no estado, que esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo segmentado que possa contribuir para que outras instituições de diversos segmentos analisem as possibilidades de aproveitar essa oferta do modal ferroviário no Mato Grosso, especialmente para abastecer a demanda local de bens de consumo.

2. CARACTERÍSTICAS DOS MODAIS RODOVIÁRIO E FERROVIÁRIO

O transporte de cargas no Brasil depende fortemente do modal rodoviário, responsável por 60% a 65% da carga movimentada. O modal ferroviário participa com cerca de 20%. Estudos como o de Wanke (2000) indicam que, embora o transporte rodoviário permita entrega porta a porta sem transbordos, sua capacidade operacional é intermediária e seus custos variáveis são mais altos que os do modal ferroviário. O consumo de combustível por tonelada por quilômetro é maior no modal rodoviário, já que o ferroviário consome cerca de quatro vezes menos combustível. Essa variação de consumo de combustível explica a diferença dos custos variáveis entre os dois modais. Como exemplo, o Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL, 2024) apresenta levantamentos que mostram essa redução em simulações de diferentes viagens e tipos de cargas.

Outra característica dos modais é o "*transit time*", que " influencia o tempo de deslocamento dos produtos e os níveis de estoque. Modais mais rápidos tendem a reduzir os custos de manutenção de estoques. O modal ferroviário, por ser mais lento e exigir transbordos, aumenta esses custos, conforme apresentado em Ballou, (2006) e Novaes, (2014). Os diferentes modais se complementam, e a escolha entre eles deve considerar fatores que impactam os custos logísticos totais, buscando cenários economicamente viáveis e com níveis de serviço adequados.

3. O TRANSPORTE DE CARGA NO ESTADO DE MATO GROSSO

O estado do Mato Grosso, localizado na região centro-oeste do Brasil, possui uma população de 3.658.649 habitantes e uma área de 903.208 km² (IBGE, 2023). Com uma economia baseada no agronegócio, destaca-se como o maior produtor nacional de soja, milho e algodão, além de possuir o maior rebanho bovino do país. Esse alto volume de produção faz do estado um líder em exportações, gerador de grandes demandas por transporte de cargas. Além disso, Mato Grosso depende do abastecimento de produtos industrializados oriundos principalmente das regiões Sul e Sudeste do país.

3.1. Escoamento da produção no estado do Mato Grosso

Assim como em grande parte do país, o transporte rodoviário tem sido historicamente predominante em Mato Grosso. No entanto, desde 2009, o estado passou a contar com o modal ferroviário, inicialmente alcançando Alto Taquari e, em setembro de 2013, expandindo-se até Rondonópolis. Com a chegada da ferrovia ao terminal rodoferroviário de Rondonópolis, operado pela Rumo Logística, o estado passou a se destacar como um dos maiores polos da América Latina no transporte ferroviário de grãos.

A movimentação ferroviária de contêineres, medida em toneladas úteis (TU), apresentou crescimento expressivo, passando de 2,6 milhões de toneladas em 2010 para 5,7 milhões em 2022, conforme dados da INFRA S.A. (2023).

Como o foco desse trabalho é o estado do Mato Grosso, será dada atenção especial ao terminal rodoferroviário de Rondonópolis, que movimenta exclusivamente cargas conteinerizadas, onde, após 2017, a ligação ferroviária com origem em Rondonópolis se consolidou como líder na movimentação de contêineres, superando os principais fluxos do país (INFRA S.A., 2023). A médio prazo, estão em andamento as obras de expansão da ferrovia estadual, com previsão de conclusão até 2030, segundo a SINFRA (2023). A nova linha ferroviária, com 743 km de extensão, passará por Cuiabá, cidade que concentra quase um terço da população do estado, e seguirá até a região médio-norte, principal polo de produção agrícola de Mato Grosso.

3.2. Abastecimento de produtos para o estado do Mato Grosso

Embora não seja densamente populoso, o Mato Grosso demanda uma grande variedade de produtos provenientes de outras regiões do país, como insumos agrícolas, produtos industriais, combustíveis e bens de consumo. Atualmente, a maioria desses produtos é transportada por meio do modal rodoviário. No entanto, este estudo busca explorar a possibilidade de migrar parte desse volume para o modal ferroviário.

Tal mudança poderia reduzir os custos de transporte e, dependendo das características dos produtos, não acarretaria aumento nos custos de manutenção de estoque, resultando em menor custo logístico total e em preços mais competitivos no mercado interno. Além disso, há um desequilíbrio significativo entre o fluxo de contêineres que chegam e os que saem carregados do estado pelo modal ferroviário. Embora o Mato Grosso seja um grande gerador de cargas para exportação, muitos contêineres chegam vazios.

Dados apresentados pelo ILOS (2025) mostram que, entre junho de 2024 e maio de 2025, foram transportadas 4,4 milhões de toneladas com destino ao estado, enquanto 26,2 milhões de toneladas saíram dele.

Considerando o contexto logístico do Mato Grosso e essa diferença de demanda entre os fluxos de entrada e saída no modal ferroviário, o próximo tópico apresentará um caso que explora o transporte de bens de consumo com destino ao estado, demonstrando sua viabilidade econômica e operacional.

4. CASO DE ABASTECIMENTO UTILIZANDO O MODAL FERROVIÁRIO.

Este estudo apresenta, um caso de abastecimento de revestimentos cerâmicos, pisos e azulejos, da região de Rio Claro, no interior de São Paulo, com destino a Rondonópolis, no Mato Grosso. Essa movimentação tem início com o carregamento do contêiner de 40 pés nos fabricantes, localizados a aproximadamente 60 quilômetros do terminal rodoferroviário de Sumaré/SP, que possui uma ligação ferroviária direta com o terminal rodoferroviário de Rondonópolis/MT.

O primeiro desafio para a viabilidade dessa movimentação, trata-se da análise prévia de aproveitamento de carga e riscos de ocorrências de avarias durante o transporte desses produtos, que são acondicionados em paletes de alta densidade, aproximadamente 1.500 kg cada. Para isso, antes do início da operação, é realizada uma análise específica para cada tipo de produto e sua respectiva unitização, denominada pelo operador ferroviário como “croqui”. Nesses croquis são definidos: (*i*) a disposição dos paletes no contêiner; (*ii*) a necessidade de dispositivos de travamento para evitar deslocamento da carga; e (*iii*) o aproveitamento volumétrico e de carga do contêiner de 40 pés, que tem uma capacidade de pouco mais de 28 toneladas. A seguir, apresenta-se um exemplo ilustrativo desse estudo na Figura 1.

No exemplo, utiliza-se um piso cerâmico com dimensões de 90,5 x 90,5 cm, unitizado em paletes de 1,00 x 1,20 m, com peso total de 1.535 kg por palete. O croqui de acomodação define a posição dos paletes de forma a manter o centro de gravidade estável. A configuração apresentada comporta 18 paletes, totalizando 27.535 kg, e demanda um dispositivo trava-palete próximo à porta do contêiner. Assim, com aproveitamento superior a 98% da capacidade do contêiner, ficou definido entre os agentes envolvidos que somente produtos com aproveitamento igual ou superior a 90% da capacidade de carga, e que não exijam remontes de paletes (ou seja, apenas um lastro), seriam liberados para embarque-teste.

Após essa primeira viagem teste, já no terminal rodoferroviário de Rondonópolis, destino final é realizada uma vistoria visual para identificação de avarias ou deslocamento da carga. Caso não apresente danos aparentes e os paletes estejam íntegros, o produto ou produtos de mesmas dimensões e unitização são liberados para novos carregamentos e seguem um fluxo operacional contínuo de abastecimentos. Já, os produtos, cujo croqui, apresentam uma baixa ocupação do contêiner, são direcionados ao modal rodoviário.

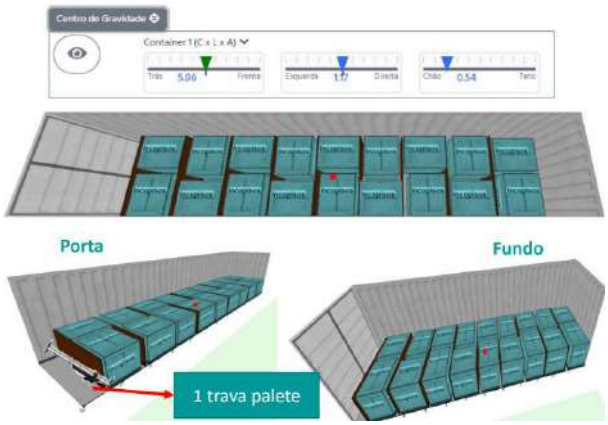


Figura 1: Exemplo de croqui e simulação de centro de gravidade de carga em um contêiner de 40 pés.

Outro ponto relevante é que, mesmo com a aprovação do croqui e a realização da viagem-teste, optou-se por priorizar o transporte ferroviário apenas para itens de menor valor agregado e alto volume de consumo. Isso visa minimizar os impactos no custo de manutenção de estoques, uma vez que a substituição do modal rodoviário pelo ferroviário implica um aumento no tempo total de abastecimento, de cerca de 5 para 15 dias.
Esse procedimento vem sendo aplicado desde 2023 por um cliente do operador logístico da ferrovia, um revendedor de pisos e azulejos cerâmicos no Mato Grosso. Apenas para esse cliente, foram transportadas em média 700 toneladas por mês de produtos nos últimos dois anos. Essa operação contribuiu significativamente para a ocupação dos contêineres no fluxo de menor volume (sentido Mato Grosso), gerando receita de frete no fluxo inverso ao do escoamento da produção, o que reduz a movimentação de contêineres vazios nessa rota ferroviária.
Com base nos dados observados pelo revendedor no primeiro semestre de 2025, o custo médio de frete sobre o valor do produto foi em média 35% menor pelo ferroviário para essa categoria de produto. Além da eficiência econômica, destaca-se também a eficiência operacional, com uma incidência quase nula de avarias nas cargas transportadas por ferrovia, devido ao cuidado na configuração dos carregamentos e nos estudos dos croquis.
A Tabela 1 apresenta um resumo comparativo dessas variáveis (financeira e operacionais) observadas pelo cliente entre embarcadores rodoviários e ferroviário, como segue:

Tabela 1: Diferenças observadas entre os modais do caso apresentado.

Modal	Custo do frete sobre o valor do produto (%)	Tempo de abastecimento (dias)	Avarias sobre o valor do produto transportado (%)
Rodoviário	35%	5 dias	0,2%
Ferroviário	15%	15 dias	Não registrou

Vale destacar que nem todos os produtos têm seus croquis aprovados para o modal ferroviário. Por isso, parte da demanda de carga ainda é atendida pelo modal rodoviário, que apresenta maior variabilidade nos custos, por ser mais sensível às oscilações de oferta e demanda nos fluxos logísticos de entrada e saída do estado.
Essa redução na taxa de transporte sobre o valor do produto acompanha os dados publicados pelo Observatório Nacional de Transporte e Logística. Segundo sua publicação mais recente, o frete médio em R$/TKU para contêineres é de R$ 0,51 no modal rodoviário e R$ 0,38 no ferroviário, uma redução superior a 24% a favor da ferrovia (INFRA S.A., 2025).
Um ponto de atenção nos custos logísticos totais refere-se à parcela associada ao estoque, já que o modal ferroviário demanda mais tempo (em trânsito e nos transbordos). Para conter esse impacto, além da aprovação dos croquis, priorizaram-se produtos de alta densidade, baixo valor agregado e elevado volume de consumo. Segundo o cliente, a maior parte dos produtos transportados por ferrovia apresenta custo médio inferior a R$ 1,00/kg, o que reduz o impacto nos custos de manutenção de estoques.
Outra estratégia adotada para evitar o aumento dos custos com estoque, trata-se de aproveitar o fluxo de frequência constante do modal ferroviário, que permite gerenciar os estoques em trânsito em diferentes pontos desse fluxo, como: (*i*) cargas no processo de expedição nas fábricas; (*ii*) cargas no terminal de origem em São Paulo; (*iii*) cargas em trânsito embarcadas nas composições ferroviárias e (*iv*) cargas no terminal de destino no

Mato Grosso. Contando com esse fluxo contínuo e integrado, o revendedor manteve seus níveis de estoque mesmo com o aumento no tempo total de abastecimento comparado com o rodoviário. O impacto no custo de estoque é uma variável importante e deve ser avaliado com cautela para outras categorias de produtos, em função do tempo de processo do modal ferroviário.

De forma geral, a metodologia apresentada neste caso pode ser replicada para outras categorias de produtos, como: cimentos; insumos agrícolas; aço para construção; tintas; bebidas; produtos de higiene e limpeza; entre outros, seguindo os passos: (*i*) análise de aproveitamento da capacidade de carga do contêiner em função da análise dos croquis versus unitização do produto; (*ii*) análise do custo do frete do croqui aprovado; (*iii*) análise do impacto dos níveis de estoque em função do tempo de abastecimento do ferroviário e (*iv*) controle das ocorrências de avarias.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme objetivo desse estudo, que propõem destacar as oportunidades que o modal ferroviário pode oferecer ao país e, mais especificamente, ao estado do Mato Grosso, não apenas para o escoamento de produtos agrícolas, mas também como uma opção para o transporte de bens de consumo, conclui-se que, para determinadas categorias de produtos, esse modelo pode ser altamente aderente, proporcionando custos mais competitivos para atender à demanda local.

É inegável a importância do modal rodoviário como complemento ao ferroviário, especialmente para produtos de maior custo e na movimentação fracionada. No entanto, é fundamental que empresas privadas, órgãos públicos e os próprios operadores ferroviários se empenhem em desenvolver parcerias e estudos que viabilizem projetos como o apresentado neste trabalho.

Um ponto de atenção que deve ser avaliado, refere-se aos impactos nos níveis de estoque decorrentes da migração do transporte rodoviário para o ferroviário. A gestão eficiente desses impactos é essencial para que a redução dos custos de transporte não seja anulada pelo aumento dos custos com estoques.

Considerando as perspectivas futuras do estado de Mato Grosso, com a conclusão do trecho da ferrovia estadual que passará por Cuiabá; onde se concentra grande parte da população e, consequentemente, a demanda por bens de consumo, projeta-se um cenário favorável para o transporte de contêineres carregados com destino ao estado, aproveitando o fluxo inverso ao do escoamento de cargas e com isso reduzir o desequilíbrio entre os sentidos da ferrovia que conecta São Paulo ao Mato Grosso, contribuindo significativamente para a viabilidade econômica e operacional da expansão do modal ferroviário na região.

Por fim, é relevante destacar que, além dos benefícios operacionais e econômicos associados à migração do transporte de cargas do modal rodoviário para o ferroviário no estado, essa mudança também promove ganhos ambientais significativos. Estudos indicam que o modal ferroviário pode reduzir em até 65% as emissões de dióxido de carbono por tonelada-quilômetro útil (gCO_2/TKU), quando comparado ao rodoviário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballou, Ronald H. (2007) Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logistica Empresarial – 5ª ed. Tradução Raul Rubenich, Porto Alegre: Editora Bookman.

CONAB (2024) Companhia Nacional de Abastecimento – Acompanhamento da safra brasileira. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras (acesso em 01/07/2024).

IBGE (2022) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísca – Cidades e Estados. Disponível em: : https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt.html (acesso em 03/07/2024).

ILOS (2025) Instituto de Logística e Supply Chain LTDA. Indicadores Logísticos – Ferroviário. Disponível em: https://ilos.com.br/publicacoes/indicadores-logisticos-ferroviario/ (acesso em 13/07/2025)

INFRA S.A. (2023) Boletins de Logística. Boletim Volume II: Contêineres – Utilização e Contexto Brasileiro. Publicado em 06/11/2023. Disponível em: https://www.infrasa.gov.br/ontl/publicacoes/boletins-de-logistica/#flipbook-df_57357/1/ (acesso em 06/07/2024).

INFRA S.A. (2025) Panorama Transportes 44ª Edição de 30/04/2025. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/publicacoes/panorama-transportes/#flipbook-df_72251/6/ (acesso em 01/07/2025).

Novaes, Antonio G. (2014) Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição – 4ª ed. Editora Gen Atlas.

SINFRA (2023) Secretaria de estado de Infraestrutura e Logística do Mato Grosso. Notícias Disponível em: https://www.sinfra.mt.gov.br/-/obras-da-1%C2%BA-ferrovia-estadual-est%C3%A3o-em-andamento-com-a-constru%C3%A7%C3%A3o-de-cinco-viadutos (acesso em 01/07/2024).

Paulo Rogerio Zanoli (paulo.zanoli@univag.edu.br)
Centro Universitário de Várzea Grande – UNIVAG, AV. Dom Orlando Chaves, nº 2.655, Várzea Grande – MT.

Transporte de carga e intermodalidade

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

APLICAÇÃO DE DEEP LEARNING NA PREVISÃO DE DEMANDA DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

Lucas Gomes Pereira[1], **Matheus Brendon Francisco**[1], **Renato da Silva Lima**[1]
[1]Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

RESUMO
O transporte rodoviário de cargas, um dos principais modos de transporte, enfrenta desafios relacionados à volatilidade da demanda e à necessidade de planejamento eficiente. Esta pesquisa investiga a aplicação de modelos de *Deep Learning* na previsão de demanda do setor, a partir de uma série temporal construída com dados de um *marketplace* logístico. Após o pré-processamento dos dados, cinco arquiteturas foram testadas: LSTM, GRU, CNN-1D, *Transformer* e CNN+LSTM. A avaliação dos modelos foi realizada utilizando R^2, RMSE, MAE e MAPE. Os resultados mostram que o modelo GRU obteve o melhor desempenho geral em todas as métricas, reforçando sua robustez. O modelo *Transformer* também se destacou, alcançando o menor erro percentual (MAPE), o que é um resultado crucial para a tomada de decisão gerencial. A pesquisa, ainda em andamento, prevê o teste de outras arquiteturas e busca, além da contribuição metodológica, fornecer subsídios ao planejamento logístico por meio de previsões confiáveis.

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário de cargas responde por 61% da movimentação de cargas no Brasil, sendo essencial à logística nacional (Coppe *et al.*, 2020). Trata-se de um setor altamente sensível a variações econômicas, sazonalidades e choques de demanda, exigindo previsões confiáveis para alocação de veículos, rotas e precificação (Moschovou e Giannopoulos, 2021). Modelos estatísticos tradicionais, como regressão linear e ARIMA, têm sido amplamente utilizados para a previsão de demanda (Semekonawo e Kam, 2022; Silva *et al.*, 2020), mas apresentam limitações diante de padrões temporais não lineares e grande volume de dados (Qin *et al.*, 2019). Em contrapartida, técnicas de *Deep Learning* vêm se consolidando em tarefas de previsão de séries temporais em diversos setores, com arquiteturas como LSTM (*Long Short-Term Memory*), GRU (*Gated Recurrent Unit*), Redes Convolucionais (CNN) e *Transformer* demonstrando bons resultados (Jahin; Shahriar e Amin, 2024).

Apesar dos avanços, o uso sistemático dessas técnicas no setor de transportes de cargas ainda é incipiente (Kotenko, 2022), especialmente no Brasil. Assim, esta pesquisa de doutorado busca avaliar o desempenho de diferentes arquiteturas de *Deep Learning* na previsão de demanda do transporte rodoviário de cargas, com base em dados reais. A pergunta central é: "Modelos de *Deep Learning* apresentam desempenho satisfatório neste setor, assim como em outros contextos? Quais arquiteturas são mais adequadas?". Além da contribuição metodológica, o estudo visa oferecer subsídios práticos ao planejamento logístico, como alocação de frota e gestão da capacidade operacional.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

A análise exploratória teve caráter preliminar e utilizou uma base de dados de um *marketplace* logístico brasileiro, com 5.666.790 registros de postagens de carga, cobrindo o período de janeiro de 2019 a maio de 2022. A série temporal considerada foi o peso total (em kg) das cargas anunciadas diariamente. Essa variável foi escolhida por ser o indicador mais representativo da demanda real por transporte, estando diretamente ligada à capacidade operacional necessária para atender a uma solicitação de frete.

O pré-processamento dos dados foi uma etapa crucial e incluiu várias fases. Inicialmente, foram tratados os valores ausentes e removidos os *outliers* usando o método IQR (Intervalo Interquartil). Em seguida, a base de dados foi agregada diariamente para criar uma série temporal. Por fim, aplicou-se a normalização com o *MinMaxScaler* para otimizar o desempenho dos modelos. Para a modelagem, o conjunto de dados foi dividido temporalmente. Os dados de 2019 a 2021 foram usados para o treinamento, enquanto o ano de 2022 foi reservado para o teste dos modelos. Foram implementadas cinco arquiteturas de *Deep Learning*: LSTM, GRU, CNN-1D, *Transformer* e um modelo híbrido CNN+LSTM. Cada arquitetura foi configurada com parâmetros adequados às suas características e treinada com janela deslizante de 7 dias. A otimização dos modelos foi realizada com função de perda baseada no erro quadrático médio (MSE) e otimizador Adam.

A avaliação de desempenho dos modelos utilizou um conjunto de métricas para oferecer uma visão completa sobre a qualidade preditiva. O coeficiente de determinação (R^2) foi o principal indicador de acurácia,

complementado pelas métricas de erro RMSE (*Root Mean Square Error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Essa análise numérica foi ainda reforçada com gráficos de comparação entre os valores reais e previstos, permitindo uma observação visual da aderência dos modelos aos padrões da série histórica.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A Tabela 1 apresenta o desempenho dos cinco modelos de *Deep Learning* implementados. Os resultados revelam que o modelo GRU se destacou, apresentando o melhor desempenho em todas as métricas. O alto valor de R^2 indica a maior capacidade do GRU de capturar a variabilidade dos dados. As métricas de erro (RMSE e MAE) confirmam que ele comete, em média, os menores erros em termos absolutos. Em segundo lugar, o modelo *Transformer* obteve um $R^2 = 0{,}7640$, superando o modelo LSTM tradicional. O modelo também apresentou o menor MAPE (598,43%). Esse desempenho indica que, embora tenha uma tendência à suavização, ele comete erros percentuais menores, tornando suas previsões mais confiáveis do ponto de vista prático. O modelo LSTM ficou em terceiro lugar, enquanto o modelo híbrido CNN+LSTM obteve um resultado intermediário. Apesar de ficar abaixo dos modelos recorrentes puros, a combinação de extração de características locais (CNN) com memória temporal (LSTM) mostra-se promissora. Por fim, o modelo CNN-1D isolado apresentou o menor desempenho, sugerindo limitações na captura de dependências temporais mais longas, que são comuns em séries de demanda.

Tabela 1: Desempenho dos modelos de *Deep Learning*

Modelo	R^2	RMSE (kg)	MAE (kg)	MAPE (%)
GRU	0,7856	47.388.864,93	27.556.165,32	720,50
Transformer	0,7640	51.893.438,96	36.731.174,53	598,43
LSTM	0,7467	51.520.567,21	34.435.028,36	767,50
CNN+LSTM	0,6872	60.942.613,53	43.513.073,53	702,50
CNN-1D	0,6332	58.576.045,64	41.136.744,44	759,79

A Figura 1 apresenta uma comparação visual entre os valores reais e as previsões geradas pelos cinco modelos implementados, ao longo de 60 dias do conjunto de teste. Essa análise gráfica corrobora os resultados quantitativos de desempenho, oferecendo uma visão clara da aderência de cada modelo à dinâmica da série temporal.

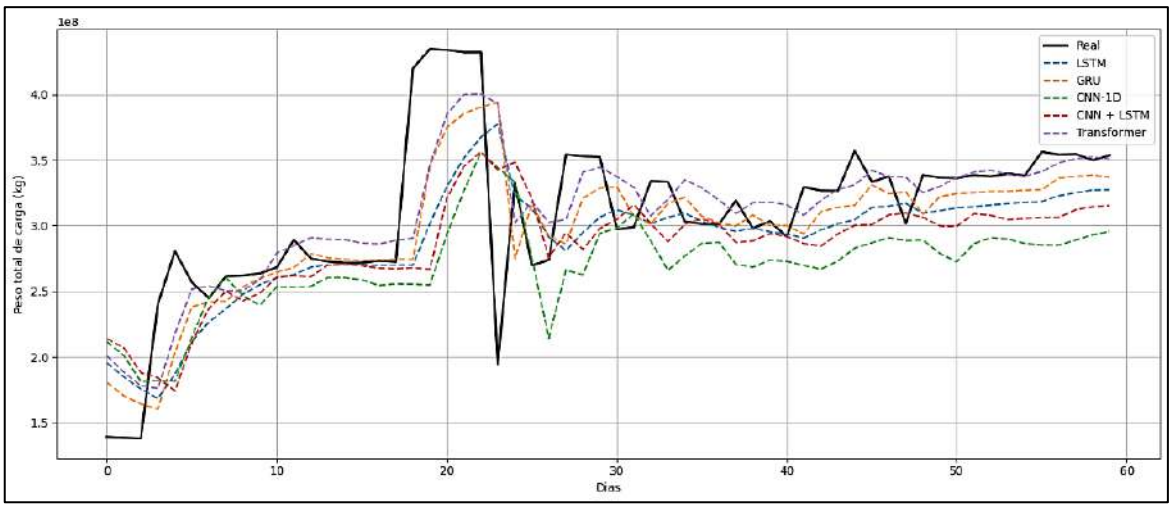


Figura 1: Comparação dos valores reais *versus* previstos

Observa-se que o modelo GRU obteve a melhor aderência visual, acompanhando com precisão tanto as tendências crescentes quanto os picos de demanda. Esse comportamento reforça o bom desempenho quantitativo do modelo, indicando sua superioridade na captura da complexa estrutura da série. O modelo *Transformer* também demonstrou um desempenho consistente, especialmente nas faixas intermediárias, mantendo-se próximo da curva real sem apresentar ruídos excessivos. Apesar de uma tendência à suavização nos extremos, seu desempenho evidencia sua capacidade de capturar a estrutura da série, o que é consistente com seu baixo erro percentual (MAPE). A previsão do LSTM acompanha razoavelmente a série real, mas

exibe menor precisão nos picos e vales, o que justifica seu coeficiente R^2 ligeiramente inferior, embora demonstre estabilidade. O modelo híbrido CNN+LSTM apresentou um desempenho intermediário, seguindo o comportamento geral da série, mas com uma resposta mais lenta a variações abruptas. Isso limita sua capacidade preditiva em períodos de maior volatilidade. Por fim, o modelo CNN-1D foi o que mais se distanciou da série real. Apesar de capturar tendências gerais, ele demonstrou uma subestimação sistemática dos valores, principalmente em períodos de maior volume. Isso é coerente com o menor coeficiente de determinação obtido e reflete as limitações das redes convolucionais simples para tarefas que exigem uma memória temporal mais longa.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRÓXIMOS PASSOS

Os resultados deste estudo demonstram o potencial do *Deep Learning* na previsão de demanda para o transporte rodoviário de cargas, com destaque para as arquiteturas GRU e *Transformer*. O modelo GRU se mostrou o mais robusto, liderando as métricas de desempenho, com um R^2 de 0,7856 e os menores erros médios (RMSE e MAE). Esse resultado reforça a eficácia dos modelos recorrentes para capturar as complexas dependências temporais em séries logísticas. Adicionalmente, o desempenho promissor do *Transformer* é um achado notável. Apesar de uma ligeira desvantagem no R^2 em comparação com o GRU, este modelo obteve o menor MAPE (598,43%). Esse resultado é crucial do ponto de vista prático, pois indica que, em termos percentuais, as previsões do *Transformer* são as mais precisas, o que facilita a tomada de decisão gerencial.

Como esta é uma etapa inicial da tese, os próximos passos envolvem o aprimoramento dos modelos com ajustes mais refinados, além da extração de novas séries temporais. Também será conduzida uma análise de correlação entre séries com defasagens temporais, a fim de verificar dependências entre as variáveis e otimizar o uso de informações. Novas arquiteturas de *Deep Learning* serão testadas, como o *Prophet*, TCN e DeepAR, para ampliar a comparação. Por fim, pretende-se aplicar os modelos de forma prática, como previsões que apoiem decisões estratégicas no setor de transportes rodoviário de cargas, sobretudo os *marketplaces* logísticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coppe, L. M. *et al.* (2020) Precificação de fretes rodoviários via modelos paramétricos. *Revista Produção Online*, v. 20, n. 4, p. 1214–1237. Disponível em: https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/download/4021/1981 (acesso em 04/07/2025).

Jahin, M. A.; A. Shahriar e M. A. Amin (2024) MCDFN: Supply chain demand forecasting via an explainable multi-channel data fusion network model integrating CNN, LSTM, and GRU. Disponível em: https://arxiv.org/pdf/2405.15598 (acesso em 04/07/2025).

Kotenko, V. G. (2022) Application of algorithmic models of machine learning to the freight transportation process. *Transport Technologies,* v. 2022, n. 2, p. 10–21. DOI: 10.23939/tt2022.02.010.

Moschovou, T. e A. G. Giannopoulos (2021) Road freight transportation in a period of economic instability: A panel data study in four EU Mediterranean countries. *Research in transportation business and management*, p. 100622. DOI: 10.1016/j.rtbm.2021.100622.

Qin, L. *et al.* (2019) The impact of lengths of time series on the accuracy of the ARIMA forecasting. *International Research in Higher Education*, v. 4, n. 3, p. 58. DOI: 10.5430/irhe.v4n3p58.

Silva, J. *et al.* (2020) Forecasting electric load demand through advanced statistical techniques. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1432, n. 1, p. 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1432/1/012031.

Semekonawo, K. P. e S. Kam (2022) Linear regression and ARIMA models for electricity demand forecasting in West Africa. *Journal of Energy Research and Reviews*, p. 26–36. DOI: 10.9734/jenrr/2022/v12i230296.

Lucas Gomes Pereira (d2021100736@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá, *Campus* Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil
Matheus Brendon Francisco (matheus_brendon@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá, *Campus* Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil
Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá, *Campus* Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil

ROTEIRIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE RECARGA PARA FROTAS MISTAS: UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO MULTI-PERÍODO

Guilherme F. Alves, Claudio Barbieri da Cunha
Escola Politecnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
A descarbonização do transporte de cargas impulsiona a adoção de frotas elétricas, porém a viabilidade econômica depende da otimização conjunta das rotas e do alto investimento em infraestrutura de recarga. Esta dissertação aborda o problema integrado de roteirização de uma frota mista (elétrica e à diesel) e a localização de estações de recarga sob um horizonte de planejamento multi-período. Foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para minimizar os custos totais, envolvendo operações, veículos e a instalação da infraestrutura, considerando a autonomia dos veículos e a dinâmica de uso das estações ao longo do tempo.

1. INTRODUCAO

O avanço da agenda de sustentabilidade e a pressão por reduzir as emissões no setor de transportes têm acelerado a transição para veículos elétricos (VEs) em operações logísticas. Para o transporte rodoviário de cargas de longa distância, no entanto, essa transição é complexa. A autonomia limitada das baterias, os tempos de recarga e, principalmente, a necessidade de uma infraestrutura de carregamento estrategicamente posicionada representam barreiras operacionais e financeiras significativas. Uma decisão de investimento em infraestrutura mal planejada pode comprometer a viabilidade econômica de toda a operação de VEs.

A literatura aborda essa questão por meio de modelos de roteirização de veículos elétricos (e-VRP) e de localização de instalações (FLP). Contudo, muitas abordagens tratam essas decisões de forma sequencial ou se concentram em um único período de planejamento, o que pode levar a soluções subótimas a longo prazo. Para superar essas limitações, este trabalho propõe uma abordagem integrada. O objetivo é desenvolver e validar um modelo de otimização multi-período que resolve simultaneamente o problema de roteirização de uma frota mista e a alocação de estações de recarga, visando minimizar o custo total de instalação e operação. A principal contribuição é a formulação de um modelo matemático e de um algoritmo baseado em metaheurística para resolução de problemas em larga escala, capturando a dinâmica temporal das decisões de recarga.

A estrutura do trabalho prossegue com a revisão da literatura pertinente na Seção 2. Em seguida, a Seção 3 descreve a metodologia de otimização, e a Seção 4 aborda os próximos passos da pesquisa, que ainda está em andamento.

2. REVISAO DE LITERATURA

A transição para uma economia de baixo carbono, impulsionada por políticas globais como o Acordo de Paris, tem colocado o setor de transportes sob intensa pressão para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa. O transporte rodoviário de cargas é um dos principais alvos, pois os veículos pesados, apesar de representarem uma pequena fração da frota total, são responsáveis por uma parcela desproporcional da poluição (Mulholland et al., 2018). Nesse cenário, a eletrificação das frotas com caminhões elétricos a bateria surge como uma das estratégias mais promissoras, com potencial para superar outras tecnologias alternativas em diversos cenários (Sen et al., 2017; Mauler et al., 2022).

A adoção de caminhões elétricos oferece vantagens significativas, como a eliminação de emissões de gases via escapamento e custos operacionais e de manutenção potencialmente menores. Contudo, a sua implementação em larga escala enfrenta barreiras consideráveis, especialmente para operações de longa distância. Os principais desafios são o alto custo de aquisição dos veículos e a necessidade de uma infraestrutura de recarga estrategicamente planejada. A ausência de estações de recarga para veículos pesados é um obstáculo fundamental, cuja superação demanda um planejamento de investimento para garantir a viabilidade operacional e econômica da transição. Um estudo da *Transport & Environment* (T&E) estimou a necessidade de aproximadamente 40.000 carregadores em locais públicos e centros de distribuição na Europa para suportar a eletrificação de uma parcela significativa da frota de caminhões (Mathieu, 2020).

Do ponto de vista da pesquisa operacional, o problema da eletrificação de frotas é inerentemente complexo, pois envolve decisões interdependentes em níveis estratégico e tático. A literatura tem abordado essa questão por meio de diferentes classes de problemas de otimização: (i) Problema de Roteirização de Veículos Elétricos (e-VRP): Uma extensão do clássico VRP, o e-VRP determina as rotas ótimas para uma frota de veículos elétricos, considerando restrições de autonomia da bateria e a necessidade de paradas para recarga em estações pré-existentes; (ii) Problema de Roteirização e Localização (LRP): Quando a localização das estações de recarga não é conhecida, o problema se torna ainda mais complexo. Ele se enquadra na classe dos LRPs, que otimizam simultaneamente as decisões de localização de instalações (neste caso, as estações de recarga) e as rotas dos veículos que as utilizam.

A abordagem deste trabalho consiste em propor uma variante do LRP para uma frota mista, que considera as particularidades dos veículos elétricos (e.g., Goeke & Schneider, 2015; Hiermann et al., 2019). A natureza combinatória e a complexidade dos problemas do tipo LRP, especialmente quando envolvem estações de recarga ou troca de bateria (Almouhanna et al., 2020; Corrêa & Dos Santos, 2020), exigem, frequentemente, o uso de métodos de solução específicos. Meta-heurísticas como a *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) têm se mostrado particularmente eficazes para encontrar soluções de alta qualidade em tempo computacional razoável para problemas de roteirização complexos (Dönmez et al., 2022; Amiri et al., 2023). Apesar dos avanços, a análise da literatura revela lacunas importantes que esta dissertação busca preencher:

(i) Foco no Contexto Urbano: Diversos estudos recentes, como os de Pahwa & Jaller (2022, 2024), concentram-se em operações de última milha e distribuição urbana. Há uma carência de pesquisas aplicadas ao transporte regional de cargas, cobrindo distâncias maiores (e.g., 100-200 km), que possuem desafios operacionais distintos.

(ii) A Dimensão Temporal: A lacuna mais significativa é que a maioria dos modelos existentes é estática, ou seja, otimiza as decisões para um único período de planejamento. No entanto, o investimento em infraestrutura é uma decisão estratégica de longo prazo. Ao desconsiderar a evolução temporal, os modelos estáticos podem levar a investimentos subótimos.

O trabalho aborda diretamente essas lacunas ao propor um modelo multi-período para o problema integrado de roteirização e localização de frota mista, aplicado ao contexto do transporte regional de cargas, representando uma contribuição relevante para a literatura da área.

3. METODOS

O modelo proposto considera conjuntos de nós $\mathcal{N}$ de um grafo $\mathcal{G}$, veículos elétricos $\mathcal{V}_e$ e convencionais $\mathcal{V}_c$, e períodos discretos $\mathcal{T}$. As variáveis de decisão incluem:

- Variáveis binárias x^e_{ijvt} e x^c_{ijvt} para indicar se um veículo elétrico ou convencional, respectivamente, executa a viagem de i para j no período t.
- Variável binária u_{vit} para indicar se um veículo v está presente no nó i no início do período t.
- Variável binária z_i para indicar se instalação de uma estação de recarga no nó i é aberta.
- Variável contínua y_{vt} para representar a capacidade da bateria do veículo elétrico v no início do período t, medida em km.

A função objetivo busca minimizar o custo total de transporte (elétrico e convencional), o investimento em estações de recarga e o custo proporcional ao total de energia recarregada. Isso inclui custos operacionais por distância c_e, c_c, custo fixo de instalação de estações c_r, custo variável por veículo elétrico que utiliza a estação c^n_r, e custo por *quilowatt*-hora recarregado c^{kw}_r.

As restrições do modelo garantem a integridade e a viabilidade da operação logística. Primeiramente, são assegurados o atendimento completo da demanda, onde cada par de origem-destino é atendido uma única vez por período, e a conservação do fluxo, que mantém a continuidade das rotas para cada veículo. O modelo também impõe que cada veículo realize no máximo uma viagem por período e retorne obrigatoriamente ao seu nó de origem ao final do horizonte de planejamento. Especificamente para a frota elétrica, as restrições de

alcance impedem que uma viagem seja realizada sem carga de bateria suficiente, e a dinâmica de recarga modela a evolução do nível de energia, considerando o consumo e o reabastecimento. Por fim, o modelo gerencia as decisões de infraestrutura, limitando o número máximo de estações que podem ser instaladas R_{max} e a capacidade de recargas simultâneas em cada uma N_{max}, garantindo que a recarga só ocorra em nós onde uma estação foi de fato implantada.

4. ESTADO ATUAL E PROXIMOS PASSOS

A pesquisa encontra-se na fase de desenvolvimento e validação do modelo matemático proposto, com testes iniciais sendo conduzidos para avaliar os resultados parciais em instâncias de pequena dimensão. Para endereçar a complexidade computacional esperada em cenários mais realistas, a etapa subsequente será o desenvolvimento de uma metaheurística baseada em ALNS, inspirada em inspirada em trabalhos de referência na área (e.g., Pelletier et al., 2019; Hiermann et al., 2019; Dönmez et al., 2022). Uma vez implementado, o algoritmo terá sua eficácia testada em um estudo de caso prático, utilizando uma base de dados real cedida por uma empresa do setor de alimentos e bebidas. As etapas conclusivas do trabalho envolvem a análise aprofundada dos resultados, a redação do relatório intermediário para qualificação e a posterior elaboração e defesa da dissertação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almouhanna, A., Quintero-Araújo, C. L., Panadero, J., Juan, A. A., Khosravi, B., & Ouelhadj, D. (2020). The location routing problem using electric vehicles with constrained distance. Computers & Operations Research, 124, 104864. DOI: 10.1016/j.cor.2019.104864.

Amiri, A., Zolfagharinia, H., & Hassanzadeh Amin, S. (2023). Routing a mixed fleet of conventional and electric vehicles for urban delivery problems: considering different charging technologies and battery swapping. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, Taylor & Francis. DOI: 10.1080/23302674.2023.2191804.

Corrêa, V. H. V., & Dos Santos, A. G. (2020). A heuristic algorithm for the Multi-Depot Electric Location-Routing Problem with Time Windows, Battery Swap Stations and Partial Recharging. Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. DOI: 10.59254/sbpo-2020-122725.

Dönmez, S., Koç, Ç., & Altıparmak, F. (2022). The mixed fleet vehicle routing problem with partial recharging by multiple chargers: Mathematical model and adaptive large neighborhood search. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 164, 102917. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102917.

Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. European Journal of Operational Research, 245(1), 81-99. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.01.049.

Hiermann, G., Hartl, R. F., Puchinger, J., & Vidal, T. (2019). Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. European Journal of Operational Research, 272(2), 655-674. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.06.025.

Mathieu, L. (2020). Unlocking Electric Trucking in the EU: recharging in cities. Transport & Environment.

Mauler, L., Dahrendorf, L., Duffner, F., Winter, M., & Leker, J. (2022). Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: A U.S. case study. Journal of Energy Storage, 49, 103891. DOI: 10.1016/j.est.2021.103891.

Mulholland, E., Teter, J., Cazzola, P., McDonald, Z., & Ó Gallachóir, B. P. (2018). The long haul towards decarbonising road freight – A global assessment to 2050. Applied Energy, 216, 668-682. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.058.

Pahwa, A., & Jaller, M. (2022). A cost-based comparative analysis of different last-mile strategies for e-commerce delivery. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 164, 102783. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102783.

Pahwa, A., & Jaller, M. (2024). Navigating the Last-Mile: Opportunities and Challenges towards Sustainable E-commerce Deliveries.

Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. Transportation Research Part B: Methodological, 126, 225-255. DOI: 10.1016/j.trb.2019.06.006.

Sen, B., Ercan, T., & Tatari, Ö. (2017). Does a battery-electric truck make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. Journal of Cleaner Production, 141, 110-121. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.046.

Guilherme Fernandes Alves (guilherme_fernandes@usp.br), Claudio Barbieri da Cunha (cbcunha@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Professor Almeida Prado, Travessa 2, nº 83, Edifício de Engenharia Civil, Cidade Universitária, São Paulo – SP, Brasil, CEP 05508-900

Distribuição urbana de mercadorias

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS POR MOTOCICLISTAS QUE PRESTAM SERVIÇOS DE ENTREGA E TRANSPORTE INDIVIDUAL DE PESSOAS EM FORTALEZA

Alysson Andrade Amorim, Bruno Vieira Bertoncini
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
A crescente demanda por serviços de entrega rápida e transporte individual de passageiros, impulsionada pela popularização de aplicativos de delivery tem elevado significativamente a frota de motocicletas nos grandes centros urbanos do Brasil. Esta pesquisa tem como objetivo realizar uma investigação das distâncias percorridas por motociclistas para a prestação de serviços na cidade de Fortaleza. A pesquisa teve caráter quantitativo, onde a coleta de dados compreendeu um levantamento utilizando um formulário online aplicado junto a 49 motociclistas que prestam serviços de entregas rápidas de materiais e/ou transporte individual de pessoas. As perguntas abordaram aspectos associados às condições de trabalho e distâncias percorridas por esses profissionais. Os resultados mostram que a maioria desses profissionais percorrem distâncias médias superiores a 50 km percorridas diariamente para realização dos serviços e distâncias médias superiores a 30 km para deslocamento desses profissionais de suas residências até o trabalho.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, o crescimento exponencial dos serviços de entrega rápida e transporte individual de pessoas realizados por motociclistas tem redefinido o panorama urbano em diversas cidades brasileiras. Este fenômeno reflete não apenas mudança nos hábitos de consumo e mobilidade, mas também apresenta desafios significativos em relação às condições laborais desses profissionais.

De acordo com Carvalho e Nogueira (2024) que analisaram dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD e da PNAD Contínua, no caso de motociclistas entregadores, notou-se que, além dos efeitos negativos sobre a renda, jornada e contribuição previdenciária, houve impacto negativo sobre a formalidade da ocupação. Segundo Romero *et al* (2023), situações de crise econômica fazem com que trabalhadores, em situações já precárias, sejam os mais afetados e recorram aos aplicativos como "opção" para garantirem algum sustento através de um mercado de trabalho caracterizado pela pouca escolarização e baixa remuneração.

Segundo Mello *et al*. (2022) e Agência IBGE (2023), apesar de motociclistas plataformizados terem uma jornada de trabalho superior, o rendimento habitual médio desses profissionais representa apenas 80,7% do rendimento médio dos motociclistas não plataformizados.

Além das questões de remuneração e jornada de trabalho, as plataformas causam uma assimetria de informação que contribui para que o trabalhador tenha uma autonomia limitada sobre o processo de trabalho que realiza, revelando a subordinação à qual o trabalhador está submetido.(Rebechi; Baptistella, 2022)

Diniz *et al* (2024) afirmam que a maioria dos trabalhadores, para conseguir remuneração justa, cumprem carga de trabalho entre 10 e 14 horas diárias, volume superior ao previsto nas relações de trabalho regidas pela CLT. Os autores afirmam que a gestão por meio de aplicativos beneficiam os trabalhadores que se sujeitam a longas cargas de trabalho.

Dado o crescimento significativo do número de trabalhadores atuando com a entrega de itens e/ou transporte individual de pessoas utilizando motocicletas, verificamos a necessidade de entender melhor as condições de trabalho desses profissionais a partir do estudo das distâncias médias percorridas diariamente por esses motociclistas. Desta forma, este trabalho tem por objetivo realizar uma investigação das distâncias percorridas por motociclistas para a prestação de serviços na cidade de Fortaleza.

A relevância deste trabalho está associada à obtenção de informações relevantes sobre as distâncias percorridas por motociclistas para o deslocamento de sua residência e trabalho e para a prestação efetiva dos serviços, de forma a contribuir para o melhor entendimento das condições práticas de trabalho desses profissionais. Adicionalmente, essas informações podem configurar como um ponto de partida relevante para futuras pesquisas que explorem temas como: segurança ocupacional, aspectos socioeconômicos e laborais

desses trabalhadores, bem como análise do impacto ao meio ambiente desses veículos nos grandes centros urbanos. Esses conhecimentos são importante insumo para apoiar a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas para melhorar as condições de trabalho desses profissionais e promover um ambiente urbano mais seguro e sustentável.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para a realização desse estudo foi proposto um método composto por 5 etapas, conforme detalhado a seguir.

A Etapa 1 compreendeu a definição do estudo e estruturação do problema a partir da necessidade identificada de aprofundar análises de caráter mais prático do trabalho dos profissionais motociclistas que realizam entrega rápida de materiais (*delivery*) e/ou transporte de pessoas na cidade de Fortaleza. Para fim de análise neste trabalho, foi utilizado o termo "serviço" para se referir simultaneamente a duas categorias distintas: entrega rápida de materiais e transporte de pessoas.

Na Etapa 2, foi realizado o planejamento da pesquisa que compreendeu: a) formulação de perguntas; b) definição de estratégias para acessar e orientar os motociclistas sobre o preenchimento do questionário e c) processamento e consolidação dos dados. A pesquisa teve caráter quantitativo, cujo delineamento metodológico adotado buscou facilitar o processamento dos dados e levantar informações objetivas e que estivessem associadas às distâncias percorridas durante a prestação de serviços pelos motociclistas. A escolha pelo uso de um questionário online e acessível pelo celular foi motivada pela necessidade de garantir maior alcance e flexibilidade aos respondentes, de forma a obter um maior número de respostas em um curto espaço de tempo.

Na Etapa 3 foi realizada a coleta de dados junto a motociclistas prestadores de serviços na cidade de Fortaleza, selecionados por conveniência, considerando sua disponibilidade para participação. O instrumento contemplou questões fechadas, de múltipla escolha e obrigatórias. A aplicação do questionário ocorreu de forma online através de uma plataforma digital de fácil acesso, entre os meses de maio e junho de 2025. O link para participação foi disseminado por meio de redes sociais e grupos específicos de motociclistas, em geral, ligados a associações locais de trabalhadores do setor.

Na Etapa 4, para o processamento dos dados foram utilizados os softwares Microsoft Excel® e QGIS, por meio do qual foram realizadas tabulações, cálculos estatísticos descritivos e de georeferenciamento.

Por fim, na Etapa 5, os resultados foram posteriormente organizados em gráficos e tabelas para facilitar a interpretação e discussão das variáveis consideradas, de forma a perseguir o objetivo do trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentamos os resultados da investigação sobre os aspectos importantes acerca dos serviços prestados e das distâncias percorridas por motociclistas prestadores de serviço na cidade de Fortaleza. Participaram da pesquisa 49 profissionais que prestam serviços com motocicleta na cidade de Fortaleza.

3.1. Análises dos serviços prestados

A Figura 1 apresenta os tipos de serviços realizados pelos respondentes.

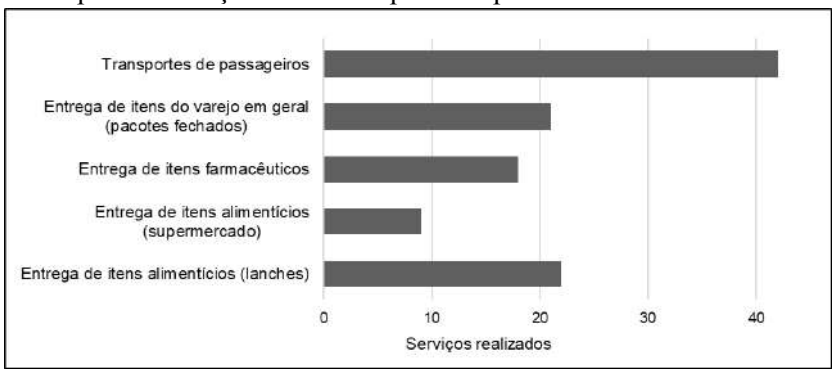


Figura 1: Tipos de serviços realizados

Podemos verificar uma predominância de serviços no transporte individual de passageiros e um equilíbrio entre as categorias que envolvem entrega de itens. Considerando as categorias apresentadas, podemos verificar ainda que os motociclistas realizam mais de um tipo de serviço.

A Figura 2 mostra a quantidade de serviços realizados pelos motociclistas em dias considerados de pico (Figura 2(a)) e em dias considerados com menor quantidade de entregas (Figura 2(b)).

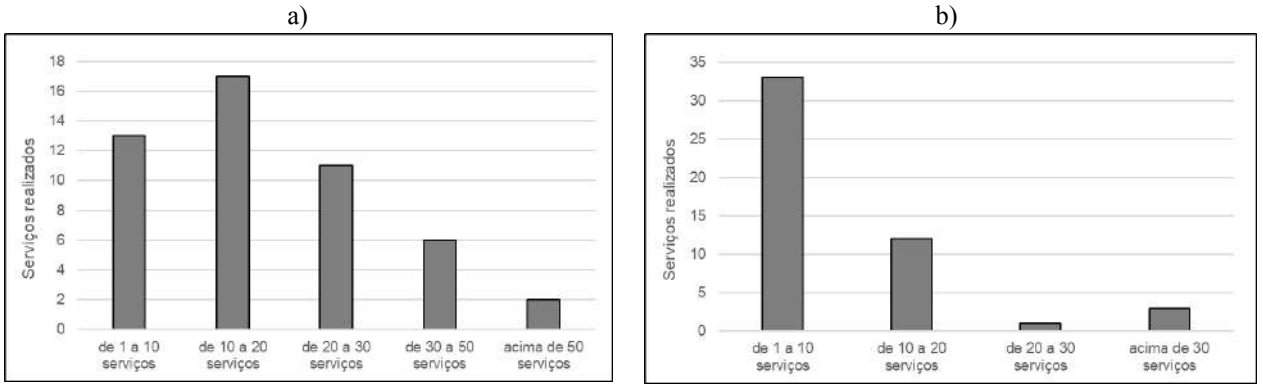


Figura 2: a) Serviços realizados em um dia considerado de pico e b) Serviços realizados em um dia considerado fraco

Nos dias considerados de pico, conforme descrito em Figura 2(a), pode-se verificar que 85,4% dos respondentes afirmam realizar até 30 serviços em um dia considerado de pico. Nos dias considerados fracos, conforme descrito em Figura 2(b), pode-se verificar que 67,3% dos respondentes afirmam que realizam até 20 serviços, no máximo.

Com relação à definição dos itinerários a serem percorridos durante a prestação dos serviços, a Figura 3 apresenta os resultados de acordo com as categorias consideradas na pesquisa. Podemos verificar que os aplicativos são utilizados para definição dos itinerários por 65% dos respondentes, sinalizando uma significativa dependência dos aplicativos no planejamento das viagens.

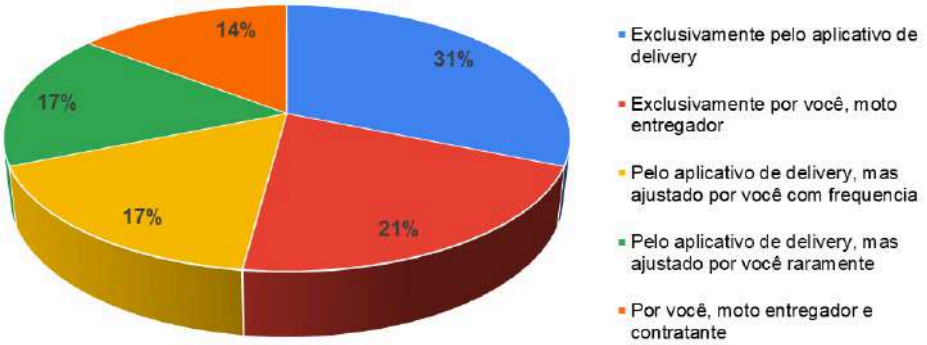


Figura 3: Definição dos itinerários das viagens durante a prestação de serviços

3.2. Distâncias percorridas

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos correspondentes às distâncias percorridas no deslocamento dos motociclistas de sua residência até o trabalho e distâncias percorridas para a realização efetiva dos serviços. Serão apresentados ainda mapas sinalizando os bairros onde os motociclistas residem e os bairros que realizam serviços.

A Figura 4 apresenta as distâncias médias percorridas por dia, em km, durante o trabalho de entrega e as distâncias entre sua residência e o local de trabalho.

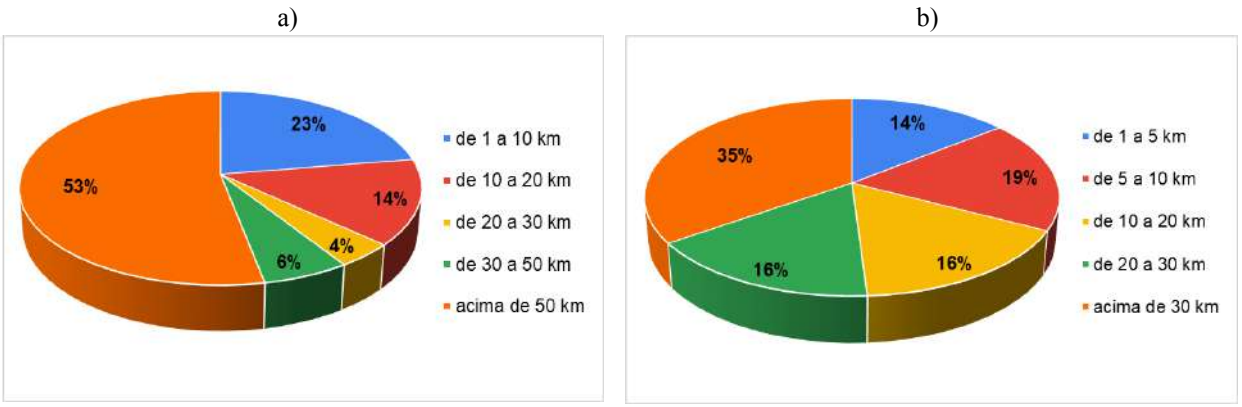


Figura 4: a) Distância média percorrida para realização dos serviços por dia de trabalho; e b) Distância entre a residência e o local de trabalho do motociclista, (ida e volta).

Podemos verificar na Figura 4(a) que 59% dos respondentes percorrem uma distância média diária acima de 30 km, enquanto 23% afirmam percorrer, em média, até 10 km em um dia de trabalho. Com relação ao gráfico da Figura 4(b), que descreve as distâncias entre a residência e o trabalho, 51% dos respondentes afirmam que percorrem distâncias superiores a 20 km, considerando a ida e a volta de casa para o trabalho.

A Figura 5 apresenta mapas de Fortaleza indicando os bairros onde os motociclistas residem e os bairros onde eles trabalham com maior frequência.

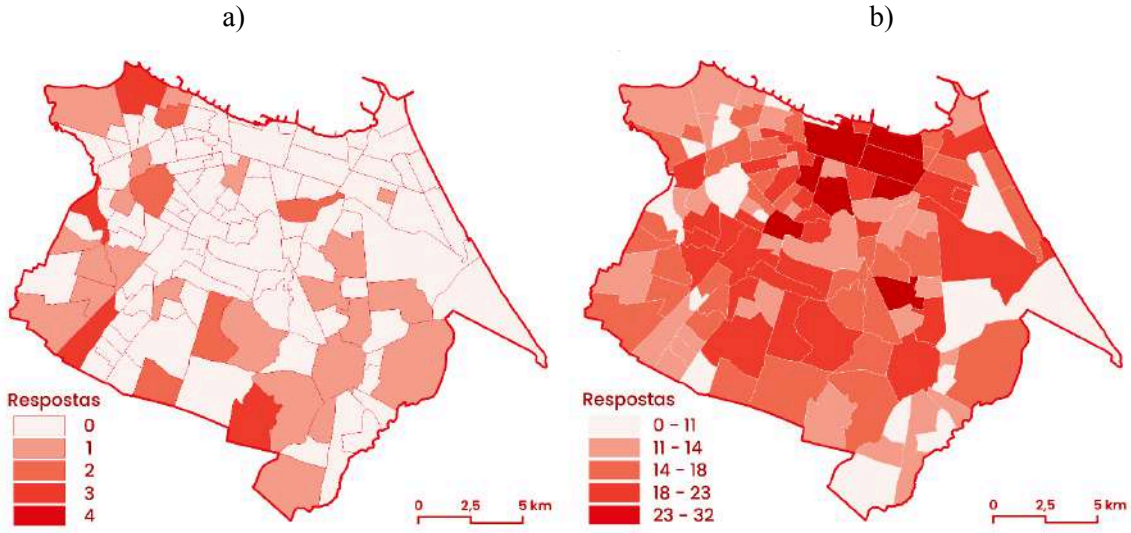


Figura 5: Mapas de Fortaleza sinalizando a) Bairros onde motociclistas residem e b) Bairros onde os motociclistas trabalham com maior frequência

Podemos verificar na Figura 5 uma concentração dos locais de trabalho nas regiões centrais de Fortaleza, enquanto que as residências estão predominantemente localizadas nas regiões mais periféricas da cidade, ratificando as distâncias elevadas a serem percorridas diariamente pelos motociclistas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos, apesar do serviços de entrega rápida de materias ser predominante, o transporte individual de pessoas é relevante por ser realizado por 87,8% dos respondentes, sinalizando que ambos os serviços são realizados conjuntamente e de forma complementar. Ressaltamos ainda que as distâncias percorridas durante o transporte individual de passageiros inviabilizam o planejamento dessas viagens, devido os pontos de origem e fim dos deslocamentos não serem variáveis controladas.

Foi verificado que os aplicativos de delivery são utilizados para a definição dos itinerários por 65% dos entrevistados, tornando o processo de definição dos itinerários dependente dos algorítmos das empresas

desenvolvedoras dos aplicativos. Desta forma, a definição dos itinerários negligencia, nesses casos, aspectos práticos e a percepção do motociclista que poderiam contribuir para o aumento da eficiência logística, o que inclui a diminuição das distâncias percorridas.

A diferença significativa do número de entregas entre os dias de trabalho considerados de pico e os dias considerados fracos, conforme os gráficos da Figura 2, permite concluir que as distâncias médias percorridas diariamente para a prestação de serviços sofrem variações significativas.

As distâncias elevadas apresentadas na Figura 4 estão coerentes com os resultados apresentados por Romero *et al* (2023) e evidenciam uma rotina de trabalho intensa que potencializa problemas associados à atividade laboral desses motociclistas, onde destacamos os riscos de acidentes e o impacto ambiental decorrente da emissão de gases poluentes emitidos pelas motocicletas. Com relação ao impacto ambiental, estudos como (Hassani; Hosseini, 2016), (Koossalapeerom *et al*., 2019) e (Pechout *et a*l., 2022) sinalizam preocupações significativas com relação à emissão de gases poluentes emitidos por motocicletas.

Considerando a grande quantidade de motocicletas utilizadas para a prestação de serviços no Brasil e as elevadas distâncias percorridas verificadas nessa pesquisa, sugerimos investigações futuras que busquem replicar a avaliação dessas distâncias percorridas por esses profissionais em outras grandes cidades do país, acrescentando informações com análises sobre o impacto ambiental desses veículos.

Agradecimentos
Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência IBGE (2023) Em 2022, 1,5 milhão de pessoas trabalharam por meio de aplicativos de serviços no país. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/ (acesso em 03/07/2025)

Carvalho, S.S. de; M.O. Nogueira . (2024) Plataformização e precarização do trabalho de motoristas e entregadores no Brasil. Boletim Mercado de Trabalho : conjuntura e análise : n. 77, v. 30, n. 77, p. 173–196.

Diniz D. M.; A. C. Neto; G. Costa. (2024) O trabalho uberizado de motoboys e bikeboys de aplicativos. Vol. 21 No. 1. Base.

Hassani, A.; V. Hosseini. (2016) An assessment of gasoline motorcycle emissions performance and understanding their contribution to Tehran air pollution. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 47, p. 1–12.

Koossalapeerom, T. et al. (2019) Comparative study of real-world driving cycles, energy consumption, and CO2 emissions of electric and gasoline motorcycles driving in a congested urban corridor. Sustainable Cities and Society, v. 45, p. 619–627.

Mello, C. A. de et al. (2022) Análise da taxa de entrega de aplicativos de entrega instantânea e a remuneração dos entregadores em cidades brasileiras. TRANSPORTES, v. 30, n. 2, p. 2641–2641.

Pechout, M. et al. (2022) Regulated and unregulated emissions and exhaust flow measurement of four in-use high performance motorcycles. Atmospheric Environment: X, v. 14, p. 100170.

Rebechi, C. N.; C. V. Baptistella. (2022) O trabalho mediado por plataformas digitais e assimetrias nas relações de comunicação. Revista Katálysis, v. 25, p. 83–92.

Romero, L.; C. S. Ricarte; C.A.B. de Aquino. (2023) Perfil dos entregadores por aplicativo na região metropolitana de Fortaleza (CE). Sociedade em Debate, v. 29, n. 3, p. 244–261.

Alysson Andrade Amorim (alysson.amorim@det.ufc.br)
Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@det.ufc.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
R. Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza, CE, Brasil.

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CONTEXTO OPERACIONAL NA AUTONOMIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS À BATERIA UTILIZANDO MODELOS HIERÁRQUICOS LINEARES (HLM2)

Alexandre Duarte[1], **Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki**[1]
[1]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo avalia o magnitude do impacto do contexto operacional na autonomia e no desempenho de veículos elétricos à bateria (BEVs) em operações urbanas de entrega utilizando modelos hierárquicos. Foram coletados dados de operações com BEVs em diferentes cidades brasileiras, gerando uma amostra que inclui rotas realizadas em variados perfis de tráfego, topografia, adensamento urbano, temperatura e distribuição geoespacial dos clientes. Os dados coletados, que incluem observações de GPS e relatórios do sistema de telemetria, possuem uma estrutura multinível que permite a utilização de modelos hierárquicos lineares. Os resultados obtidos indicam que o contexto operacional, representado pelo nível hierárquico da cidade, possui um efeito estatisticamente significante nos parâmetros de consumo (coeficientes do modelo). Os BEVs apresentam um desempenho consideravelmente diferente a depender do local em que são utilizados, o que ressalta a necessidade de um planejamento operacional personalizado para melhor utilização desses veículos.

1. INTRODUÇÃO

Os maiores empecilhos culturais e operacionais à difusão de BEVs em operações logísticas urbanas envolvem a relutância em adotar uma nova tecnologia, por falta de conhecimento e previsibilidade, e a ansiedade gerada pela autonomia limitada e falta de uma ampla rede de infraestrutura de carregamento (Rajper e Albrecht, 2020; Pamidimukkala *et al*., 2024). O conhecimento do mercado sobre o desempenho de BEVs em diferentes contextos operacionais, segundo Rajper e Albrecht (2020), é limitado, sendo essencial que os setores público e privado se mantenham informados sobre o estado da arte envolvendo BEVs, equipando-se de ferramentas para analisar a viabilidade e a competitividade desses veículos em cenários variados (Moll *et al*., 2020).

Isso é particularmente importante no contexto brasileiro; o desenvolvimento de pesquisas e a disseminação de boas práticas para operações com BEVs pode contribuir para uma maior difusão dessa tecnologia (Castro *et al*., 2021), que favorece uma redução nas emissões de gases do efeito estufa por parte do setor de transportes (Pamidimukkala *et al.*, 2024). Nesse sentido, os modelos de energia para BEVs, de acordo com Kucukoglu *et al*. (2021), permitem uma maior compreensão da performance desses veículos em diferentes cenários operacionais. Logo, pesquisas com aplicações desses modelos representam um importante avanço téorico e prático para essa área de conhecimento (Castro *et al.*, 2021), fornecendo análises ineditas para o contexto brasileiro e fomentando a expansão de operações logísticas sustentáveis em diferentes cidades.

Nesse contexto, este estudo utiliza dados reais de operações com BEVs em 5 cidades brasileiras para calibração de modelos de energia e modelos de *machine learning*. A abordagem proposta, além de fornecer uma metodologia prática para estimar o consumo energético, representa um avanço para o entendimento de como o contexto operacional impacta na autonomia desses veículos e na viabilidade da operação em diferentes cenários. O artigo foi estruturado da seguinte forma: após a introdução, discute-se o processo de coleta e preparação dos dados. Em seguida, descreve-se a metodologia utilizada para modelagem do consumo energético e o modelo de *machine learning* escolhido para compor a abordagem híbrida proposta – modelo hierárquico linear de dois níveis (HLM2). Finalmente, os resultados e as conclusões são apresentados.

2. METODOLOGIA

2.1. Coleta e preparação dos dados

Foram coletados dados de GPS e de telemetria de operações com BEVs por 2 anos (jan/2023 a dez/2024) em 5 cidades brasileiras: São Paulo, Belo Horizonte, Joinville, Suzano e Rio de Janeiro (Jacarepaguá e São Cristóvão). Os dados foram tratados para eliminar *outliers* relacionados a falhas no sistema de GPS e de telemetria dos veículos: inconsistências no registro de distâncias, perda de informação e ausência de registro de consumo de bateria. Também foram coletados, para as mesmas rotas, dados de entregas, com informações de ponto de entrega (latitude e longitude), horário e *drop size*. As informações de entrega foram adicionadas à base de dados de GPS e de consumo energético, mantendo-se apenas as observações com roteiros completos e com consistência entre horário e localização geoespacial do veículo nas duas bases de dados.

Ao final, obteve-se uma amostra com 2448 rotas de entrega com BEVs: 171 em São Paulo, 287 em Belo Horizonte, 423 em Joinville, 434 em Suzano, 358 em Jacarepaguá e 775 em São Cristóvão. Cada cidade possui uma frota de BEVs com tamanho e frequência de utilização diferentes. A partir dessa base de dados, obteve-se informações de distância percorrida e consumo de bateria em três trechos: a ida do centro de distribuição (CD) até a região de entrega; na região de entrega; a volta da região de entrega até o CD. A frota de veículos é homogênea e possuem cargas equivalentes; todos são do mesmo modelo e ano de fabricação, com a mesma vida útil de bateria. As análises preliminares e a visualização dos dados coletados (distribuição geoespacial das entregas, perfil topográfico típico e características operacionais) serão apresentados na seção de resultados.

2.2. Modelagem do consumo energético

De acordo com Chen *et al*. (2021) e Dabčević *et al.* (2024), os métodos para modelagem do consumo energético de BEVs podem ser categorizados em: elementares, físicos, baseados em dados e híbridos. Os modelos elementares exploram a relação entre energia consumida e distância percorrida, utilizando esse coeficiente para estimar o consumo em novos deslocamentos. A estimação, por ser baseada em dados a nível rota, é incapaz de considerar interações a nível trecho que podem impactar significativamente o consumo (Chen *et al*., 2021). Os modelos físicos, por sua vez, se baseiam nas leis de dinâmica para estimar a potência necessária para o deslocamento (Fiori *et al*., 2021). Todavia, esses modelos dependem de dados com uma alta granularidade e assumem premissas com alta incerteza (e.g., aceleração, velocidade e tempo de deslocamento), o que limita a sua precisão em cenários reais (Maity e Sarkar, 2024). Os modelos baseados em dados, por sua vez, utilizam variáveis independentes (e.g., velocidade média, quantidade de paradas, tempo) para prever o consumo utilizando modelos de aprendizado de máquina (Dabčević *et al.*, 2024). Porém, esses modelos tendem a ser calibrados para um contexto específico, reduzindo sua capacidade de extrapolação (Fiori *et al*., 2021).

Nesse sentido, os modelos híbridos buscam combinar as múltiplas metodologias de modelagem, permitindo mitigar as desvantagens de cada tipo de modelo, reduzindo os erros na estimação. Para isso, neste trabalho, optou-se por utilizar um modelo híbrido que combina a abordagem elementar com recursos de *machine learning* (ML), permitindo uma melhor generelização dos resultados. Além disso, para contornar a limitação do modelo elementar, que não considera variabilidades no consumo a nível trecho, fez-se a divisão de cada rota coletada (vide seção 2.1) em 3 trechos significativos (Duarte, 2025): do CD até a região de entrega; na região de entrega; da região de entrega de volta ao CD. Desse modo, a energia estimada a nível rota é feita por meio de três modelos híbridos. O modelo de ML utilizado na abordagem proposta é descrito na seção 2.3.

2.3. Modelo Hierárquico Linear de dois níveis (HLM2)

De acordo com Fávero e Belfiore (2017), os modelos hierárquicos, ao contrário dos modelos tradicionais de regressão, permitem que seja levado em consideração o aninhamento natural dos dados (i.e., que sejam identificadas e analisadas as heterogeneidades individuais e entre grupos a que pertencem estes indivíduos, tornando possível a especificação de componentes aleatórios em cada nível da análise). Os dados coletados, conforme descrito na seção 2.1, seguem uma estrutura hierárquica, visto que as rotas estão agrupadas em cidades. Portanto, é possível definir um componente aleatório no nível rota e outro no nível cidade, permitindo considerar de forma heterogênea o efeito da localidade sobre o padrão de consumo dos BEVs.

Dessa forma, neste trabalho, utiliza-se modelos hierárquicos lineares com interceptos e inclinações aleatórios, estimado por máxima verossimilhança restrita. Foi utilizado o pacote *statsmodels* (v. 0.14.4) na linguagem *Python*, por meio da função *MixedLM*. A variável preditora (X) é a distância percorrida, e a variável dependente (y) é o consumo energético. A nível de observação individual, y_{ij} é o consumo energético e X_{ij} é a distância percorrida, para uma rota i na cidade j. O modelo HLM2 proposto segue a equação (1):

$$y_{ij} = \gamma_{00} + \nu_{0j} + \gamma_{10}.X_{ij} + \nu_{1j}.X_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

O termo γ_{00} representa o valor esperado da variável dependente para determinada observação i pertencente à cidade j quando $X = 0$ (i.e., intercepto geral); ν_{0j} representa os termos de erro que indicam a existência de aleatoriedade nos interceptos e que pode ser gerada pela presença de observações provenientes de cidades distintas na base de dados; γ_{10} representa a alteração no valor esperado da variável dependente para

determinada observação i pertencente à cidade j quando houver uma alteração unitária na característica X do indivíduo i, *ceteris paribus* (i.e., a mudança na inclinação em razão de X); v_{1j} representa os termos de erro que indicam a existência de aleatoriedade nas inclinações dos modelos referentes às cidades. Finalmente, ϵ_{ij} é o termo de erro específico da observação i pertencente à cidade j.

3. RESULTADOS

A partir dos dados coletados fez-se uma análise preliminar das condições operacionais e do perfil de consumo em cada centro urbano. A Figura 1 mostra a distribuição geoespacial dos clientes, bem como o perfil altimétrico entre o CD (marcação vermelha) e o centroide da zona de entrega. Já a Figura 2 mostra, para cada cidade, um gráfico de dispersão com a distância percorrida (eixo x) e o percentual de bateria na volta ao CD (eixo y).

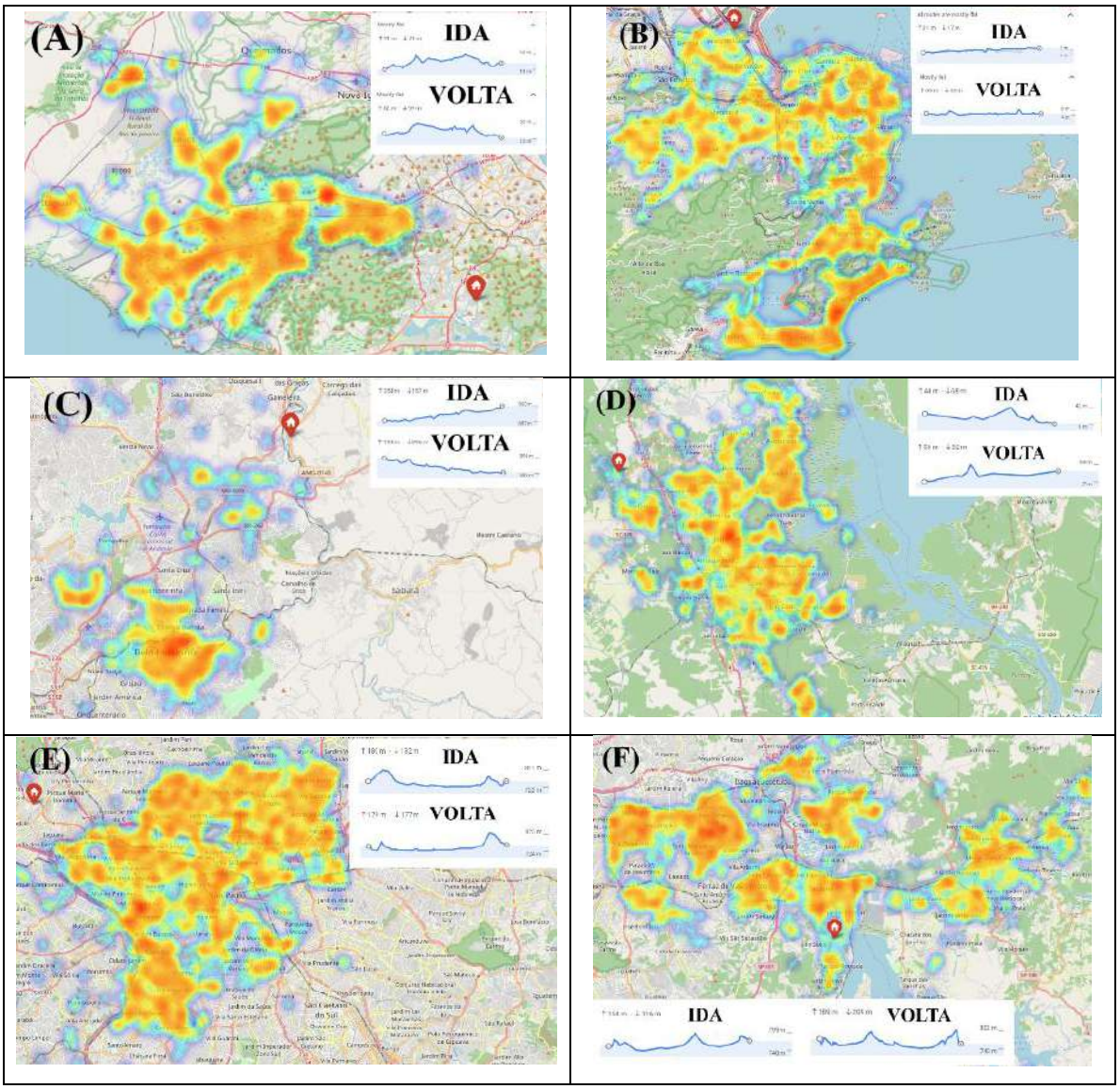


Figura 1: Distribuição geoespacial dos pontos de entrega e perfil altimétrico no percurso de ida e volta.

A Tabela 1 apresenta um resumo das características levantadas: cidade/região (Centro – C, Zona Sul – ZS, Zona Norte – ZN, Zona Oeste – ZO, Zona Leste – ZL), módulo da variação altimétrica no percurso de ida/volta até a região de entrega (em metros), perfil altimétrico na ida *versus* na volta (misto, predominantemente aclive ou declive, plano), temperatura máxima média da cidade no verão e no inverno (INMET, 2022), quantidade média de entregas por rota (unidades) e distância média percorrida na região de entregas (tráfego mais intenso).

Tabela 1: Comparação entre as operações com BEVs – tabela resumo.

Figura	Cidade/Região	|Δ| altimetria	Ida e Volta	Temperatura	# Entregas	km – zona de entrega
1A	Jacarepaguá /RJ – ZO	100m	Aclive | Declive	32º | 27º	14,5	17,7 km
1B	São Cristóvão / RJ – C/ZS/ZN	25m	Plano | Plano	34º | 26º	13,6	11,1 km
1C	Belo Horizonte / C	375m	Aclive| Declive	29º | 25º	9,5	7,6 km
1D	Joinville / C	60m	Misto | Misto	29º | 21º	13,5	25,8 km
1E	São Paulo / C/ZO/ZN	160m	Misto | Misto	28º | 22º	9,6	17,6 km
1F	Suzano / ZL	150m	Misto | Misto	28º | 22º	19,5	19,4 km

A Figura 2 destaca o reflexo das diferenças apresentada para cada cidade no padrão de consumo dos BEVs em função da distância percorrida. No Rio de Janeiro (Figuras 2A e 2B) as rotas são mais curtas; porém, na ZO, os BEVs retornam para o CD com bem menos bateria restante do que os BEVs que operam na ZS, C e ZN. Em Belo Horizonte (Figura 2C) as rotas são majoritariamente mais longas, e o consumo energético é mais acentuado. Em Joinville (Figura 2D) as distâncias e os consumos são bem distribuídos. Finalmente, em São Paulo (Figuras 2E e 2F), as rotas tendem a ter uma distância intermediária, com um consumo semelhante para as diferentes zonas da cidade. A análise exploratória, portanto, permite constatar que os contextos operacionais de cada cidade são amplamente diferentes, o que fornece um indício de que as observações sofrem influência estatisticamente significante da cidade, tornando o modelo multinível mais adequado nessa situação.

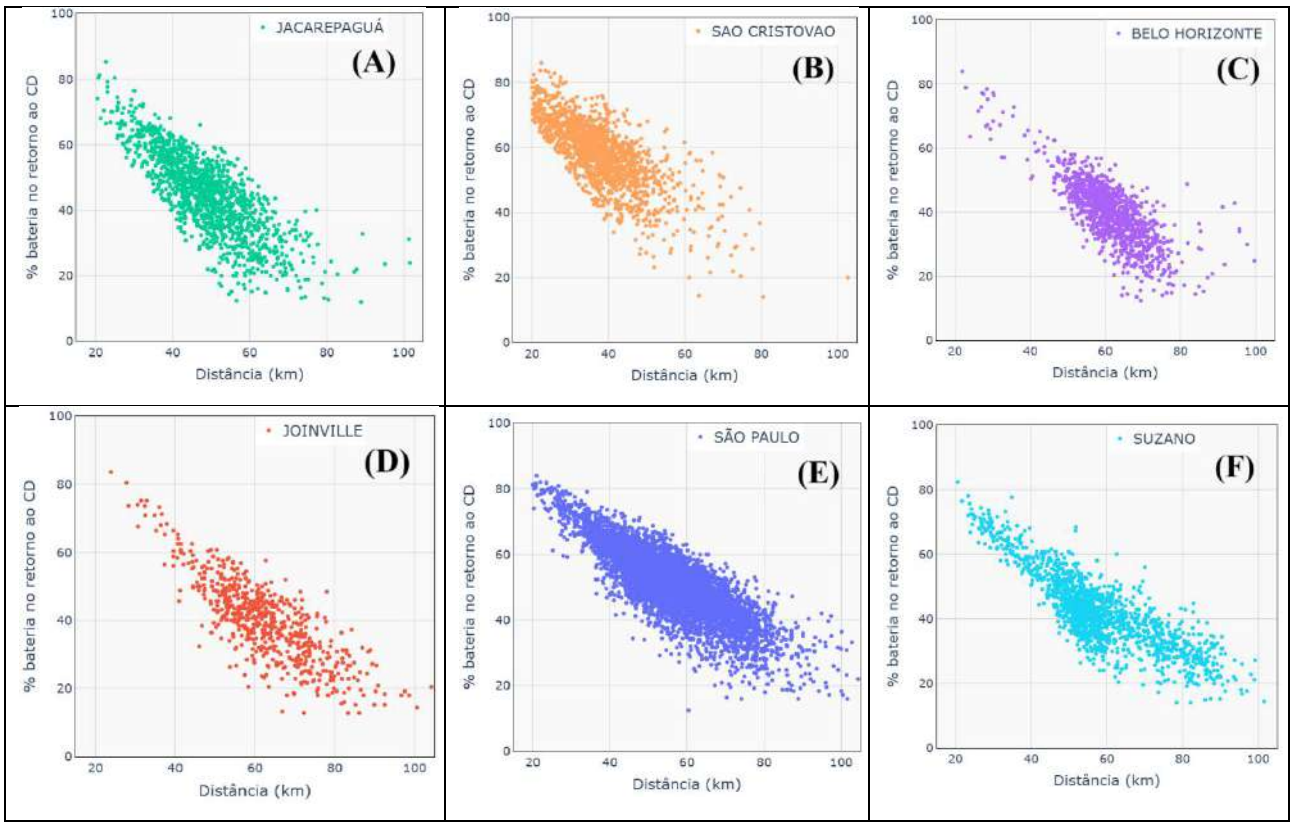


Figura 2: Gráficos de dispersão – distância percorrida (km) *versus* percentual remanescente de bateria ao final da rota.

A Tabela 2 apresenta os resultados do modelo HLM2. Os coeficientes fixos se referem à média das cidades: γ_{00} é o consumo energético base e γ_{10} indica o consumo energético (kWh) a cada 1 km percorrido. Os coeficientes aleatórios, por sua vez, capturam como as cidades variam entre si; v_{0j} é o desvio aleatório do intercepto para a cidade j (indica que as cidades possuem diferenças em seus valores-base de consumo); v_{1j} é o desvio aleatório da inclinação por cidade j (indica que o consumo, em kwh/km, varia entre as cidades). Cada valor de intercepto aleatório (v_{1j}) está em verde ou vermelho – desvio positivo ou negativo com relação ao valor médio (γ_{10}) – o que indica uma performance acima ou abaixo da média para determinado contexto operacional. A Figura 3, por sua vez, mostra a representação gráfica da equação (1) – seção 2.3 – para os

trechos 1 (Figura 3A) e 3 (Figura 3B), utilizando os coeficientes obtidos pelo modelo HLM2 (Tabela 2).

Tabela 2: Resumo dos resultados do modelo HLM2.

			Coeficientes aleatórios											
Trecho	**Coef. fixos**		**Jacarepaguá (RJ – ZO)**		**São Cristóvão (RJ – C/ZS/ZN)**		**Belo Horizonte**		**Joinville**		**São Paulo (SP – ZS/C/ZN)**		**Suzano (SP – ZL)**	
	γ_{00}	γ_{10}	ν_{0j}	ν_{1j}	ν_{0j}	ν_{1j}	ν_{0j}	ν_{1j}	ν_{0j}	ν_{1j}	ν_{0j}	ν_{1j}	ν_{0j}	ν_{1j}
1	2.10	**0.90**	0.79	+0.05	-0.18	+0.07	0.49	+0.23	-1.52	-0.04	-0.88	-0.16	1.29	-0.14
2	3.40	**1.03**	1.71	+0.09	-0.13	+0.02	-1.75	+0.08	-0.88	-0.05	-1.12	-0.05	2.16	-0.11
3	0.31	**0.80**	1.07	+0.11	1.45	+0.02	-5.64	+0.09	0.29	+0.03	1.76	-0.21	1.07	-0.03

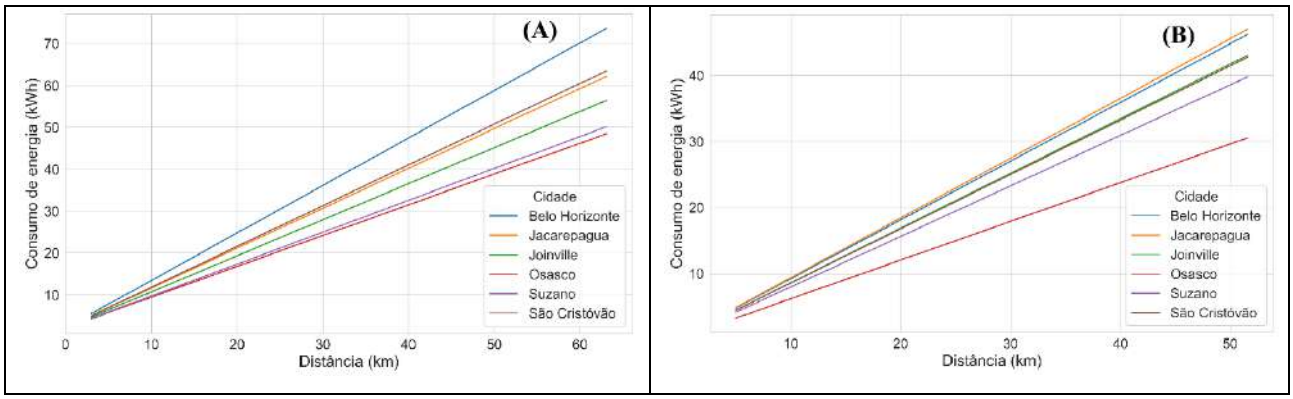


Figura 3: Equações do modelo HLM2 – trechos 1 e 3.

A Tabela 2 permite concluir que o parâmetro de consumo dos BEVs (kWh/km) varia substancialmente, dependendo da cidade. Para o trecho 1, por exemplo, o coeficiente fixo é 0.903 kWh/km. Em comparação, São Paulo (SP – ZS/C/ZN) possui um coeficiente de consumo de 0.74 kWh/km, 17,8% menor do que a média; Belo Horizonte, por outro lado, apresenta 1.13 kWh/km, 25,6% acima da média. Já para o trecho 3, o coeficiente fixo é 0.800 kWh/km. São Paulo (SP – ZS/C/ZN) possui um coeficiente de consumo de 0.59 kWh/km, 26,3% abaixo da média; Rio de Janeiro (RJ – ZO), por outro lado, apresenta 0.91 kWh/km, 13,8% acima da média. Análises análogas podem ser conduzidas para o trecho 2 e para as demais cidades.

A Figura 3, por sua vez, mostra as retas de regressão obtidas pelo modelo HLM2. O intercepto e os coeficientes angulares são estatisticamente diferentes para todas as cidades, o que permite constatar que um modelo de regressão simples (OLS), com uma única reta para representar todas as cidades, apresentaria um ajuste consideravelmente inferior, tendo em vista que as observações variam substancialmente a nível cidade. Esse ganho de performance pode ser aferido pela comparação do *Log-Likelihood* (LL) e dos critérios de informação (AIC/BIC) entre o modelo HLM2 e o modelo OLS (Fávero e Belfiore, 2017), vide Tabela 3. Nota-se que, especialmente para os trechos 1 e 3, o modelo HLM2 possui um ajuste consideravelmente superior aos dados, haja vista que o LL (verossimilhança) é maior e o AIC/BIC (equilíbrio entre ajuste e complexidade) é menor.

Tabela 3: Comparação de LL e AIC/BIC entre o modelo HLM2 e o modelo OLS.

Trecho	**HLM2**			**OLS**		
	LL	**AIC**	**BIC**	**LL**	**AIC**	**BIC**
1	-5519.2	11048.3	11077.3	-6497.5	12999.0	13010.6
2	-6777.4	13564.9	13593.9	-6957.2	13918.4	13930.0
3	-5645.9	11301.9	11330.9	-6101.6	12207.2	12218.8

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto um modelo hierárquico linear de dois níveis com interceptos e inclinações aleatórias para avaliar a performance de BEVs em diferentes contextos operacionais. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 2, estão em consonância com o diagnóstico preliminar (vide Figura 1 e Tabela 1).

A análise inicial indicou que Belo Horizonte apresenta perfil topográfico acentuado, altas temperaturas médias e predominância de deslocamentos nos trechos 1 (veículo cheio) e 3 (veículo vazio). O modelo HLM2 reflete essas condições, com consumo estimado 25,6% acima da média no trecho 1 e 11,3% no trecho 3. No Rio de Janeiro, a operação divide-se entre Jacarepaguá (ZO), com relevo moderado, altas temperaturas e elevado número de entregas em regiões de tráfego intenso, e São Cristóvão (ZN/ZS/C), com relevo plano e menor deslocamento em zona de entregas. Ambas registram consumo acima da média, com desempenho inferior na ZO, coerente com suas condições mais adversas. São Paulo, Suzano e Joinville apresentam clima mais ameno e relevo equilibrado. São Paulo (ZS/ZN/C) tem o menor volume de entregas e exibe o melhor desempenho: 17,8% mais eficiente no trecho 1 e 26,3% no trecho 3. Joinville, apesar do alto número de entregas e deslocamentos, apresenta consumo acima da média no trecho 1 (4,4%) e abaixo da média no trecho 3 (3,8%).

Os resultados obtidos confirmam que o contexto operacional possui impacto estatisticamente significante no desempenho de BEVs. A metodologia híbrida proposta utiliza o parâmetro elementar de consumo (kWh/km) como métrica no modelo de ML adotado (HLM2), permitindo quantificar o impacto no desempenho a depender da cidade e das características em que a operação se situa. Os resultados são limitados pelos dados coletados e níveis do modelo hierárquico. Logo, para trabalhos futuros, convém: expandir a amostra, diversificando os contextos operacionais; explorar modelos hierárquicos com 3 níveis, considerando-se mais uma escala de agregação; explorar a aplicação da metodologia proposta em contextos preditivos.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e do CNPq processo 311232/2022-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro, F. D., Cutaia, L., & Vaccari, M. (2021). End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030. *Resources, Conservation and Recycl*ing, 169, 105522. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105522.

Chen, Y., Wu, G., Sun, R., Dubey, A., Laszka, A., & Pugliese, P. (2021). A review and outlook of energy consumption estimation models for electric vehicles. *International Journal of Sustainable Transportation Energy Environment Policy*, 79-96. DOI: 10.4271/13-02-01-0005.

Dabčević, Z., Škugor, B., Cvok, I., & Deur, J. (2024). A Trip-Based Data-Driven Model for Predicting Battery Energy Consumption of Electric City Buses. Energies, 17(4), 911. DOI: 10.3390/en17040911.

Duarte, A. (2025) *Estimativa de consumo de energia no roteamento de veículos elétricos de última milha com modelagem multifatorial*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. DOI: 10.11606/D.3.2025.tde-21072025-074322.

Fávero, L. P., & Belfiore, P. (2017). Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata® (1ª. ed.). Rio de Janeiro: Elsevier Brasil.

Fiori, C., Montanino, M., Nielsen, S., Seredynski, M., & Viti, F. (2021). Microscopic energy consumption modelling of electric buses: model development, calibration, and validation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102978. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102978.

Kucukoglu, I., Dewil, R., & Cattrysse, D. (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107650. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107650.

Maity, A., & Sarkar, S. (2024). Data-driven probabilistic energy consumption estimation for battery electric vehicles with model uncertainty. International Journal of Green Energy, 21(9), 1986-2003. DOI: 10.1080/15435075.2023.2276174.

Moll, C., Plötz, P., Hadwich, K., & Wietschel, M. (2020). Are battery-electric trucks for 24-hour delivery the future of city logistics? — A German case study. *World electric vehicle journal*, *11*(1), 16. DOI: 10.3390/wevj11010016.

Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020, Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Organizadores: Marcia dos Santos Seabra e Edmundo Wallace Monteiro Lucas. INMET, Brasília/DF, Brasil, 2022.

Pamidimukkala, A., Kermanshachi, S., Rosenberger, J. M., & Hladik, G. (2024). Barriers and motivators to the adoption of electric vehicles: a global review. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 100153. DOI: 10.1016/j.geits.2024.100153.

Rajper, S. Z., & Albrecht, J. (2020). Prospects of electric vehicles in the developing countries: A literature review. *Sustainability*, 12(5), 1906. DOI: 10.3390/su12051906.

Alexandre Duarte (alexandre.duarte@usp.br), *Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki* (hugo@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380, Butantã, São Paulo, SP, Brasil

EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA ACESSIBILIDADE A ARMAZÉNS LOGÍSTICOS EM FORTALEZA

Bruno Reges Almeida de Brito, Bruno Vieira Bertoncini
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
Este estudo analisa a evolução da acessibilidade aos armazéns logísticos na cidade de Fortaleza entre 1970 e 2020, utilizando uma medida de oportunidades cumulativas passivas. A pesquisa investiga como se evolui a acessibilidade a armazéns e a distribuição espacial das localizações ao longo do período analisado. Utilizando dados de localização de armazéns e rede viária em diferentes períodos, foi gerado o valor de acessibilidade com a quantidade de armazéns que conseguem servir cada células hexagonais da cidade. Os resultados revelam um deslocamento progressivo da acessibilidade do centro para áreas periféricas, especialmente ao longo da BR-116, influenciado por fatores regulatórios e pela busca por terrenos mais acessíveis. O estudo destaca o papel das políticas urbanas na configuração da logística urbana e propõe uma abordagem metodológica replicável para apoiar o planejamento urbano e logístico integrado.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas logísticos têm papel essencial na vida urbana, cuja relevância tem aumentado diante das transformações nos padrões de consumo, impulsionadas pelo crescimento do comércio eletrônico e das entregas domiciliares instantâneas (Xiao et al., 2021; Holguin-Veras et al., 2016). Tais dinâmicas têm reestruturado as cadeias logísticas, com consequente reorganização das instalações e de suas localizações no espaço urbano, de modo a atender melhor às necessidades dos consumidores (Hesse e Rodrigue, 2004; Holguin-Veras et al., 2016).

Nesse contexto, a localização dos armazéns assume relevância, uma vez que essas instalações representam pontos-chave de origem e destino de cargas nas cidades (Aljohani e Thompson, 2020). Considerar a proximidade dos destinos de entrega é fundamental para maximizar a eficiência das operações e reduzir custos, algo que se torna crucial no contexto do comércio eletrônico (Buldeo Rai et al., 2022), contrapondo-se à tendência de distanciamento observada nas últimas décadas (Dablanc e Rakotonarivo, 2010). Paralelamente, ganham destaque iniciativas de planejamento urbano voltadas à proximidade, como as cidades de 15 minutos e o cronourbanismo, que propõem suprir necessidades cotidianas com deslocamentos de até 15 minutos a pé ou de bicicleta (Moreno et al., 2021; Allam et al., 2022).

A articulação entre origens e destinos nos fluxos urbanos, especialmente no Transporte Urbano de Cargas (TUC), permite reduzir distâncias e tempos de entrega. Colaborando para a diminuição dos custos logísticos da última milha, etapa mais onerosa e ineficiente do TUC (Houde et al., 2018), e contribuindo na mitigação das externalidades negativas como emissão de poluentes e congestionamento (Dablanc e Ross, 2012; Wygonik et al., 2014). No entanto, a localização de armazéns em áreas densas e acessíveis enfrenta obstáculos legais e normativos, que frequentemente restringem ou inviabilizam sua instalação em zonas centrais (Xiao et al., 2021; Dablanc, 2018; Holguin-Veras et al., 2021).

A acessibilidade no TUC está fortemente vinculada às características urbanas gerais e às decisões de planejamento, que estruturam o espaço urbano e interagem com fatores sociais e econômicos. Contudo, há escassez de estudos sobre acessibilidade aplicada à logística urbana (Van Wee, 2016; Gonzalez-Feliu et al., 2018). Segundo Pinheiro et al. (2025), há necessidade de desenvolver análises de acessibilidade voltadas à formulação de políticas públicas para localização de instalações logísticas. Não se identificam, até o momento, estudos que relacionem a evolução da acessibilidade com o histórico de políticas de uso logístico do solo.

Grande parte das análises sobre expansão logística, fenômeno de distanciamento dos armazéns logísticos para áreas periurbanas (Dablanc e Rakotonarivo, 2010), emprega medidas centrográficas para quantificá-la, desconsiderando o tempo como variável de acessibilidade. Woudsma et al. (2008) são exceção, ao empregar modelagem espacial auto regressiva para avaliar a relação entre eficiência do transporte e localização logística. O objetivo deste trabalho é caracterizar as mudanças nas localizações de armazéns logísticos e seu reflexo na acessibilidade ao frete urbano com base em medidas de oportunidades cumulativas passivas. Para isso, analisou-se a localização de armazéns em Fortaleza entre 1970 e 2020, considerando a trajetória de sua

localização no território municipal. A segunda seção apresenta os materiais e métodos utilizados, seguido dos resultados e considerações finais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo investiga o uso de medidas de acessibilidade para compreender os efeitos das mudanças na localização de armazéns nas entregas urbanas. O método proposto estima, por meio de uma medida de acessibilidade, a quantidade de armazéns capazes de realizar uma entrega em determinado ponto em até 15 minutos (acessibilidade cumulativa passiva). Essa abordagem permite analisar a expansão logística com base nas localizações dos armazéns, identificando áreas atendidas por um maior número de instalações em menor tempo. Para avaliar a evolução desse fenômeno, foram gerados dados para seis décadas, entre 1970 e 2020, com um ano-base por década.

2.1 Dados

Os dados referem-se à localização dos armazéns e à rede viária urbana. Para analisar a localização, utilizou-se o banco de dados da Receita Federal (BRF, 2024), que reúne todas as empresas em funcionamento em Fortaleza no período estudado. O processamento seguiu três etapas: (1) seleção de registros por CNAE, isolando atividades de armazenagem; (2) filtragem por período, considerando empresas ativas em cada ano-base; e (3) geolocalização dos armazéns com base nos endereços. Esse procedimento possibilitou identificar o tipo de empresa em funcionamento em cada período. Para a malha viária, utilizaram-se os aerolevantamentos fotogramétricos da Prefeitura de Fortaleza (Fortaleza, 2024), referentes aos anos de 1963, 1972, 1992, 2010 e 2016. Esses mapas serviram de referência para editar a rede atual do OpenStreetMap no software QGIS, considerando as definições do sistema viário presentes nos planos diretores vigentes. Foram tratados nós, velocidades regulamentares e tipologias das vias, visando uma representação próxima à realidade de cada ano-base.

As informações foram agregadas em uma grade hexagonal com células de 0,88 km², diagonal curta de 1.000 metros e aresta de 530 metros. Essa divisão reduz o Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP), minimizando imprecisões nos resultados (Pinheiro, Gonzalez-Feliu e Bertoncini, 2025; Birch et al., 2007; Pereira et al., 2019). A grade atende a três requisitos: (a) alta reprodutibilidade, por ser baseada em índice espacial amplamente utilizado em transporte e replicável (UBER, 2018); (b) adaptação ao crescimento urbano; e (c) equivalência com outras unidades espaciais, correspondendo à mediana das zonas de tráfego e à metade da mediana dos bairros.

2.2 Análises de acessibilidade

O indicador de acessibilidade foi calculado a partir de uma medida de oportunidades cumulativas passiva, utilizando os dados descritos e o pacote computacional r5r, ferramenta de roteamento em R de código aberto (Pereira et al., 2021). Amplamente usada na mobilidade de pessoas, esta técnica foi adaptada para avaliar a acessibilidade a armazéns no território urbano. Foram geradas matrizes de tempo de viagem entre todas as células da grade, usando os centróides como pontos de origem e destino. Os tempos foram calculados considerando o caminho mais rápido entre cada par de pontos. A medida de oportunidades cumulativas passiva, definida como a facilidade de ser alcançado por usuários em potencial (Cascetta, Cartenì e Montanino, 2013), quantifica o número de armazéns que podem atender um hexágono dentro do limite de 15 minutos.

Essa medida identifica regiões com maior acesso a armazéns, favorecendo a distribuição de mercadorias com mais opções de atendimento. Áreas com alta acessibilidade tendem a receber entregas mais rápidas e econômicas, pois contam com maior disponibilidade de instalações próximas. Regiões com concentração de estabelecimentos varejistas e atacadistas devem apresentar boa acessibilidade a armazéns, otimizando a logística de distribuição e reduzindo custos operacionais (Bowen, 2008).

3. RESULTADOS

No contexto do TUC, além da proximidade temporal, a densidade de instalações no entorno também é fator determinante. Receptores de carga, como estabelecimentos varejistas, situados em regiões com alta acessibilidade, contam com maior diversidade de armazéns para atendimento. A Figura 1 apresenta os níveis de acessibilidade para cada ano-base do período analisado. Entre 1970 e 1990, observa-se significativa

concentração do quintil superior de acessibilidade no primeiro anel viário, que abrange o centro comercial da cidade. Esses níveis expandem-se gradualmente para as regiões oeste e sudoeste, decrescendo com o afastamento dessas áreas. Esse padrão reflete a importância histórica das zonas centrais e a presença de armazéns no polo industrial a oeste e na densa periferia ao sudoeste. Durante esse período, a acessibilidade concentrou-se em áreas de maior densidade comercial e populacional, garantindo a proximidade entre geradores e atratores de cargas..

A partir dos anos 2000, esse padrão se altera com a redução da acessibilidade nas regiões central e oeste, acompanhada de migração para áreas lindeiras à BR-116, seguindo o eixo sudeste. Em 2020, essa tendência se consolida com expressiva redução da acessibilidade dentro do primeiro anel viário e a consolidação da BR-116 como eixo logístico fundamental. A crescente aglomeração ao longo dessa via expressa indica sua atração para instalações logísticas, por conectar o centro às regiões periféricas, como principal eixo de entrada de cargas da região metropolitana. A descentralização da acessibilidade reflete a demanda por terrenos amplos, de menor custo e com menos restrições operacionais, além de estar relacionada às diretrizes dos planos diretores, que impuseram limites à localização de armazéns na região central e incentivos à expansão utilizando vias de maior capacidade.

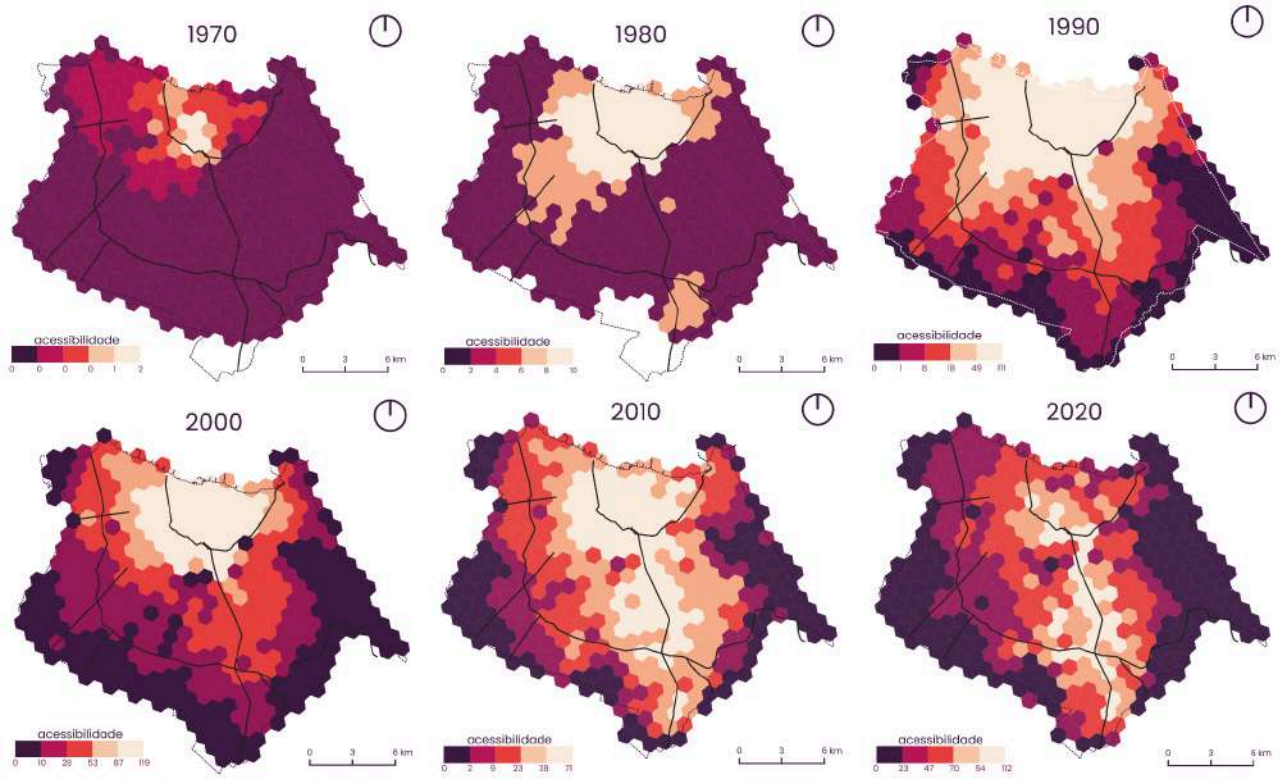


Figura 1: Análises de acessibilidade em Fortaleza entre 1970 e 2020.

4. ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou caracterizar as mudanças na acessibilidade a armazéns ao longo de seis décadas, permitindo compreender a evolução espacial da expansão logística a partir de métricas de acessibilidade. Foram calculadas métricas de oportunidades cumulativas passivas para seis anos-base (1970, 1980, 1990, 2000, 2010 e 2020). Os resultados aprofundam a compreensão da acessibilidade no contexto do Transporte Urbano de Cargas (TUC), relacionando a expansão logística e a localização de armazéns ao grau de acessibilidade no ambiente urbano.

A análise temporal revelou transformações significativas nos padrões de acessibilidade. Entre 1970 e 1990, os níveis mais elevados concentravam-se em áreas centrais, especialmente em regiões comerciais de alta densidade populacional, evidenciando a proximidade entre geradores e atratores de carga. Nas décadas

seguintes, esse padrão deslocou-se em direção à BR-116, principal eixo viário da cidade, caracterizado por menor valor do solo, menos restrições ao uso logístico e alta acessibilidade rodoviária. Essa mudança reflete a busca dos operadores por localizações mais favoráveis às suas operações, ainda que isso resulte em maiores distâncias percorridas, aumento das emissões e ampliação dos tempos de entrega.

Também se observou desigualdade espacial na evolução da acessibilidade. Houve crescimento expressivo na região oeste, onde predomina a população de baixa renda, contrastando com a baixa acessibilidade na região leste, habitada por grupos de alta renda. Historicamente, a região leste não recebeu zonas logísticas, o que explica a reduzida presença de armazéns, mesmo com a disponibilidade de terrenos. Além disso, os elevados preços da terra desestimularam a instalação dessas infraestruturas, perpetuando uma distribuição socioespacial desigual das externalidades do TUC (Yuan, 2018).

Este estudo preenche uma lacuna na literatura sobre planejamento do uso logístico do solo ao analisar padrões de acessibilidade como ferramenta para compreender a evolução das localizações logísticas. Os resultados evidenciam o deslocamento dos melhores níveis de acessibilidade para áreas mais distantes do centro, vinculadas a vias de alta capacidade. Esse processo rompe a relação de proximidade entre armazéns e destinos, reduzindo o número de varejistas beneficiados por alta acessibilidade, já que esses permanecem concentrados em regiões centrais de maior densidade populacional e atividade econômica.

Metodologicamente, a pesquisa se destaca por adaptar técnicas tradicionalmente usadas no transporte de pessoas para o transporte de cargas. O uso de métricas de oportunidades cumulativas mostrou-se adequado para avaliar a localização de armazéns e apoiar estratégias de planejamento baseadas na proximidade. A abordagem longitudinal identificou mudanças estruturais consolidadas ao longo de décadas, como a própria expansão logística, reforçando a importância de integrar políticas urbanas e logísticas para compreender a complexidade espacial do TUC.

Em termos políticos, os achados têm implicações práticas. O método proposto requer apenas duas bases de dados, localização de armazéns e rede viária, facilitando sua aplicação por planejadores na avaliação dos efeitos de políticas de zoneamento, incentivos ou restrições à instalação de armazéns. A análise também oferece subsídios para incorporar diretrizes de localização aos planos diretores, relacionando níveis de acessibilidade a padrões espaço-temporais, distribuição equitativa das externalidades e prestação de serviços aos varejistas. Isso permite identificar impactos das políticas de localização e propor estratégias para conter a expansão logística e mitigar seus efeitos. Também possibilita direcionar investimentos e políticas para regiões com maiores desafios na distribuição de mercadorias, buscando maximizar a acessibilidade.

Por fim, os resultados podem apoiar o poder público e operadores logísticos na escolha de localizações adequadas para armazéns. Parte dessas evidências pode ser incorporada em planos de uso do solo e regulamentações que equilibrem demandas locacionais, reduzam externalidades e garantam acessibilidade às áreas de maior demanda por entregas. Em síntese, reforça-se a necessidade de integrar planejamento urbano e logístico, considerando dinâmicas territoriais, socioeconômicas e políticas, de forma a promover uma distribuição mais equitativa dos impactos e ganhos associados à acessibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aljohani, K., e Thompson, R. G. (2016) Impacts of logistics sprawl on the urban environment and logistics: Taxonomy and review of literature. *Journal of transport geography*, *57*, 255–263. doi:10.1016/j.jtrangeo.2016.08.009

Allam, Z., Nieuwenhuijsen, M., Chabaud, D., e Moreno, C. (2022) The 15-minute city offers a new framework for sustainability, liveability, and health. *The lancet. Planetary health*, *6*(3), e181–e183. doi:10.1016/S2542-5196(22)00014-6

Birch, C. P. D., Oom, S. P., e Beecham, J. A. (2007) Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological modelling*, *206*(3–4), 347–359. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041

Bowen, J. T., Jr. (2008) Moving places: the geography of warehousing in the US. *Journal of transport geography*, *16*(6), 379–387. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.03.001

Brazilian Federal Revenue (BFR). (s. d.) Database of legal entities. Brazil. *Gov.br*. Obtido 9 de setembro de 2025, de https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/cadastro-nacional-da-pessoa-juridica---cnpj

Buldeo Rai, H. (2023) Urban warehouses as good neighbors: Findings from a New York City case study. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, *19*(100823), 100823. doi:10.1016/j.trip.2023.100823

Cascetta, E., Cartenì, A., e Montanino, M. (2016) A behavioral model of accessibility based on the number of available opportunities. *Journal of transport geography*, *51*, 45–58. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.11.002

Dablanc, L. (2018) *E-commerce trends and implications for urban logistics*.

Dablanc, L., e Browne, M. (2020) Introduction to special section on logistics sprawl. *Journal of transport geography*, *88*(102390), 102390. doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.01.010

Dablanc, L., Ogilvie, S., e Goodchild, A. (2014) Logistics sprawl: Differential warehousing development patterns in Los Angeles, California, and Seattle, Washington. *Transportation research record*, *2410*(1), 105–112. doi:10.3141/2410-12

Dablanc, L., e Rakotonarivo, D. (2010) The impacts of logistics sprawl: How does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it? *Procedia, social and behavioral sciences*, *2*(3), 6087–6096. doi:10.1016/j.sbspro.2010.04.021

Dablanc, L., e Ross, C. (2012) Atlanta: a mega logistics center in the Piedmont Atlantic Megaregion (PAM). *Journal of transport geography*, *24*, 432–442. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.05.001

Hesse, M., e Rodrigue, J.-P. (2004) The transport geography of logistics and freight distribution. *Journal of transport geography*, *12*(3), 171–184. doi:10.1016/j.jtrangeo.2003.12.004

Holguín-Veras, J., Lawson, C., Wang, C., Jaller, M., González-Calderón, C., Campbell, S., Kalahashti, L., Wojtowicz, J., Ramirez, D., National Cooperative Freight Research Program, Transportation Research Board, e National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016) *Using commodity flow survey microdata and other establishment data to estimate the generation of freight, freight trips, and service trips: Guidebook*. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Holguin-Veras, J., Ramirez-Rios, D., Ng, J., Wojtowicz, J., Haake, D., Lawson, C. T., Calderón, O., Caron, B., e Wang, C. (2021) Freight-Efficient Land Uses: Methodology, strategies, and tools. *Sustainability*, *13*(6), 3059. doi:10.3390/su13063059

Houde, J.-F., e Newberry, P. (s. d.) Economies of density in E-commerce: A study of amazon's fulfillment center network. *Illinois.edu*. Obtido 14 de julho de 2025, de https://files.webservices.illinois.edu/6984/amazon_tax_fall18-cleaned.pdf

Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C., e Pratlong, F. (2021) Introducing the "15-minute city": Sustainability, resilience and place identity in future post-pandemic cities. *Smart Cities*, *4*(1), 93–111. doi:10.3390/smartcities4010006

Pereira, R. H. M. (2019) Future accessibility impacts of transport policy scenarios: Equity and sensitivity to travel time thresholds for Bus Rapid Transit expansion in Rio de Janeiro. *Journal of transport geography*, *74*, 321–332. doi:10.1016/j.jtrangeo.2018.12.005

Pereira, R. H. M., Saraiva, M., Herszenhut, D., Braga, C. K. V., e Conway, M. W. (2021) R5r: Rapid realistic routing on multimodal transport networks with R^5 in R. *Findings (Sydney (N.S.W.)*. doi:10.32866/001c.21262

Pinheiro, C. D. P., Gonzalez Feliu, J., e Bertoncini, B. V. (2025) Addressing spatial heterogeneity and MAUP in urban transport geography: A multi-scale analysis of accessibility and warehouse location. *Journal of transport geography*, *123*(104078), 104078. doi:10.1016/j.jtrangeo.2024.104078

Uber. (2018) H3: Uber's hexagonal hierarchical spatial index. *Uber.com*. Obtido 9 de setembro de 2025, de https://www.uber.com/en-BR/blog/h3/

van Wee, B. (2016) Accessible accessibility research challenges. *Journal of transport geography*, *51*, 9–16. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018

Xiao, Z., Yuan, Q., Sun, Y., e Sun, X. (2021) New paradigm of logistics space reorganization: E-commerce, land use, and supply chain management. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, *9*(100300), 100300. doi:10.1016/j.trip.2021.100300

Yuan, Q. (2018) Environmental justice in warehousing location: State of the art. *Journal of planning literature*, *33*(3), 287–298. doi:10.1177/0885412217753841

Bruno Reges Almeida de Brito (bruno.debrito@det.ufc.br)
Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, (Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, Ceará, Brasil)

FALHAS DE ENTREGA NO COMÉRCIO ELETRÔNICO: EXPLORANDO PADRÕES OPERACIONAIS E DE USO DO SOLO

Lílian dos Santos Fontes Pereira Bracarense[1,2], **Sofia Corrêa Passos Viana**[2], **Leise Kelli de Oliveira**[2,3]
[1]Universidade Federal do Tocantins, [2]Universidade Federal de Minas Gerais,
[3]Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
O artigo tem como objetivo identificar as variáveis operacionais e de uso do solo que influenciam as falhas de entrega no comércio eletrônico, com base em 530 mil registros de uma operadora logística em Belo Horizonte. A análise estatística revelou padrões de falha relacionados à sazonalidade, dia da semana, horário da rota e tipo de edificação. As falhas foram mais frequentes às segundas-feiras (23%), terças-feiras (9%) e sábados (11%) e em edifícios residenciais com até quatro andares ou comerciais com mais de oito. A infraestrutura de transporte mostrou-se significativa em duas direções: grandes corredores e barreiras físicas contribuem para o aumento de falhas na entrega, enquanto diversificação modal e capilaridade contribuem para a redução de falhas. Os resultados sugerem que políticas de agendamento flexível, comunicação ativa com o cliente e adaptações urbanísticas podem mitigar as falhas.

1. INTRODUÇÃO E *BACKGROUND*

O comércio eletrônico abrange todas as transações de compra e venda realizadas por meio de canais on-line (Buldeo Rai et al., 2019) e é um setor de varejo que cresceu significativamente nos últimos anos, atingindo uma participação de 20,1% do total do varejo global em 2024 (Statista, 2024). Os produtos podem ser físicos ou virtuais (por exemplo, livros eletrônicos); os produtos físicos exigem entrega para chegar ao consumidor. Entre os fatores que contribuem para o crescimento do comércio eletrônico está a conveniência de comprar on-line e receber seus produtos no destino escolhido (Dias et al., 2022), o que aumentou a fidelidade dos clientes às plataformas de compras on-line e tornou suas compras regulares (Laudon e Traver, 2020).

No Brasil, as entregas em domicílio (ou no destino indicado pelo consumidor) predominam nas compras de comércio eletrônico (Oliveira et al., 2019). Um dos maiores desafios associados às entregas de encomendas é a falha na entrega, ou seja, quando a entrega não é bem-sucedida (McLeod et al., 2006; Seghezzi e Mangiaracina, 2023). Vários fatores estão associados a entregas malsucedidas, como incerteza sobre o tempo de entrega, condições de tráfego local, incidentes em vias públicas e roteamento inadequado, entre outros (Buldeo Rai et al., 2019; McLeod et al., 2006; Song et al., 2009). Edwards et al. (2010) identificaram que um em cada oito pedidos on-line não é entregue na primeira tentativa no Reino Unido; mais de 20% das entregas não são feitas em West Sussex (Inglaterra) (Song et al., 2009); 10% das entregas não são feitas na primeira tentativa na Holanda, enquanto 15% dos pedidos são entregues a vizinhos quando o destinatário não está no destino (van Duin et al., 2016); 12% das entregas falham no Reino Unido (McLeod et al., 2006). A falha na entrega aumenta o manuseio da carga, o que pode causar danos ao produto (van Duin et al., 2016) e custos adicionais de mão de obra e transporte para o operador logístico (Edwards et al., 2010; van Duin et al., 2016). Além disso, as entregas malsucedidas têm um impacto negativo no meio ambiente, pois exigem outras tentativas de entrega, aumentando o consumo de combustível e as emissões de poluentes (Edwards et al., 2010), além de aumentar a ineficiência do transporte urbano de cargas (van Duin et al., 2016).

As falhas na primeira tentativa de entrega podem ser causadas pela ausência de um receptor, muitas vezes devido à incompatibilidade entre as rotinas e o estilo de vida dos recebedores e os padrões de entrega (Buldeo Rai et al., 2021). As diferenças nas taxas de insucesso entre os prestadores de serviços de logística dependem das políticas aplicadas em caso de ausência do destinatário. Algumas das medidas adotadas pelos operadores logísticos para reduzir essas taxas de insucesso consistem em permitir que os consumidores definam horários de entrega limitados em dias úteis que se adaptem à sua agenda, redirecionem as encomendas para outro local, ou escolham horários de entrega fora do horário comercial (Van Duin et al., 2016). No entanto, essas soluções são menos eficientes para a consolidação das entregas e para o roteamento (Buldeo Rai et al., 2021).

Além do comportamento do consumidor, as características operacionais desempenham um papel importante nas falhas durante a primeira tentativa de entrega. Lim et al. (2023) identificaram que a posição da entrega em uma rota afeta a probabilidade de falha, sendo que as entregas que ocorrem no início da rota são mais propensas

a problemas. Esse fenômeno pode ser atribuído ao esforço discricionário reduzido exercido pelos motoristas no início da rota, juntamente com a hipótese do gradiente de metas, que sugere que os motoristas tendem a aumentar a velocidade ou o esforço quando se aproximam do final da rota. Além disso, as rotas com muitas paradas normalmente apresentam taxas de falha mais altas e o aumento da distância entre o centro de distribuição e o ponto de entrega está correlacionado a uma maior chance de falha, em grande parte devido ao tempo adicional e à incerteza associada a essas entregas.

Vários estudos na literatura envolvendo falhas de entrega se concentram em externalidades (Edwards et al., 2010) e tecnologias alternativas de entrega (Alves et al., 2023; Buldeo Rai et al., 2021; Mittendorf et al., 2017). Embora haja evidências de que variáveis contextuais geográficas e socioeconômicas, como taxa de criminalidade, densidade populacional, renda média e densidade de estabelecimentos comerciais na vizinhança, influenciem o risco de falha (Lim et al., 2023), a investigação de falhas de entrega sob a perspectiva de aspectos de planejamento urbano não foi encontrada na literatura.

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo identificar as variáveis operacionais e de uso do solo que influenciam as falhas de entrega. Para isso, foi utilizada uma base de dados operacionais de uma grande operadora logística na América Latina (que permanece anônima por motivos de privacidade). O artigo contribui significativamente para a literatura sobre transporte urbano de carga ao integrar variáveis operacionais e de uso do solo na análise das falhas de entrega no comércio eletrônico, uma abordagem ainda pouco explorada. Com base em mais de 530 mil registros de entregas em Belo Horizonte, o estudo identifica padrões temporais e espaciais associados a falhas, destacando a influência do dia da semana, do horário da rota e do tipo de edificação. A análise numérica, por meio de testes de qui-quadrado e regressão linear, evidencia a relevância de variáveis como densidade urbana, infraestrutura de transporte e acessibilidade. Os resultados mostram, por exemplo, maior incidência de falhas em edifícios residenciais sem portaria e em áreas servidas por BRT e linhas de ônibus, apontando limitações operacionais e desafios territoriais. Além disso, o trabalho oferece subsídios práticos para políticas públicas e estratégias empresariais, como o uso de pontos de coleta, agendamento flexível e soluções tecnológicas de comunicação com os destinatários, contribuindo para a eficiência logística e a sustentabilidade das entregas urbanas.

2. METODOLOGIA

A pesquisa utilizou um banco de dados composto por 530.881 registros válidos de entregas realizadas durante os meses de julho e agosto de 2023, na região centro-norte de Belo Horizonte, área atendida pelo centro de distribuição de onde os dados foram obtidos. O banco de dados inclui informações relacionadas ao destino da entrega (endereço e tipo de destino: residencial ou comercial), o dia e a hora da rota de entrega, o preço do produto e o volume de mercadorias. Inicialmente, a falha na entrega e o padrão de entrega foram caracterizados usando informações operacionais na escala de pontos. Observando as diferenças, foi aplicado o teste de qui-quadrado entre as entregas com falha e as variáveis operacionais e de tipo de uso do edifício.

Em uma segunda etapa, foram comparadas variáveis influentes para ocorrência de falhas na entrega e para entregas bem sucedidas. Foram analisados dados de vizinhança, caracterizando a infraestrutura existente no entorno. Esses dados incluem renda, número de residências, estabelecimentos comerciais, população total, presença de favelas, número de empregos, número de pontos de ônibus, número de linhas de ônibus, disponibilidade de linhas de BRT, presença de linhas de metrô, extensão de ciclovias, acessibilidade passiva cumulativa a destinos dentro de um tempo de viagem de 15 minutos, acessibilidade ativa cumulativa a instalações de saúde, acessibilidade ativa cumulativa a instalações educacionais, número de instalações de saúde e número de matrículas de alunos. Para tanto, os dados foram agrupados em hexágonos de 0,11km^2, conforme proposto por Pereira e Herszenhut (2023).

Para determinar quais variáveis estão significativamente relacionadas ao número de entregas malsucedidos e ao total de entregas realizados, foi estimado um modelo de regressão linear por etapas (regressão *stepwise*). Esse método busca incorporar as variáveis independentes mais relevantes e excluindo aquelas consideradas desnecessárias no modelo de regressão linear. Esse processo iterativo envolve a inclusão e exclusão sistemática de variáveis, ajustando o modelo para melhorar seu poder explicativo em relação à variável dependente. O modelo final determina os fatores influentes para entregas bem-sucedidas e fracassadas.

3. RESULTADOS

A análise dos dados operacionais revelou que a proporção de falhas de entrega é notavelmente maior às segundas-feiras (23%), terças-feiras (9%) e sábados (11%), o que se alinha com os dias em que há mais falhas de entrega residencial. Em contrapartida, as falhas nas quartas, quintas e sextas-feiras são predominantemente observadas em entregas para endereços comerciais. Além disso, as falhas de entrega residencial são mais comuns em edifícios com até quatro andares, enquanto as falhas de entrega comercial estão associadas principalmente a edifícios com mais de oito andares.

A sazonalidade também foi explorada. Julho é um período de férias escolares no Brasil, e esse período normalmente corresponde às duas últimas semanas do mês em Belo Horizonte. Com relação às falhas de entrega, houve uma mudança no número de ocorrências, com apenas 1,4% de todas as tentativas de entrega em julho e 7,3% em agosto. Em julho, houve apenas três falhas de entrega em endereços residenciais, enquanto em agosto o número de falhas de entrega em endereços residenciais representou 65% de todas as falhas. Essa diferença também aparece em relação ao tipo de prédio, com uma variação maior entre prédios de até quatro andares e entre galpões industriais/comerciais.

Na Tabela 1 são exploradas as diferenças nas entregas não realizadas em destinos residenciais e comerciais usando o teste de qui-quadrado. As variáveis representam o tipo de edifício de destino da entrega (informado pelo comprador e obtido dos registros municipais) e os andares do edifício (classificados como até 4 andares, de 5 a 8 andares e mais de 8 andares). Todas as variáveis de tipo de uso foram significativas, e a análise residual confirmou que o destino da entrega (comercial vs. residencial) influencia significativamente as entregas com falha. As empresas têm mais entregas com falha do que o esperado, como galpões industriais/comerciais. Para caracterizar as operações, foram analisadas as entregas por mês, dia da semana em que ocorreu a tentativa de entrega, horário de início da rota e turno de início da rota. Todas as variáveis foram significativas, especialmente o dia da semana e o horário de início da rota. A análise residual também confirmou a variação sazonal e que mais entregas com falha ocorrem principalmente em dias úteis, sendo a segunda-feira o dia com maior ocorrência e o domingo o dia com menor ocorrência. Com relação à hora do dia, as entregas com falha ocorrem mais em rotas que começam durante o horário comercial e no início da noite, enquanto é raro observar entregas com falha em rotas que começam nas primeiras horas da manhã.

Tabela 1: Resultados do teste Qui-quadrado.

Categoria	**Variable**	**Chi-squared**	**p-valor**
Tipo de uso	Tipo de uso declarado	8.759,449	0,0000
	Tipo de uso bases municipais	287,146	0,0000
	Número de pavimentos	202,113	0,0000
Operação	Mês	8.618,707	0,0000
	Dia da semana	33.909,790	0,0000
	Hora de início da rota	203.416,700	0,0000
	Turno da rota	3.405,785	0,0000

Para a análise de regressão *stepwise*, foram incluídas, além das variáveis mencionadas anteriormente, a distância do centro de Belo Horizonte e o *spatial lag* de entregas realizadas e entregas falhas. O *spatial lag* de uma variável em um determinado ponto representa a média ponderada dos valores dessa variável nas unidades vizinhas, levando em conta os pesos espaciais estabelecidos. Na Tabela 2 são mostrados os resultados do modelo de regressão linear. A seleção de variáveis entre os modelos apresentou diferenças distintas devido ao procedimento de *stepwise*. A distância até o centro e a população total só foram relevantes no modelo que avaliava as entregas bem-sucedidos. Em contrapartida, o modelo para entregas malsucedidas incluiu todas as variáveis de infraestrutura de transporte juntamente com o *spatial lag* das entregas malsucedidas. É interessante notar que, embora a presença de linhas de ônibus e BRT tenha influenciado positivamente o número de entregas malsucedidas, a existência de linhas de trem urbano e ciclovias teve um impacto negativo. Essa diferença indica que a competição pelo o espaço no sistema viário, como com os corredores de BRT aumenta a complexidade das operações da última milha, enquanto a diversificação modal e oferta de outras infraestruturas

contribuem para a redução de falhas de entrega. Com relação ao modelo para entregas bem-sucedidas, os sinais das variáveis significativas permaneceram inalterados; no entanto, houve uma variação na intensidade dos coeficientes.

Tabela 2: Resultados da regressão linear.

Variáveis	Modelo: Falha na entrega				Modelo: Entrega realizada			
	Coef.	Erro padrão	t-valor	p-valor	Coef	Erro padrão	t-valor	p-valor
Intercepto	2,639	0,968	2,727	0,006	36,321	7,894	4,601	0,000
Spatial Lag entrega realizada	0,034	0,005	6,946	0,000	0,661	0,031	21,629	0,000
Spatial Lag entrega falha	**-0,102**	**0,058**	**-1,755**	**0,079**				
Distância ao centro					**-0,003**	**0,002**	**-1,985**	**0,047**
Domicílios	0,007	0,004	1,590	0,112	0,313	0,047	6,720	0,000
Estabelecimentos comerciais	0,018	0,008	2,264	0,024	0,351	0,066	5,279	0,000
Favelas	-4,996	2,441	-2,047	0,041	-71,132	19,767	-3,599	0.000
População					**-0.054**	**0,017**	**-3,168**	**0,002**
Linhas de ônibus	0,609	0,133	4,587	0,000	3,573	0,993	3,598	0,000
BRT	**6,121**	**2,929**	**2,090**	**0,037**				
Trem urbano	-7,788	2,593	-3,004	0,003	-68,719	20,809	-3,302	0,001
Ciclovia	**-5,962**	**2,691**	**-2,215**	**0,027**				
Empregos	-0,005	0,003	-1,691	0,091	-0,056	0,022	-2,546	0,011
Acessibilidade a empregos					**-0,007**	**0,002**	**-4,005**	**0,000**
Acessibilidade a saúde	**-1,152**	**0,346**	**-3,330**	**0,001**				
Acessibilidade a educação	**1,234**	**0,460**	**2,682**	**0,007**				

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados revelam que as empresas de logística enfrentam desafios significativos em termos de eficiência operacional na entrega dos produtos do *e-commerce* na região em estudo. Falhas na primeira tentativa de entrega não são incidentes isolados; elas ilustram uma interação complexa entre fatores operacionais, comportamentais e estruturais. Ao analisar os padrões das falhas de entrega, pode-se explorar maneiras de otimizar as operações de logística, reduzindo assim as perdas e melhorando a experiência do cliente. Embora os estudos se refiram a um caso específico, a quantidade de dados permite que esses resultados sejam estendidos a outros contextos com serviços de entrega semelhantes.

Os dados de operações em nível de ponto destacaram os efeitos da sazonalidade, revelando que a taxa de falhas de entrega tende a ser significativamente maior durante os meses típicos escolares em comparação com os meses de férias, especialmente para endereços residenciais. Além disso, os padrões operacionais podem influenciar a probabilidade de falhas, conforme identificado por Lim et al. (2023). Surgem padrões específicos relacionados ao dia da semana e ao horário da entrega; as segundas-feiras, por exemplo, apresentam uma concentração de falhas, assim como as rotas programadas durante o horário comercial e no início da noite. Essas tendências sugerem que, com frequência, há uma maior ausência de destinatários disponíveis para receber encomendas nesses horários. Esses dados ressaltam a necessidade de soluções aprimoradas de agendamento de entregas e estratégias de comunicação entre empresas de logística e clientes. Implementar notificações em tempo real e oferecer aos clientes a flexibilidade de selecionar o dia e o horário de entrega de sua preferência pode facilitar o planejamento para o recebimento de mercadorias e reduzir as falhas de entrega.

As características dos edifícios onde ocorrem as entregas também desempenham um papel importante. As falhas tendem a ser mais comuns em estruturas residenciais de até quatro andares e em edifícios comerciais com mais de oito andares. Esse padrão pode sugerir que a falta de serviços eficientes de portaria, dificuldades de acesso para a equipe de entrega ou restrições operacionais nesses edifícios contribuem para as falhas de entrega. A realização de parcerias com condomínios para implementar sistemas de portarias inteligentes ou

caixas de correio designadas para entregas poderia ajudar a mitigar esses problemas. Além disso, trabalhar com empresas locais para servir como pontos de coleta pode ser uma solução eficaz.

Os resultados dos modelos para entregas realizadas e entregas falhas indicam que existem diferenças, incluindo relações inversas em determinadas variáveis. A infraestrutura de transporte provou ser um fator de diferenciação significativo. Ao identificar áreas dentro das cidades onde as falhas de entrega são mais prevalentes, como centros comerciais e zonas densamente povoadas, as soluções urbanas podem ser desenvolvidas de forma proativa. As estratégias que estabelecem espaços dedicados à logística urbana, como pontos de coleta e armários, podem aliviar a dependência da entrega em domicílio e atenuar as falhas devido à indisponibilidade do consumidor. É fundamental observar que o sucesso dessas iniciativas depende do apoio da comunidade. No banco de dados utilizado, não havia informações específicas sobre o motivo do fracasso da tentativa de entrega. Pesquisas futuras poderiam investigar melhor as causas e refinar a lista de fatores associados. Além disso, os resultados deste estudo poderiam contribuir para o desenvolvimento de modelos de previsão de falhas de entrega e melhorias na programação de entregas.

Agradecimentos
Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, R.; C. A. Pereira e R. D. Lima (2023) Operational cost analysis for e-commerce deliveries using agent-based modeling and simulation. *Research in Transportation Economics* v. 101, p. 101348. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101348

Buldeo Rai, H.; S. Verlinde e C. Macharis (2021) Unlocking the failed delivery problem? Opportunities and challenges for smart locks from a consumer perspective. *Research in Transportation Economics* v. 87, p. 100753. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100753

Buldeo Rai, H.; S. Verlinde e C. Macharis (2019) City logistics in an omnichannel environment. The case of Brussels. *Case Studies on Transport Policy*, v.7, p.310–317. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.02.002

Dias, E.G.; L. K. Oliveira e C. A. Isler (2022) Assessing the Effects of Delivery Attributes on E-Shopping Consumer Behaviour. *Sustainability* v. 14, p.13. https://doi.org/10.3390/su14010013

Edwards, J.; A. McKinnon; T. Cherrett; F. McLeod e L. Song (2010) Carbon Dioxide Benefits of Using Collection–Delivery Points for Failed Home Deliveries in the United Kingdom. *Transportation Research Record*, v.2191, p. 136–143. https://doi.org/10.3141/2191-17

Laudon, K.G. e C. G. Traver (2020) *E-commerce*: Business, Technology and Society. Pearson, New York.

Lim, S.F.W.T.; Q. Wang e S. Webster (2023) Do it right the first time: Vehicle routing with home delivery attempt predictors. *Production and Operations Management*, v. 32, p.1262–1284. https://doi.org/10.1111/poms.13926

McLeod, F.; T. Cherrett e L. Song (2006) Transport impacts of local collection/delivery points. *International Journal of Logistics Research and Applications,* v.9, p.307–317. https://doi.org/10.1080/13675560600859565

Mittendorf, C.; D. Franzmann e U. Ostermann (2017) Why Would Customers Engage in Drone Deliveries? In: *Twenty-third Americas Conference on Information Systems,* Boston.

Oliveira, L. K.; G. G. F. Araújo e I. K. de Oliveira (2019) How to explain the location of logistics warehouses from the urban quality-of-life index and the local supply index? *WSB Journal of Business and Finance,* v. 53, p. 15–21.

Pereira, Rafael H. M., & Herszenhut, Daniel (2023). Introduction to urban accessibility: a practical guide with R. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). https://ipeagit.github.io/intro_access_book/en/index.en.html

Seghezzi, A. e R. Mangiaracina (2023). Smart home devices and B2C e-commerce: a way to reduce failed deliveries. *Industrial Management & Data Systems*, v.123, p.1624–1645. https://doi.org/10.1108/IMDS-10-2022-0651

Song, L.; T. Cherrett; F. McLeod e W. Guan (2009) Addressing the Last Mile Problem: Transport Impacts of Collection and Delivery Points. *Transportation Research Record*, v. 2097, p. 9–18. https://doi.org/10.3141/2097-02

Statista, 2024. *E-commerce worldwide* - statistics & facts. URL https://www.statista.com/topics/871/online-shopping/#topicOverview (accessed 12.18.24).

van Duin, J.H.R.; W. de Goffau; B. Wiegmans; L. A. Tavasszy e M. Saes (2016) Improving Home Delivery Efficiency by Using Principles of Address Intelligence for B2C Deliveries. *Transportation Research Procedia,* v.12, p.14–25. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.006

Lílian dos Santos Fontes Pereira Bracarense (lilianfontes@uft.edu.br)
Universidade Federal do Tocantins, Palmas - TO, Brasil
Sofia Corrêa Passos Viana (sofiacpviana@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil
Leise Kelli de Oliveira (leise.oliveira@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre - RS, Brasil

LOCALIZAÇÃO DE DOMICÍLIOS E ESTABELECIMENTOS NA REDE VIÁRIA DE FAVELAS BRASILEIRAS: IMPLICAÇÕES PRÁTICAS PARA A LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA

Ana Flávia de Oliveira Carvalho[1], **Cecília Aparecida Pereira**[1],
Renato da Silva Lima[1], **Mark H. P. Zuidgeest**[2]
[1]Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), [2]University of Cape Town (UCT)

RESUMO
As favelas brasileiras abrigam 16,4 milhões de pessoas que movimentam R$120 bilhões anualmente. Porém, essa população possui acesso desigual a bens básicos devido a barreiras logísticas, como a infraestrutura viária local. Este artigo analisa como a localização de domicílios e estabelecimentos em favelas, considerando diferentes tipologias de logradouros, impacta as entregas de última milha B2C (*business-to-consumer*) e B2B (*business-to-business*). Uma pesquisa quantitativa-descritiva foi realizada utilizando elementos de geoprocessamento e dados censitários. Os resultados mostram que, embora a maioria esteja em vias acessíveis, 18,26% dos domicílios e 9,49% dos estabelecimentos estão em vias inacessíveis. Essas proporções, somadas às demais barreiras logísticas, evidenciam desigualdades de acesso enfrentadas por uma população já desfavorecida. Como esperado, há maior proporção de estabelecimentos em vias acessíveis, refletindo a natureza das entregas B2B. Espera-se que este estudo contribua para o entendimento da logística urbana em favelas brasileiras, promovendo maior equidade de acesso a bens e serviços.

1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento da taxa de urbanização mundial (ONU, 2022) tornou as dinâmicas urbanas mais complexas, sobretudo nos países em desenvolvimento, nos quais evidenciou-se o aumento dos assentamentos urbanos informais (AUI) (Hirakawa *et al.*, 2018). No Brasil, cerca de 16,4 milhões de pessoas vivem em favelas, tipo mais comum de AUI no país (IBGE, 2024), movimentando aproximadamente R$120 bilhões por ano, volume de renda maior do que 20 das 27 unidades federativas do país (Data Favela e Locomotiva, 2020). Apesar desse potencial econômico, cerca de 35% dos consumidores do *e-commerce* que moram em favelas brasileiras não conseguem receber suas encomendas em domicílio (Data Favela e Locomotiva, 2020), sendo restritos à retirada da mercadoria principalmente em lojas físicas ou agências dos Correios, localizadas longe de suas residências (Pereira *et al.*, 2025). Em contrapartida, a outra parcela até consegue receber seus produtos em domicílio, mas é penalizada com elevados valores de frete e tempo de espera (Pongeluppe, 2022). Contextos semelhantes ao *business-to-consumers* (B2C) também se aplicam para a distribuição de mercadorias *business-to-business* (B2B) quando o destino é um estabelecimento localizado em favelas (Duarte *et al.*, 2019).

Nesses territórios, essas situações ocorrem principalmente devido a barreiras logísticas advindas de cinco fatores: (1) topografia e infraestrutura; (2) falta de endereços formais; (3) falta de dados e informações locais; (4) questões de segurança; (5) restrições impostas por *stakeholders* do transporte urbano de cargas (TUC) (Duarte *et al*., 2019; Pereira *et al*., 2025). Consequentemente, os custos de distribuição nessas áreas são estimados em 20% a 50% superiores aos de outras regiões urbanas (Duarte *et al*., 2019). Assim, um entendimento aprofundado da logística urbana nas favelas é crucial para promover maior eficiência e equidade nas operações de entrega de suprimentos nesses locais (Hirakawa *et al*., 2018, Navarro *et al.*, 2021).

Na literatura, embora ainda escassas, pesquisas sobre logística em AUIs têm sido mais frequentes nos últimos cinco anos. No Brasil, Duarte *et al.* (2019) propuseram diretrizes para as entregas em favelas, incluindo empregar localmente, retribuir à comunidade, reconhecer a criminalidade, transportar discretamente e flexibilizar pontos de entrega. Navarro *et al.* (2021) apontaram diferenças entre regiões de baixa e alta renda de São Paulo, com 6,89% e 0,91% da população vivendo em AUIs, respectivamente. Pongeluppe (2022) indicou custos de frete até 90% superiores para consumidores do *e-commerce* que residem em favelas. Mais recentemente, Pereira *et al.* (2025) identificaram barreiras comuns para entregas do *e-commerce* em favelas brasileiras e *townships* sul-africanas, destacando os pontos de coleta e entrega como alternativas promissoras.

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo analisar como a localização de domicílios e estabelecimentos comerciais em favelas brasileiras, de acordo com diferentes tipologias de logradouro, impacta a eficiência das entregas de última milha B2C e B2B nesses locais. Para tanto, este estudo utiliza uma abordagem quantitativa-descritiva a partir de dados censitários, focando no contexto de um único desafio logístico específico das favelas brasileiras, aquele relacionado a infraestrutura viária, a fim de aprofundar o entendimento específico sobre essa barreira.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste artigo segue uma abordagem quantitativa-descritiva com elementos de geoprocessamento. Essa abordagem possibilita utilizar dados quantitativos e técnicas estatísticas e espaciais para resumir e descrever características de um fenômeno em um contexto específico (Taherdoost, 2022). Dessa forma, a metodologia foi dividida em cinco etapas, conforme adaptado de Miguel *et al.* (2018).

A pesquisa iniciou-se com a etapa conceitual, na qual foram estabelecidos: objetivo, escopo, fronteiras e contexto da pesquisa. A Seção 1 apresenta o contexto e objetivo deste artigo. Além disso, este estudo é delimitado territorialmente pelas regiões classificadas como favelas e comunidades urbanas, conforme o último censo populacional brasileiro do IBGE (2024). Em 2022, o IBGE registrou 12.348 favelas no Brasil, distribuídas em 656 cidades, com 16.390.815 moradores em 6.413.647 domicílios (IBGE, 2024). Os dados censitários também mostraram que quase metade das favelas estão localizadas no Sudeste (48,72%), refletindo na distribuição populacional (43,39%), com destaque para São Paulo e Rio de Janeiro. Em contrapartida, a região Centro-Oeste apresenta os menores números, com apenas 2,45% das favelas e 2,39% dessa população no país. Além disso, aproximadamente 8,07% da população brasileira vive em favelas, com destaque para o Amazonas e Amapá, com 34,71% e 24,43% de suas populações residindo em AUIs, respectivamente, seguidos pelo Pará (18,76%), Espírito Santo (15,61%) e Rio de Janeiro (13,34%). Dentre todos os estados brasileiros, 19 possuem entre 0,6% e 8,5% de sua população vivendo em favelas (IBGE, 2024).

Definida a pesquisa a nível conceitual, a segunda etapa consiste na coleta de dados, utilizando como fontes primárias duas bases de dados espaciais do censo populacional do IBGE (2024). A primeira base, a malha de setores censitários, permitiu a delimitação territorial das favelas, enquanto a segunda, o Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE), forneceu as coordenadas geográficas dos domicílios e estabelecimentos comerciais localizados dentro dessas áreas.

Após realizada a coleta, iniciou-se o processamento e a limpeza dos dados no *software* de sistema de informação geográfica QGIS versão 3.34.15. Dessa forma, os dados do CNEFE foram filtrados para incluir apenas aqueles localizados em favelas e comunidades urbanas, conforme a malha de setores censitários. Ademais, as classificações de logradouros do CNEFE foram adaptadas com base na classificação de vias internas de AUIs do IBGE (2010), conforme detalhado a seguir:

a) Avenida/Estrada/Rodovia/Rua: vias com largura mínima de 4 metros que suporta tráfego permanente de carros;
b) Beco/Travessa: vias geralmente cercadas de construções, com menos de 4 metros de largura e não apropriadas para o trânsito permanente de carros;
c) Escadaria: assemelha-se ao beco/travessa, mas tem o piso na forma de escada em locais de aclives acentuados;
d) Rampa: assemelha-se à escadaria, com a diferenciação do piso;
e) Passarela/Pinguela: via geralmente comum em áreas de palafitas, caracteriza-se pelo piso suspenso;
f) Caminho/Trilha: via comum em áreas com menor densidade de domicílios, caracteriza-se por não possuir pavimentação e por não ser limitado lateralmente por construções.

Essa adaptação visou combinar diferentes tipos de logradouros que se encaixam na mesma classificação e classificar as vias de acordo com sua acessibilidade veicular. Dessa forma, a classificação (a) representa vias acessíveis para veículos, enquanto as demais são inacessíveis. Além disso, os logradouros não mencionados pelo IBGE (2010) foram reclassificados como "Não definido", devido à incerteza sobre sua natureza de acesso.

Com os dados devidamente processados e filtrados, foi possível conduzir a etapa de análise de dados. Dessa forma, tabularam-se todos os domicílios e estabelecimentos comerciais separadamente conforme os seus respectivos tipos de logradouros e acesso para os veículos. Essa análise foi feita a nível federal e estadual, a fim de compreender eventuais características regionais específicas. Por fim, devido ao grande volume de dados envolvidos, a última etapa consistiu em validar todas as fases anteriores da metodologia. Essa validação foi realizada por duas pessoas que compõem a lista de autores deste artigo de maneira independente, a fim de aumentar a confiabilidade na coleta, processamento, limpeza e análise dos dados.

3. RESULTADOS

Tendo em vista as diferenças operacionais entre as distribuições de mercadorias B2C e B2B, a análise de resultados foi conduzida considerando esses dois tipos de operações de forma separada. Para a análise relacionada a distribuição de mercadorias B2C, considerou-se apenas o contexto das entregas em domicílio. Para tanto, foi feita a distribuição espacial de domicílios localizados em favelas brasileiras de acordo com cada tipo de logradouro e acesso, conforme descrito na Tabela 1.

A maioria dos domicílios estão localizados em vias acessíveis (75,66%), seguido de vias inacessíveis (18,26%) e vias de acesso não definido (6,08%). Devido ao tamanho continental do país que resulta em uma variedade de tipos de AUIs, a Figura 1 apresenta a proporção de domicílios localizados em cada tipo de acesso de acordo com cada estado brasileiro. Percebe-se que o estado do Amapá e Pará apresentam as menores proporções de domicílios acessíveis, sendo de 51,63% e 51,19%, respectivamente. Essas proporções mais baixas desses estados podem ser explicadas devido ao tipo de AUI desses locais, como a presença de comunidades ribeirinhas que aumentam as taxas de passarelas e pinguelas, por exemplo.

Tabela 1: Distribuição espacial dos domicílios por tipo de acesso e logradouro

Tipo de acesso	Tipo de logradouro	Qtde de domicílios	% de domicílios	% tipo de acesso
Acessível	Rua	4.297.464	67,00	75,66
	Avenida	383.944	5,99	
	Estrada/Rodovia	171.375	2,67	
Inacessível	Beco/Travessa	912.511	14,23	18,26
	Caminho/Trilha/Passagem	206.802	3,22	
	Escadaria	27.595	0,43	
	Passarela/Pinguela	12.261	0,19	
	Rampa	11.894	0,19	
Não definido		389.801	6,08	6,08
Total		6.413.647	100,00	100,00

Independente da unidade de federação e do fato de representarem menor proporção, a quantidade de moradores que residem em vias inacessíveis ainda é significante sob a perspectiva da justiça social do TUC, visto que as teorias de equidade implicam que toda a população deve ter acesso a uma qualidade de vida mínima. Dessa forma, isso não se aplica no contexto apresentado pela Tabela 1 por importantes fatores. Nessa perspectiva, as entregas em domicílio de vias inacessíveis se tornam significativamente desafiantes ou até mesmo impossibilitadas por não permitirem o acesso de qualquer tipo de veículo. Sendo assim, as entregas realizadas em motocicletas, bicicletas ou a pé podem ser uma opção para determinados tipos de logradouros, como becos e travessas. Porém, isso compromete a eficiência logística e, consequentemente, eleva os custos operacionais, podendo promover ainda mais desigualdades das operações logísticas aos *stakeholders* do TUC nesse contexto.

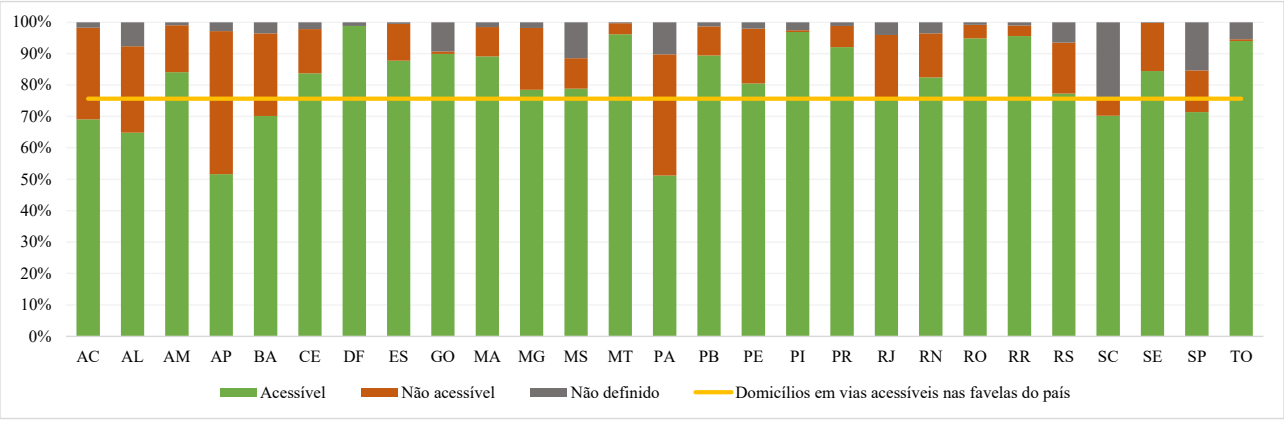


Figura 1: Proporção de domicílios por unidade de federação e tipo de acesso

Todavia, veículos de maior porte conseguem acessar a maioria dos domicílios das favelas brasileiras. Contudo, isso não acontece na prática, devido aos demais desafios logísticos desses locais, como falta de dados e endereços formais, questões de segurança e restrições impostas pelos *stakeholders* do TUC. Nesse sentido, esses fatores em conjunto comprometem o acesso ao *e-commerce* e, consequentemente, a promoção de

equidade do TUC para os consumidores que residem em favelas brasileiras.

Similarmente, a Tabela 2 apresenta a distribuição espacial de estabelecimentos comerciais localizados em favelas brasileiras de acordo com o tipo de acesso e logradouro de suas localizações. Como esperado, a proporção de estabelecimentos localizados em vias acessíveis (87,83%) é maior quando comparada com a mesma taxa relacionada aos domicílios (75,66%). A Tabela 2 também mostra que apenas 9,49% dos estabelecimentos estão localizados em vias inacessíveis, sobretudo em becos e travessas.

Uma possível razão para essa diferença significativa reside nas necessidades operacionais da distribuição B2B. Geralmente, esse tipo de distribuição envolve números superiores de entregas em um único destino, exigindo maiores veículos que permitem maior consolidação de cargas. Isso implica que esses veículos devem ter acesso facilitado para tráfego, estacionamento e carga e descarga. Visto que vias inacessíveis não oferecem essas condições, isso explica o porquê de os estabelecimentos comerciais optarem por locais em vias acessíveis.

Tabela 2: Distribuição espacial dos estabelecimentos por tipo de acesso e logradouro

Tipo de acesso	Tipo de logradouro	Qtde de domicílios	% de domicílios	% tipo de acesso
Acessível	Rua	398.776	66,75	87,83
	Avenida	94.816	15,87	
	Estrada/Rodovia	31.174	5,22	
Inacessível	Beco/Travessa	40.514	6,78	9,49
	Caminho/Trilha/Passagem	14.084	2,36	
	Escadaria	621	0,10	
	Passarela/Pinguela	735	0,12	
	Rampa	730	0,12	
Não definido		15.999	2,68	2,68
Total		597.449	100,00	100,00

A Figura 2 apresenta a proporção de estabelecimentos localizados em cada tipo de acesso por unidade de federação. Similar aos números relacionados aos domicílios, os estados do Pará (66,40%) e Amapá (73,88%) apresentam as menores proporções de estabelecimentos localizados em vias acessíveis. Novamente, isso pode ser razão das características específicas que essas regiões apresentam e que, consequentemente, influenciam os territórios de assentamentos informais.

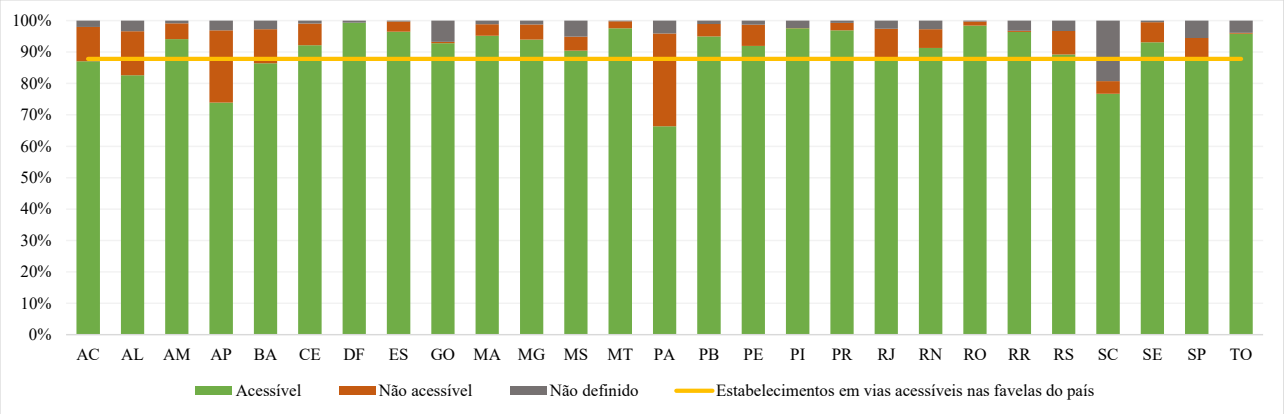


Figura 2: Proporção de estabelecimentos por unidade de federação e tipo de acesso

Por fim, assim como a análise sob a perspectiva B2C, as distribuições de mercadorias B2B também refletem nas injustiças sociais do TUC nas favelas brasileiras. Isso é intensificado devido aos demais desafios logísticos desses territórios que impactam, na prática, até mesmo os estabelecimentos localizados em vias acessíveis. Dessa forma, a equidade do TUC em favelas deve ser feita de maneira sistêmica, visando planejar ações que impactam as causas-raízes dos problemas logísticos tanto a curto quanto a médio e longo prazo.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste artigo foi realizar uma análise da localização de domicílios e estabelecimentos comerciais em favelas brasileiras, de acordo com diferentes tipologias de logradouros, e suas implicações na eficiência da logística de última milha B2C e B2B. Para tanto, este estudo utiliza uma abordagem quantitativa-descritiva a

partir de dados censitários. Conclui-se, assim, que, apesar de serem minorias, as taxas de domicílios e estabelecimentos localizados em vias inacessíveis são significativas sob a perspectiva da equidade do TUC.

Como resultado, essas proporções significativas de inacessibilidade veicular podem impactar negativamente o acesso da população das favelas brasileiras a bens básicos, como medicamentos e alimentos. Sendo assim, para a distribuição B2B, a dificuldade de acesso compromete o abastecimento de estabelecimentos comerciais locais, que são importantes destinos de consumo para os moradores, afetando o consumo local. De forma análoga, na distribuição B2C, isso ocorre devido à falta de acesso que essa população possui ao *e-commerce*, tipo de comércio que apresenta benefícios significativos aos seus consumidores. Portanto, é essencial analisar a logística urbana considerando as particularidades desses territórios, conforme proposto por este estudo, e repensar a importância que soluções customizadas e não-convencionais possuem nesses contextos.

Este estudo apresenta limitações que podem incentivar trabalhos futuros. Embora padronizados, os dados censitários podem conter variações, como incertezas em vias de acesso não definidas e viés de omissão sobre outras características importantes da infraestrutura viária, como as condições de pavimentação. Nesse sentido, recomenda-se o desenvolvimento de novas tecnologias de mapeamento viário para esses contextos. Além disso, este estudo considera apenas o tipo de logradouro, o que aprofunda a análise nesse contexto, mas não contempla a relação dela com outras barreiras logísticas desses territórios. Outra limitação está relacionada a diversidade entre AUIs, sugerindo a aplicação deste estudo em outros tipos de AUIs no Brasil e em outros países para diagnosticar os impactos dessas particularidades na logística de última milha B2C e B2B.

Apesar dessas limitações, o artigo contribui para uma maior compreensão do TUC em favelas brasileiras, visto que a literatura foca em aplicações realizadas em territórios não-desfavorecidos. Além disso, estudos como este auxiliam na maior promoção da equidade do TUC, beneficiando a população local e instituições públicas e privadas pelo aumento do poder de consumo. Por fim, este artigo pode servir de base para ações alinhadas aos objetivos 8, 10 e 11 de desenvolvimento sustentável da ONU para a agenda de 2030.

Agradecimentos
Os autores agradecem à FAPEMIG, ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Data Favela; Locomotiva (2020) Economia das Favelas - Renda e Consumo nas Favelas Brasileiras.

Duarte, A. L. C. M.; F. Macau; C. F. Silva e L. M. Sanches (2019) Last mile delivery to the bottom of the pyramid in Brazilian slums. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, v. 49, n. 5, p. 473-491. DOI: 10.1108/IJPDLM-01-2018-0008.

Hirakawa, A. P. R.; E. D. R. Rodrigues e O. F. Lima Junior (2018) Logística urbana em favelas e áreas precárias: uma revisão sistemática da literatura. In Anais do 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.

IBGE. (2024) Censo Demográfico 2022: Favelas e Comunidades Urbanas. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE. (2010) Notas técnicas: Aglomerados subnormais. Rio de Janeiro: IBGE.

Miguel, P. A. C.; *et al*. (2018) *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Elsevier.

Navarro, H. Á. R.; J. G. V. Vieira e J. C. Fransoo (2021) Understanding urban logistics and consumer behavior in São Paulo city. *Case Studies on Transport Policy*, v. 9, n. 4, p. 1630-1640. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.06.017.

ONU. (2022) World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities.

Pereira, C. A.; M. H. P. Zuidgeest e R. S. Lima (2025) How about including urban informal settlements in city logistics? An equity comparative analysis of e-commerce last mile deliveries. *International Journal of Logistics Management*, v. 36, n. 4, p. 1326-1345. DOI: 10.1108/IJLM-05-2024-0304.

Pongeluppe, L. S. (2022) The favela effect: Spatial inequalities and firm strategies in disadvantaged urban communities. *Strategic Management Journal*, p. 1-32. DOI: 10.1002/smj.3414.

Taherdoost, H. (2022) What are Different Research Approaches? Comprehensive Review of Qualitative, Quantitative, and Mixed Method Research, Their Applications, Types, and Limitations. *Journal of Management Science & Engineering Research*, v. 5, n. 1, p. 53-63. DOI: 10.30564/jmser.v5i1.4538.

Ana Flávia de Oliveira Carvalho (d2022005885@unifei.edu.br)
Cecília Aparecida Pereira (ceciliapereira_@hotmail.com)
Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Itajubá, MG, Brasil.
Mark H. P. Zuidgeest (mark.zuidgeest@uct.ac.za)
University of Cape Town (UCT), Department of Civil Engineering, Cape Town, WC, South Africa.

MODOS ATIVOS DE TRANSPORTE NA ÚLTIMA MILHA DO COMÉRCIO ELETRÔNICO: AVALIANDO O ACESSO DOS CONSUMIDORES AOS *DELIVERY LOCKERS*

Ana Luiza Pimenta Giacchero[1], Cecília Aparecida Pereira[2], Jesimar da Silva Arantes[1], Roberta Alves[1], Renato da Silva Lima[2]
[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), [2] Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

RESUMO
Nos últimos anos, o constante crescimento do *e-commerce* intensificou os desafios logísticos da última milha. Como alternativa às entregas domiciliares, os *delivery lockers* (DL) destacam-se por aumentar a eficiência operacional enquanto as externalidades negativas são reduzidas. Este estudo tem como objetivo avaliar o acesso dos consumidores aos DLs e o uso de modos de transporte não motorizados, como caminhada e bicicleta, para a retirada de suas encomendas adquiridas *online*. Por meio de modelagem e simulação baseada em agentes, um modelo computacional foi desenvolvido para representar a interação entre os agentes logísticos dessas operações. Os resultados indicam uma ampla utilização de modos ativos nos cenários otimistas, podendo representar até 89,4% dos consumidores. Porém, a acessibilidade por meios sustentáveis reduz significativamente nos cenários realistas (65,8%) e pessimistas (27,3%) apesar da leve variação da distância percorrida, ressaltando a importância da localização estratégica dos DLs para a promoção da sustentabilidade da iniciativa.

1. INTRODUÇÃO

O Transporte Urbano de Cargas (TUC) desempenha papel essencial nas cidades, mas também contribui para congestionamentos, poluição atmosférica e emissões de CO_2 (McKinnon, 2023). A crescente preocupação com esses efeitos tem impulsionado pesquisas sobre modos de transporte sustentáveis, incluindo soluções como bicicletas de carga, zonas de baixa emissão e integração com o transporte público (Melo e Baptista, 2017; Tassinari, 2024). Veículos de carga são responsáveis por uma parcela significativa (grande e crescente) das emissões urbanas, sobretudo de CO_2, NOx e material particulado (European Environment Agency, 2021). Em países em desenvolvimento, como o Brasil, os efeitos negativos são agravados pela defasagem na adoção de padrões ambientais, frota envelhecida e ausência de políticas eficazes, o que mantém elevados os níveis de poluição local e compromete a saúde pública (Mucowska, 2021; Li *et al.*, 2020). Com o aumento da urbanização e do *e-commerce*, torna-se ainda mais urgente promover soluções logísticas sustentáveis e eficientes, especialmente em contextos latino-americanos.

No contexto do mercado B2C (*business-to-consumer*), as entregas assistidas ao domicílio (EAD) continuam sendo a modalidade preferida pelos consumidores. No entanto, esse tipo de entrega é uma das mais problemáticas em termos de custo e eficiência logística (Silva *et al*., 2024). Além disso, as EADs apresentam desvantagens tanto para os consumidores que demandam mais flexibilidade quanto para os entregadores que buscam otimizar as rotas de distribuição. Por isso, diversas iniciativas de *city logistics* têm sido desenvolvidas para oferecer alternativas mais sustentáveis e eficientes.

Uma das estratégias estudadas é a consolidação de entregas na última milha por meio de pontos de coleta e entrega automático: os *Delivery Lockers* (DLs), já implementados em diversos países (Silva *et al*., 2024; Alves *et al*., 2023). Essas estações consistem em armários automatizados nos quais os consumidores podem retirar ou devolver suas encomendas *online*, sem a necessidade de contato direto com o entregador.

Nesse cenário, os DLs surgem como uma solução promissora para a logística urbana. Segundo Niemeijer e Buijs (2023), essa modalidade reduz o número de paradas dos veículos de entrega e elimina a necessidade de reentregas, resultando na redução do consumo de combustível, custos operacionais e emissões de carbono. Alves *et al.* (2019) também apontaram que a utilização frequente dos DLs pelos consumidores representa uma alternativa altamente econômica para as transportadoras. No entanto, incentivar a adesão a esse sistema ainda é um desafio, já que muitos consumidores valorizam a conveniência da EAD. Além disso, um dos efeitos colaterais da adoção dos DLs é a geração de viagens exclusivas com veículos motorizados para a retirada das encomendas, o que pode comprometer os benefícios ambientais da proposta.

Por outro lado, cresce a conscientização dos consumidores quanto aos impactos ambientais de suas escolhas. Um estudo do Global Web Index (2018) mostra que metade dos *e-shoppers* considera as questões ambientais em suas decisões de compra. Compreender as atitudes, muitas vezes contraditórias, dos consumidores frente à

sustentabilidade do *e-commerce* é essencial para fomentar comportamentos mais responsáveis e mitigar os impactos negativos do setor para as atividades do TUC.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo avaliar o acesso dos consumidores aos *Delivery Lockers* e o uso de modos de transporte não motorizados, como caminhada e bicicleta, para a retirada de encomendas. A análise considera o papel da distância como fator determinante na escolha do meio de deslocamento. Para isso, utilizou-se um modelo de simulação baseado em agentes, a fim de investigar a viabilidade da adoção de alternativas sustentáveis no deslocamento até os pontos de coleta e sua contribuição para a redução dos impactos ambientais associados à última milha.

2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Este estudo utilizou a Modelagem e Simulação em ambiente computacional, seguindo os passos metodológicos propostos por Sargent (2013): (1) identificação do problema, (2) construção do modelo conceitual e (3) desenvolvimento do modelo computacional. A abordagem adotada foi a Modelagem e Simulação Baseada em Agentes (MSBA), considerada particularmente adequada para o estudo da logística urbana devido à sua capacidade de representar interações complexas entre múltiplos agentes e adaptar-se a ambientes dinâmicos e heterogêneos.

A simulação foi aplicada à região central da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, sendo delimitada pela Avenida do Contorno. Essa área foi selecionada por concentrar elevado volume de entregas de comércio eletrônico, alta densidade populacional e pela disponibilidade de dados reais sobre comportamento dos consumidores e operações logísticas.

O modelo desenvolvido contempla a interação entre quatro agentes principais: consumidores, lojas virtuais, transportadoras e *Delivery Lockers* (DLs). Dois perfis de consumidores foram considerados: aqueles que optam pela entrega domiciliar e aqueles que escolhem retirar seus pedidos em DLs, utilizando sempre o ponto de coleta mais próximo. Os DLs foram alocados preferencialmente em supermercados, conforme proporções observadas em estudos anteriores (Alves *et al.,* 2023; Neto e Vieira, 2023; Oliveira *et al.,* 2017).

As lojas virtuais agrupam os pedidos com base na capacidade dos veículos e em um tempo médio de espera de cinco dias. As transportadoras operam a partir de um centro de distribuição, utilizando caminhões com rotas definidas por meio do algoritmo do vizinho mais próximo. O modelo foi implementado na plataforma AnyLogic®, incorporando mapas georreferenciados (GIS) e variáveis logísticas relevantes, como tempo de parada, tempo de descarregamento e velocidade média urbana (12 km/h). Os parâmetros de entrada seguem as definições de Alves *et al*. (2023).

Para este estudo, foram selecionados dois cenários originalmente propostos por Alves *et al.* (2023), escolhidos com base em suas eficiências operacionais e econômicas. Ambos os cenários consideram uma demanda diária de 480 pedidos, com taxa de falha na primeira tentativa de entrega domiciliar estimada em 5%. Nesses casos, os pedidos não entregues são redirecionados ao DL mais próximo do cliente. A diferença entre os cenários está na taxa de adesão ao uso dos DLs: o Cenário 1 (C1) considera 22,5% de adesão, enquanto o Cenário 2 (C2) assume um valor de 45%.

A análise realizada neste estudo concentra-se no agente "consumidor", com ênfase na distância percorrida de sua residência até o DL mais próximo. Foram simuladas três situações distintas de comportamento dos consumidores: (1) Otimista, (2) Realista e (3) Pessimista. Cada situação representa diferentes relações entre a distância percorrida e a escolha do modo de transporte para acessar o DL, conforme apresentado na Tabela 1. Para distâncias superiores às faixas estabelecidas, considera-se a utilização de transporte motorizado. Os parâmetros adotados estão alinhados ao estudo de Niemeijer e Buijs (2023), que aponta que, respectivamente, pelo menos 50%, 70% e 80% dos consumidores optam por modos de transporte não motorizados (caminhada ou bicicleta) dentro de determinadas faixas de distância, nos cenários Otimista, Realista e Pessimista.

Tabela 1: Limites máximos de distância percorrida por modo de transporte ativo

	Otimista	Realista	Pessimista
Caminhada	600 m	400 m	200 m
Bicicleta	1.600 m	1.200 m	800 m

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a quantidade de pedidos para cada intervalo de distância percorrida, bem como uma curva de porcentagem acumulada. Além disso, os dados são categorizados conforme o modo de transporte de preferência do consumidor para retirar as suas mercadorias no DL, tendo como base os limites dos parâmetros dos cenários descritos na Seção 2.

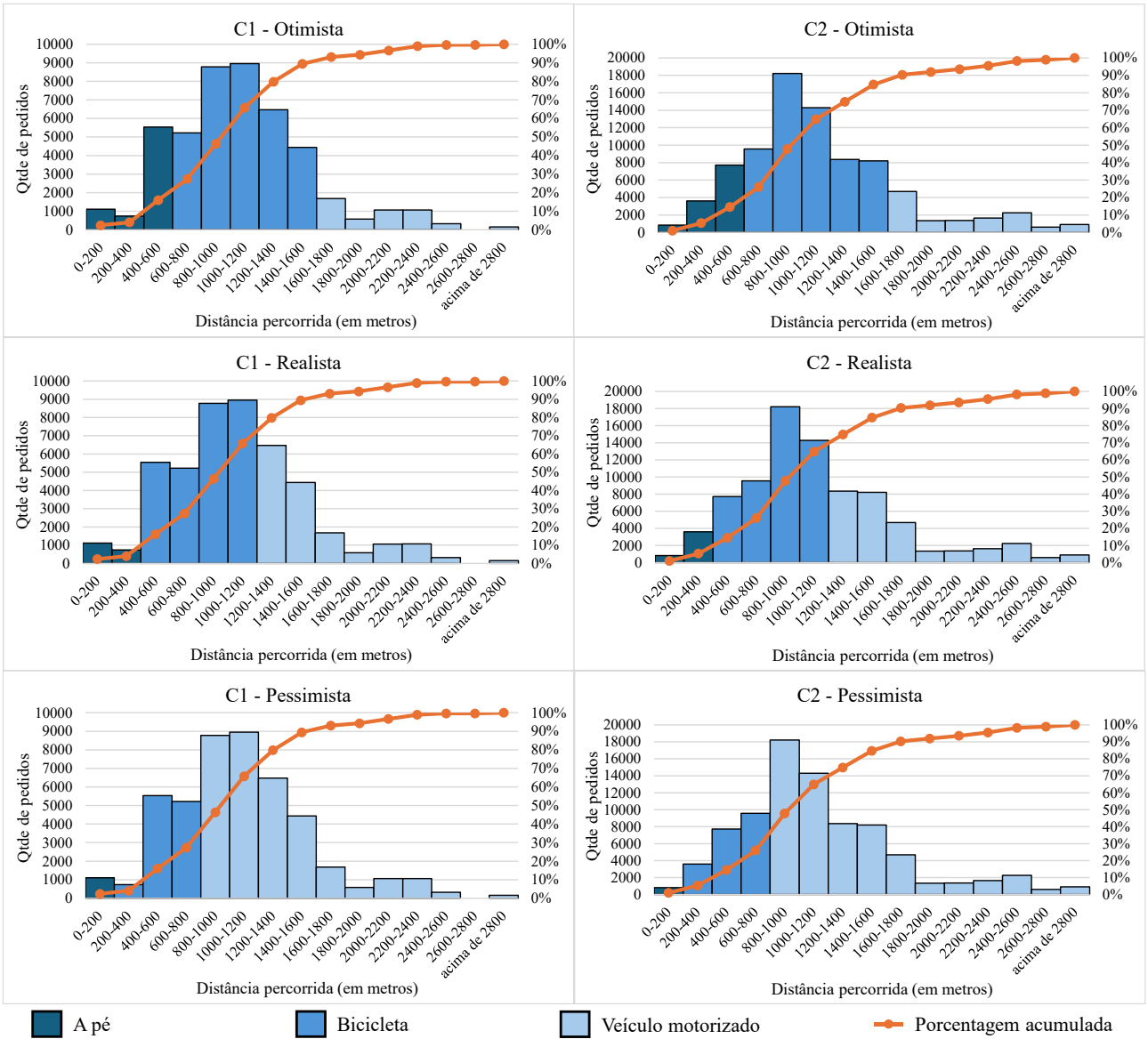


Figura 1: Distribuição da quantidade de pedidos por intervalo de distância percorrida até os DLs

De maneira geral, observa-se que a maior parte dos pedidos foram coletados por clientes que percorreram entre 400 e 1.600 metros. Em relação a quantidade de pacotes coletados, verifica-se que C2 apresenta uma quantidade maior de pedidos visto que esse cenário representa uma maior adesão dos clientes aos DLs quando comparado ao C1. Porém, ainda assim, o padrão de distribuição de distâncias se mantém semelhante entre os cenários C1 e C2.

Baseando-se em parâmetros otimistas, 16,0% e 14,5% dos consumidores estão dispostos a retirar suas mercadorias caminhando ao considerar os cenários C1 e C2, respectivamente. Esses valores aumentam para 89,4% e 84,7% para a adesão dos clientes ao uso de bicicletas. Nesse sentido, nota-se uma cobertura adequada da acessibilidade aos DLs sob a perspectiva de aspectos sustentáveis por meio da facilidade do uso de modos ativos, como a pé e bicicleta, em um contexto otimista.

Em contrapartida, esses números reduzem significativamente seguindo os parâmetros realistas, apresentando 4,0% (C1) e 5,3% (C2) dos consumidores preferindo retirar suas mercadorias a pé, enquanto 65,8% (C1) e 64,9% (C2) optam por usar bicicleta. Essa tendência é ainda mais evidente com os parâmetros pessimistas, nos quais apenas 2,4% (C1) e 1,0% (C2) dos clientes estariam dispostos a acessar os DLs caminhando e 27,3% (C1) e 26,0% (C2) de bicicleta.

Logo, conclui-se que a acessibilidade aos DLs depende altamente de quanto o consumidor está disposto a se locomover para retirar suas mercadorias. Além disso, esses resultados reforçam a importância do adequado planejamento da localização dos DLs, visando garantir não apenas eficiência operacional, mas também acessibilidade aos consumidores, principalmente em relação ao uso de veículos não-motorizados. Consequentemente, a adequada localização dos DLs resultaria em uma maior preferência dos clientes ao uso de modos de transportes ativos, trazendo maior sustentabilidade a todo o sistema dos DLs.

Além dos resultados quantitativos observados, é importante discutir as implicações práticas e estratégicas que emergem das simulações realizadas. Com relação ao comportamento do consumidor, torna-se importante entender se a resistência pelo uso de modos ativos de transporte pode estar diretamente relacionada a fatores urbanos como falta de segurança pública, iluminação inadequada, ausência de infraestrutura cicloviária e calçadas malconservadas, que aumentam a percepção de risco ou se trata simplesmente de uma não propensão ao uso de deslocamentos não motorizados. Mais uma vez se torna imprescindível estudos que investiguem esses fatores para auxiliar a formulação de políticas públicas para o favorecimento de modos não motorizados em diferentes contextos urbanos (Neto e Vieira, 2023; Oliveira *et al.,* 2017)

Nesse contexto, é fundamental considerar que o sucesso dos DLs como estratégia de última milha sustentável depende não apenas de sua localização, mas também do contexto urbano em que estão inseridos. A micromobilidade urbana — composta por modais como bicicletas, patinetes elétricos, entre outros — pode favorecer o uso dos DLs, desde que haja condições adequadas de infraestrutura, integração modal e segurança para os usuários (Le Pira *et al.,* 2025). Adicionalmente, como indicado por Holguín-Veras *et al.*, (2022) a adoção de campanhas educativas e políticas de incentivo pode ampliar a aceitação dos consumidores aos modos ativos, mesmo nos cenários menos favoráveis. Informações sobre os benefícios ambientais, prazos de entrega mais rápidos para quem opta pelos DLs, e descontos no frete são exemplos de estímulos que podem modificar o comportamento do consumidor, tornando-o mais engajado com soluções sustentáveis (Alves *et al.*, 2023). Tais iniciativas, somadas ao planejamento urbano centrado no pedestre e no ciclista, têm o potencial de transformar os DLs em infraestruturas estratégicas de logística urbana sustentável.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar o acesso dos consumidores aos DLs e o uso de modos de transporte não motorizados, como caminhada e bicicleta, para a retirada de suas encomendas. Para tanto, uma MSBA foi desenvolvida sendo analisada a partir de dois grupos de cenários considerando três situações distintas: (1) Otimista, (2) Realista, (3) Pessimista. Os principais resultados indicam que a distância entre a residência do cliente e o ponto de entrega (DL) é um determinante central na escolha do modo de transporte. Ainda que os cenários otimistas indiquem boa aceitação de caminhadas ou uso de bicicleta, os resultados dos cenários realistas e pessimistas revelam barreiras comportamentais e estruturais que limitam essa adesão, impactando diretamente a sustentabilidade dessa iniciativa.

Portanto, conclui-se que os benefícios dos DLs dependem não apenas da adesão dos consumidores ao seu uso, mas também da localização estratégica desses locais, buscando garantir que diferentes perfis de consumidores tenham acesso aos DLs por meio de modos de transportes acessíveis e sustentáveis. Para além de quantificar padrões de uso e deslocamento, os resultados deste estudo também evidenciam a necessidade de articulação entre políticas públicas, planejamento urbano e estratégias empresariais, com vistas a garantir a acessibilidade

segura e equitativa aos pontos de coleta. Dessa forma, um adequado planejamento das redes de DLs, aliado a uma abordagem sensível às características urbanas locais e integração entre os *stakeholders*, pode contribuir para um TUC mais eficiente, resiliente, equitativo e ambientalmente responsável.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, R.; R. S. Lima; D. C. Sena; A. F. Pinho e J. Holguín-Veras (2019) Agent-Based Simulation Model for Evaluating Urban Freight Policy to E-Commerce. *Sustainability*, v. 11, n. 15. DOI: 10.3390/su11154020.

Alves, R.; C. A. Pereira e R. da S. Lima (2023) Operational cost analysis for e-commerce deliveries using agent-based modeling and simulation. *Research in Transportation Economics*, v. 101. DOI: 10.1016/j.retrec.2023.101348.

Ewbank, H.; J. G. V. Vieira; J. J. Fransoo e M. A. Ferreira (2019) The impact of urban freight transport and mobility on transport externalities in the SPMR. *Transportation Research Procedia*, v. 46, p. 101-108. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.169.

Global Web Index. (2018). Sustainable packaging and consumer behavior. Londres: GlobalWebIndex.

Li, S.; J. Linn e Y. Meki (2020) Transportation and the environment in developing countries. *Annual Review of Resource Economics*, v. 12, p. 389-409. DOI: 10.1146/annurev-resource-110119-031524.

Le Pira, M.; M. Ignaccolo; G. Inturri e E. Cocuzza (2025) Innovative solutions to promote sustainable micromobility: insights from a literature review within the IN-MOB project. *Transportation Research Procedia*, v. 90, 967-974. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.06.016.

McKinnon, A. (2023) Environmentally sustainable city logistics: minimising urban freight emissions. In Marcucci, E., V. Gatta e M. Le Pira. Handbook on City Logistics and Urban Freight. Edward Elgar Publishing.

Melo, S. e P. Baptista (2017) Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: Integrating traffic, environmental and operational boundaries. *European Transport Research Review*, v. 9, n. 2. DOI: 10.1007/s12544-017-0246-8.

Mucowska, M. (2021) Trends of environmentally sustainable solutions of urban last-mile deliveries on the e-commerce market—a literature review. *Sustainability*, v. 13, n. 11. DOI: 10.3390/su13115894.

Neto, L. G. e J. G. V. Vieira (2023) An investigation of consumer intention to use pick-up points services for last-mile distribution in a developing country. *Journal of Retailing and Consumer Services*, v. 74. DOI: 10.1016/j.jretconser.2023.103425.

Niemeijer, R. e P. Buijs (2023) A greener last mile: Analyzing the carbon emission impact of pickup points in last-mile parcel delivery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 186. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113630.

Oliveira, L. K. de; E. Morganti; L. Dablanc e R. L. M. de Oliveira (2017) Analysis of the potential demand of automated delivery stations for e-commerce deliveries in Belo Horizonte, Brazil. *Research in Transportation Economics*, v. 65, p. 34-43. DOI: 10.1016/j.retrec.2017.10.004.

Sargent, R. (2013) Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, v. 7, n. 1, p. 12-24. DOI: 10.1057/jos.2012.20.

Silva, K. O. A. N.; R. S. Lima e R. Alves (2024) The Impacts of the Pandemic on Urban Freight Deliveries: a Case Study in a Brazilian Carrier. *International Journal of Simulation Modelling*, v. 23, n. 1, p. 65-76. DOI: 10.2507/ijsimm23-1-672.

Tassinari, F. (2024) Low emission zones and traffic congestion: Evidence from Madrid Central. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 185. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104099.

Zhao, P.; Z. Li; Z. Xiao; S. Jiang; Z. He e M. Zhang (2023) Spatiotemporal characteristics and driving factors of CO_2 emissions from road freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 125. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103983.

Ana Luiza Pimenta Giacchero (ana.giacchero@estudante.ufla.br)[1]
Cecília Aparecida Pereira (ceciliapereira_@hotmail.com)[2]
Jesimar da Silva Arantes (jesimar.arantes@ufla.br)[1]
Roberta Alves (robertaalves@ufla.br)[1]
Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br)[2]
[1]Universidade Federal de Lavras (UFLA), São Sebastião do Paraíso, MG, Brasil.
[2]Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Itajubá, MG, Brasil.

OTIMIZAÇÃO DA CADEIA LOGÍSTICA DA BANANA DA TERRA EM PALMIRA, COLÔMBIA

Natalia Tilano Pemberthy, Silvia Araujo dos Reis
Universidade de Brasília-UnB

RESUMO
Este estudo propõe um modelo de programação linear para maximizar o lucro líquido diário da cadeia de comercialização e transformação da banana da terra em Palmira, Colômbia. O modelo considera três localidades produtoras (Palmira, Rozo e Candelaria), três canais de venda (fresco, chips e farinha) e restrições de transporte, capacidade de processamento e demandas mínimas. A solução, obtida via Excel Solver, indica alocação ótima de produção e transporte, com lucro máximo de COP 236.100.000. A análise de sensibilidade evidencia gargalos logísticos e produtivos, sugerindo expansão da capacidade industrial e da frota de transporte. Os resultados fornecem subsídios para decisões estratégicas e políticas públicas voltadas à logística rural e ao desenvolvimento agroindustrial sustentável, demonstrando aplicabilidade prática do modelo em contextos com baixa infraestrutura.

Palavras-chave: programação linear, banana da terra, logística rural, análise de sensibilidade.

1. INTRODUÇÃO
A produção de banana da terra é uma atividade essencial para pequenos produtores no Valle del Cauca, Colômbia, especialmente nos municípios de Palmira, Rozo e Candelaria, contribuindo para a segurança alimentar e a geração de renda por meio da transformação agroindustrial (Tapiero Cuéllar, 2017). Contudo, a cadeia produtiva enfrenta limitações logísticas, baixa capacidade de processamento e dificuldades no escoamento da produção (Peña Cuellar et al., 2020).

A diversificação de canais de venda, como chips e farinha, amplia as oportunidades de lucro, mas exige gestão eficiente dos recursos produtivos e logísticos, respeitando restrições contratuais. A Programação Linear (PL) se destaca como ferramenta útil para alocar recursos sob múltiplas restrições (Hillier & Lieberman, 2015; Bertsimas & Tsitsiklis, 1997), especialmente em cadeias agroalimentares com produtos perecíveis (Ahumada & Villalobos, 2011). Casos em regiões com infraestrutura limitada, como o uso de mulas em zonas montanhosas, também já foram modelados com sucesso (Rodríguez Sepúlveda & Orrego, 2014).

Neste estudo, propõe se um modelo simples de PL, construído a partir de um caso fictício baseado em dados reais de aproximadamente 100 pequenas propriedades rurais. A consolidação dos dados em um modelo compacto permitiu representar de forma prática e realista a dinâmica da cadeia, preservando suas principais restrições e gargalos.

O modelo considera três localidades de produção (Palmira, Rozo e Candelaria) e três canais de comercialização (produto fresco, chips e farinha), incorporando restrições de transporte com mulas, capacidade de processamento e demandas mínimas contratuais.

Além da formulação matemática, são apresentadas análises de sensibilidade que permitem identificar gargalos produtivos e logísticos. Com isso, o estudo oferece subsídios técnicos para decisões de investimento, estratégias de desenvolvimento territorial e formulação de políticas públicas voltadas à valorização agroindustrial em regiões de baixa infraestrutura.

2. METODOLOGIA
O estudo foi desenvolvido com base em um caso fictício construído a partir de dados reais da cadeia de banana-da-terra no município de Palmira, Colômbia, envolvendo aproximadamente 100 pequenas propriedades rurais. Os dados coletados em relatórios técnicos foram consolidados em um modelo simplificado de Programação Linear (PL), de forma a preservar os elementos essenciais da cadeia produtiva, sem a complexidade de modelar individualmente cada propriedade.

2.1. Estrutura do modelo
O modelo considera três localidades de produção: Palmira, Rozo e Candelaria, e três canais de comercialização:

- Produto fresco,
- Chips de banana,
- Farinha de banana.

As variáveis de decisão representam o volume de banana alocado de cada localidade para cada canal.

2.2. Parâmetros considerados

Os parâmetros foram definidos a partir de médias e informações agregadas da literatura e de entrevistas com atores locais, incluindo:

- Disponibilidade de produção em cada localidade (toneladas/dia);
- Custos de transporte por quilômetro, diferenciando uso de caminhões e de mulas em áreas de difícil acesso;
- Capacidade de processamento para chips e farinha;
- Preço de venda em cada canal de comercialização;
- Demandas mínimas contratuais associadas a fornecedores locais.

2.3. Formulação matemática.

O modelo de PL tem como objetivo maximizar o lucro líquido diário da cadeia, considerando receitas de venda, custos de transporte e processamento.

2.4. Ferramenta computacional

O modelo foi implementado no Solver do Excel, por sua simplicidade e acessibilidade, permitindo replicação em contextos similares com baixo custo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

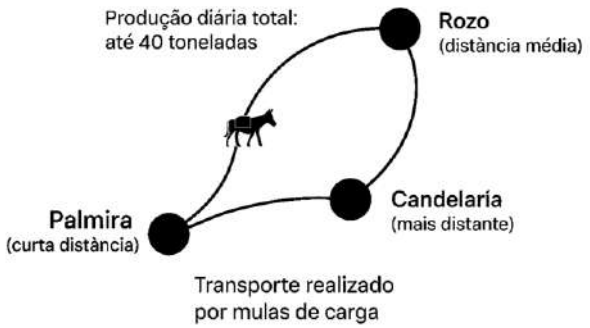
A cadeia logística da banana-da-terra em Palmira envolve três localidades produtoras Palmira, Rozo e Candelaria que fornecem até 40 toneladas diárias, com transporte realizado por mulas (15, 8 e 12 disponíveis, respectivamente). Toda a produção é destinada a Palmira, para três canais de comercialização: supermercados (fresco), indústria de chips e merenda escolar (farinha). Cada canal possui uma capacidade máxima e uma demanda mínima diária, além de diferentes receitas líquidas por tonelada: COP 2.500.000 (supermercados), COP 9.000.000 (chips) e COP 3.500.000 (farinha). O transporte por mula implica custos por unidade conforme a localidade: COP 200.000, 250.000 e 300.000 por dia para Palmira, Rozo e Candelaria, respectivamente.

3.1. Variáveis de decisão

O modelo define as seguintes variáveis de decisão:

- XFi, XCi, XHi: quantidades de banana da terra enviadas da localidade i=1,2,3 para os canais de supermercados, chips e farinha, respectivamente (em toneladas).
- Yi: número de mulas utilizadas na localidade i (inteiras, com capacidade de 1 t/dia).

Figura 1: Fluxo logístico da cadeia da banana da terra em Palmira (localidades, transporte e canais de comercialização).



Fonte: Elaboração própria (2025)

3.2. Função objetivo

A função objetivo busca maximizar o lucro líquido diário (Z), considerando receitas de venda, custos de transporte e de processamento:

(1)

$$Max\ Z = 2.500.000 * \sum_{i=1}^{3} XFi + 9.000.000 * \sum_{i=1}^{3} XCi + 3.500.000 * \sum_{i=1}^{3} XHi$$
$$-200.000*Yi - 250.000*Y2 - 300.000*Y3$$

A equação (1) mostra que os ganhos totais com as vendas em cada canal são reduzidos pelos custos logísticos diários do uso de mulas.

3.3. Restrições do modelo

O modelo está sujeito às seguintes restrições:

- Produção total diária.

(2)

$$\sum_{i=1}^{3} (XFi + XCi + XHi) \leq 40$$

- Capacidade de transporte (1 t/dia por mula).

(3)

$$XF1 + XC1 + XH1 \leq Y1,$$

(4)

$$XF2 + XC2 + XH2 \leq Y2,$$

(5)

$$XF3 + XC3 + XH3 \leq Y3$$

- Capacidade máxima de processamento por canal:

(6)

$$\sum_{i=1}^{3} XFi \leq 15,$$

(7)

$$\sum_{i=1}^{3} XCi \leq 20,$$

(8)

$$\sum_{i=1}^{3} XHi \leq 10$$

- Demandas mínimas por canal:

(9)

$$\sum_{i=1}^{3} XFi \geq 2,$$

(10)

$$\sum_{i=1}^{3} XCi \geq 8,$$

(11)

$$\sum_{i=1}^{3} XHi \geq 5$$

- Limites no número de mulas disponíveis:

$$Y1 \leq 15, \tag{12}$$

$$Y2 \leq 8, \tag{13}$$

$$Y3 \leq 12, \tag{14}$$

As variáveis de quantidade XFi, XCi, XHi≥0 são contínuas, enquanto as de mulas Yi∈Z+Yi (inteiras positivas).

3.4. Resultados ótimos

A Tabela 1 apresenta a solução ótima encontrada pelo modelo.

Tabela 1: Variáveis de decisão e valores ótimos

Variável	Interpretação	Valor ótimo (t ou un.)
XF1	Banana-da-terra fresca de Palmira	0
XF2	Banana-da-terra fresca de Rozo	0
XF3	Banana-da-terra fresca de Candelaria	5
XC1	Banana-da-terra para chips de Palmira	5
XC2	Banana-da-terra para chips de Rozo	8
XC3	Banana-da-terra para chips de Candelaria	7
XH1	Banana-da-terra para farinha de Palmira	10
XH2	Banana-da-terra para farinha de Rozo	0
XH3	Banana-da-terra para farinha de Candelaria	0
Y1	Mulas utilizadas em Palmira	15
Y2	Mulas utilizadas em Rozo	8
Y3	Mulas utilizadas em Candelaria	12

A solução ótima priorizou o canal de chips, seguido da farinha, enquanto o envio de produto fresco foi residual (Tabela 1). O lucro líquido diário máximo atingiu COP 236.100.000, com utilização total das 35 mulas disponíveis (1 t/dia), respeitando as restrições de capacidade e demandas mínimas.

Dois gargalos principais foram identificados: a capacidade limitada da indústria de chips (20 t/dia) e a disponibilidade restrita de transporte em Rozo e Candelaria. A análise de sensibilidade mostrou que investimentos nessas frentes gerariam os maiores ganhos marginais de lucro. Em contrapartida, restrições de produção total e demandas mínimas tiveram baixo impacto, indicando que estão ajustadas ao contexto local.

Além do aspecto econômico, a priorização de chips e farinha fortalece o emprego rural, a política de merenda escolar e a agregação de valor na cadeia. O uso de mulas, embora ambientalmente sustentável, limita a escala produtiva. Um sistema híbrido com transporte motorizado poderia equilibrar eficiência e sustentabilidade.

A consolidação de dados médios de cerca de 100 produtores permitiu representar a dinâmica da cadeia de forma simples e replicável, mas restringe a análise individualizada. Apesar dessas simplificações, o modelo reforça a pertinência da Programação Linear em cadeias agroalimentares de baixa infraestrutura, aproximando logística rural e transporte.

4. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a aplicação de Programação Linear à cadeia de banana-da-terra permite identificar alocações ótimas de recursos e canais de comercialização, maximizando o lucro líquido diário e garantindo o atendimento às restrições contratuais e logísticas. A priorização dos canais de chips e farinha evidencia o potencial de valorização da produção via agregação de valor e inserção em programas sociais.

Como contribuição prática, o modelo oferece subsídios tanto para produtores e associações locais quanto para gestores públicos, ao indicar gargalos críticos e sugerir investimentos prioritários em transporte e processamento. Do ponto de vista metodológico, a simplicidade do modelo implementado no Solver do Excel reforça sua replicabilidade em contextos similares da agricultura familiar latino-americana.

No entanto, algumas limitações devem ser destacadas. O modelo trabalha com médias agregadas, não captando a heterogeneidade entre as propriedades; não considera a sazonalidade da produção nem incertezas de demanda e preço; e restringe-se ao modal de transporte por mulas, desconsiderando alternativas complementares. Tais simplificações foram intencionais para viabilizar a aplicabilidade prática do estudo, mas reduzem sua capacidade preditiva. Futuras pesquisas podem ampliar a modelagem incorporando variabilidade estocástica, custos ambientais e estratégias cooperativas entre produtores.

Assim, embora limitado, o estudo reforça a relevância do uso de modelos de otimização como instrumentos de apoio à tomada de decisão, contribuindo para o fortalecimento da logística da agricultura familiar e para a integração entre objetivos econômicos, sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahumada, O.; J. R. Villalobos (2011) Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. International Journal of Production Economics, v. 133, n. 2, p. 677–687. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.05.015

Bertsimas, D.; J. Tsitsiklis (1997) Introduction to linear optimization. Athena Scientific.

Hillier, F. S.; G. J. Lieberman (2015) Introduction to operations research (10th ed.). McGraw-Hill Education.

Jena, S. D.; S. K. Ghosh; P. De (2019) Multi-objective optimization for agricultural supply chain under uncertainty. Computers and Electronics in Agriculture, v. 157, p. 366–380. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.048

Melo, M. T.; S. Nickel; F. Saldanha-da-Gama (2009) Facility location and supply chain management – A review. European Journal of Operational Research, v. 196, n. 2, p. 401–412. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.028

Peña Cuellar, R. D.; A. F. Vergara Gómez; M. M. Bonilla Morales; C. M. Caetano (2020) Valoración de plantas curativas comercializadas en los mercados locales de los municipios de El Cerrito y Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, v. 11, n. 1, p. 75–89. DOI: 10.22490/21456453.1334

Rodríguez Sepúlveda, L. J.; C. E. Orrego (2014) Towards green supply chain management in agricultural sector: Approach to logistic design for utilization of banana plantain pseudo stem fiber. Universidad Nacional de Colombia. Dissertação (mestrado). Disponível em: www.unal.edu.co (acesso em 15/09/2025).

Tapiero Cuéllar, J. L. (2017) Producción hortofrutícola del Valle del Cauca: Una alternativa de exportación y estrategia de posconflicto para la región. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales, v. 4, n. 1, p. 66–79. DOI: 10.23850/24220582.1365

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE ROTEAMENTO SUSTENTÁVEL DO TRANSPORTE DE CARGAS COM APLICAÇÃO DE SIG E NSGA-III NA MALHA VIÁRIA DO RIO DE JANEIRO

Jéssica Wanderley Souza do Nascimento[1], Cíntia Machado de Oliveira[2], Gabriel Nakalski Farias[1], Luís Eduardo Santos Fortes[1,2], Glaydston Mattos Ribeiro[1]

[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), [2]Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET/RJ)

RESUMO

Este estudo propõe um modelo de roteamento inteligente para otimizar, de forma sustentável, o transporte urbano de cargas na malha viária do Rio de Janeiro. Técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foram integradas a dados geoespaciais da infraestrutura viária e parâmetros logísticos para simular diferentes cenários de distribuição. A modelagem adotou uma abordagem de otimização multiobjetivo com o algoritmo evolutivo NSGA-III (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III*), gerando soluções de Pareto que alinham eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. Os critérios incluíram a minimização da distância total percorrida, do tempo de deslocamento e das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Os resultados indicaram que o modelo de roteamento proposto reduziu a distância total percorrida em 76,5% (−85,9 km), resultando em um ganho de 30,9% em eficiência logística e uma redução média de 33,1% nas emissões de CO_2 em comparação com o NSGA-II. Essas averiguações reforçam o potencial do modelo como uma ferramenta robusta e replicável para a gestão sustentável do transporte urbano de cargas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A logística urbana de cargas enfrenta desafios cada vez mais complexos, impulsionados pela crescente demanda por entregas, pela saturação da infraestrutura rodoviária e por requisitos ambientais cada vez mais rigorosos (Nascimento *et al*., 2025). No contexto da cidade do Rio de Janeiro, a interação entre a configuração geográfica heterogênea e os altos níveis de congestionamento intensifica os impactos ambientais do transporte de cargas, principalmente no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), conforme reportado pelo IPCC (2019).

Diante desse cenário, torna-se imprescindível adotar estratégias que aliem eficiência operacional e sustentabilidade ambiental (Shao *et al*., 2022). Nesse sentido, o roteamento inteligente, estruturado a partir de variáveis logísticas, espaciais e ambientais, quando integrado a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilita não apenas o traçado de rotas otimizadas, como também a mitigação dos impactos ambientais inerentes às operações de distribuição urbana (Wills *et al*., 2019).

Abordagens contemporâneas apontam que a roteirização inteligente com variabilidade controlada, associada a técnicas de otimização multiobjetivo e apoiada em SIG (considerando características da malha viária como extensão, velocidade média e fatores topográficos) pode resultar em reduções significativas nas emissões urbanas de CO_2 (Jabir *et al*., 2015; Guan *et al*., 2022). Apesar desses avanços, persistem lacunas metodológicas no panorama urbano brasileiro, sobretudo em áreas metropolitanas densamente povoadas, como o Rio de Janeiro, onde ainda são incipientes as aplicações em redes viárias complexas que combinem SIG e algoritmos de otimização evolutiva (Konstantakopoulos *et al*., 2020).

Nesse âmbito, o NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) consolidou-se como uma das principais ferramentas para a resolução de problemas de roteamento ambiental, especialmente no contexto do GVRP (*Green Vehicle Routing Problem*), devido à sua elevada capacidade de convergência e à manutenção da diversidade das soluções obtidas (Deb *et al*., 2002). Embora robusto para cenários bi ou triobjetivos, o NSGA-II denota limitações quando o número de objetivos ultrapassa três, uma vez que tende a perder seletividade e a gerar soluções com distribuição deficiente no fronte de Pareto (Chupin *et al*., 2025).

Com o intuito de superar tais limitações, foi proposto o NSGA-III, que incorpora um mecanismo de referência baseado em vetores direcionadores. Esse recurso garante maior dispersão e representatividade das soluções em problemas de alta dimensionalidade, nos quais múltiplos objetivos devem ser considerados simultaneamente. Assim, enquanto o NSGA-II é adequado para problemas de menor dimensionalidade, o NSGA-III revela-se mais apropriado para cenários complexos, propiciando a geração de soluções de Pareto equilibradas em três dimensões essenciais: distância total percorrida, tempo de deslocamento e emissões de CO_2 (Deb e Jain, 2014).

Além disso, convém destacar que a avaliação de algoritmos de otimização multiobjetivo não deve se restringir apenas aos indicadores de desempenho, mas também contemplar métricas de qualidade do conjunto de soluções, aspecto fundamental em estudos comparativos de algoritmos evolutivos, como o NSGA-II e o NSGA-III (Chaudhari *et al*., 2022).

Em virtude dos fatos mencionados, este estudo tem como objetivo desenvolver e aplicar um modelo de

roteirização inteligente baseado em SIG e otimização multiobjetivo por meio do algoritmo evolutivo NSGA-III, visando à minimização simultânea da distância total percorrida, do tempo total de deslocamento e das emissões de GEE no transporte urbano de cargas no Rio de Janeiro. A proposta busca oferecer uma ferramenta analítica robusta e adaptável para subsidiar decisões estratégicas em políticas públicas de mobilidade e gestão logística urbana sustentável.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em quatro etapas interdependentes que, de forma integrada, possibilitaram o desenvolvimento, a aplicação e a avaliação do modelo de roteamento inteligente no contexto urbano do Rio de Janeiro.

2.1. Coleta e processamento de dados geoespaciais

Inicialmente, foram coletados e estruturados os dados geoespaciais da malha viária urbana do município do Rio de Janeiro. Essa etapa consistiu na extração de informações de base de dados cartográficos e fontes de dados abertos, como o *OpenStreetMap* (OSM), complementados por dados registrados pela Companhia de Engenharia de Tráfego do Rio de Janeiro (CET-Rio), abrangendo o período entre 2018 e 2022. Os critérios considerados incluíram: classificação funcional das vias (hierarquia viária), número de faixas, sentidos de tráfego, limites de velocidade, presença de restrições de tráfego (zonas de restrição de caminhões, áreas escolares, zonas de carga e descarga) e a localização de polos geradores de carga (centros de distribuição, supermercados, centros comerciais e industriais). Posteriormente, os dados foram processados em um ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) QGIS 3.34.4 para garantir a topologia consistente das vias, a remoção de duplicatas e a padronização das geometrias.

2.2. Integração com dados operacionais de logística

A segunda etapa consistiu em incorporar os dados logísticos operacionais nos dados geoespaciais, criando assim uma base robusta para a simulação. As informações incluíram: volumes de entrega por destino, janelas de entrega (*time windows*), capacidade de carga dos veículos, frequência de rotas e tipos de veículos utilizados. Tais dados foram coletados a partir da análise de relatórios técnicos, como o Plano de Logística Urbana Sustentável do Rio de Janeiro (2019) e o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (IBAMA, 2021), além de estudos de caso disponíveis na literatura especializada, como Marujo *et al*., (2018). Essa integração possibilitou a construção de cenários realistas e aderentes às operações de transporte urbano de cargas.

2.3. Modelo matemático de otimização multiobjetivo

Com a base de dados devidamente consolidada, foram modelados matematicamente os diferentes cenários de roteirização, estruturando o problema como um Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Objetivos (*Multi-Objective Vehicle Routing Problem* – MOVRP). Para a sua resolução, foi implementado o algoritmo evolutivo NSGA-III (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III*), amplamente reconhecido por sua eficácia na geração de soluções não dominadas no contexto da Otimização Multiobjetivo, no qual possibilita a geração de soluções de Pareto.

A formulação adotada considerou, de forma simultânea, três critérios de otimização: (i) minimização da distância total percorrida; (ii) minimização do tempo total de deslocamento; e (iii) minimização das emissões de gases de efeito estufa (GEE). As emissões foram estimadas com base nos fatores de emissão estabelecidos tanto pelo IPCC (2019) quanto pelo Inventário Nacional de Emissões, tendo em vista variáveis como o tipo de veículo, a velocidade média operacional e as características da via.

A etapa final consistiu na calibração do modelo, com a definição de parâmetros-chave do algoritmo, como a taxa de cruzamento, a taxa de mutação e o número total de gerações, assegurando tanto a robustez quanto a convergência das soluções encontradas ao longo do processo evolutivo.

O modelo matemático considerou as seguintes variáveis (Equações 1, 2 e 3):

- Minimizar:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n} d_{ij} x_{ij} - distância\ total\ percorrida \quad (1)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n} t_{ij} x_{ij} - tempo\ total\ de\ deslocamento \quad (2)$$

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^{n} e_{ij} x_{ij} - emissões\ totais\ de\ GEE \quad (3)$$

- Sujeito a:

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall\, i \neq j \quad (cada\ cliente\ deve\ ser\ visitado\ uma\ vez)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, \quad \forall\, j \neq i \quad (cada\ cliente\ deve\ ser\ atendido\ por\ uma\ rota)$$

$$q_k \leq \mathrm{Q}, \quad (respeito\ à\ capacidade\ máxima\ dos\ veículos)$$

$$a_j \leq t_j \leq b_j, \quad (respeito\ à\ janela\ de\ tempo\ [a_j, b_j])$$

Onde: x_{ij} é a variável binária de decisão (1 se a rota do ponto i ao ponto j for utilizada, 0 caso contrário);

d_{ij} é a distância entre os pontos i e j;

t_{ij} é o tempo estimado de deslocamento entre os pontos i e j;

e_{ij} são as emissões estimadas de GEE no trajeto de i para j;

q_k é a carga atribuída ao veículo k;

Q é a capacidade máxima do veículo;

a_j, b_j são o início e fim da janela de tempo para o ponto j;

t_j são o tempo de atendimento no ponto j.

2.4. Comparação entre NSGA-II e NSGA-III

Por fim, foram realizados testes comparativos entre os algoritmos NSGA-II e NSGA-III implementados com parâmetros comuns de configuração, sendo que o NSGA-II utilizou a ordenação não-dominada associada ao *crowding distance*, enquanto o NSGA-III incorporou vetores de referência para maior dispersão em cenários de alta dimensionalidade. As simulações foram realizadas em cenários representativos de redes viárias urbanas, e os resultados foram avaliados usando critérios operacionais (distância, tempo e emissões) e métricas de qualidade das soluções (hipervolume, número de soluções não-dominadas e dispersão).

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a obtenção das séries espaciais e a integração das camadas temáticas (restrições de tráfego, altimetria, zonas de emissão), o algoritmo NSGA-III foi implementado utilizando a linguagem de programação Python® 3.13.5 com o suporte da biblioteca PyMoo e executado em ambiente computacional com processador Intel® Core™ i7-7500U (6 núcleos e 12 threads, 3,9 GHz), 16 GB de memória RAM, rodando em Microsoft Windows 11 (64 bits). Além disso, o código utilizou o solver PuLP® 2.9.0 para formulação e resolução do modelo de otimização e foi integrado a um sistema de geoprocessamento para extrair as variáveis relevantes nos pontos geográficos correspondentes às soluções propostas.

Com base nessas informações, as rotas otimizadas foram concentradas em vias arteriais de alto tráfego, notadamente a Avenida Brasil e a Linha Vermelha, evitando assim áreas sujeitas a maiores restrições ambientais, como o centro da cidade, zonas hospitalares e áreas adjacentes a instituições de ensino. A escolha dessas rotas se justifica não apenas pela sua capacidade de tráfego (com média de aproximadamente 170.000 veículos por dia na Avenida Brasil e 140.000 na Linha Vermelha) como também pela sua relevância logística e pelo impacto ambiental comparativamente menor associado ao seu uso. Além disso, a análise espacial indicou uma redução na sobreposição entre as rotas e uma distribuição geográfica mais equilibrada, resultando em uma malha logística mais eficiente com menor redundância operacional (Figura 1).

O algoritmo NSGA-III demonstrou desempenho superior ao NSGA-II em todos os critérios avaliados, alcançando reduções médias de 33,1% nas emissões de CO_2 e 76,5% na distância total percorrida (85,9 km), resultando em um ganho de 30,9% na eficiência logística. Em comparação, o NSGA-II apresentou reduções mais modestas, com 12,5% nas emissões, 11,8% na distância percorrida e 15,4% na eficiência logística. Tais

melhorias, diretamente associadas à adoção de rotas otimizadas em termos de topografia, fluxo de tráfego e áreas restritas, destacam a relevância do NSGA-III para contextos urbanos densamente povoados, como o Rio de Janeiro, onde o transporte é responsável por altos níveis de gases de efeito estufa, corroborando evidências de estudos anteriores, como os relatados por Konstantakopoulos *et al*. (2020), sobre o impacto positivo de modelos avançados de roteamento sustentável.

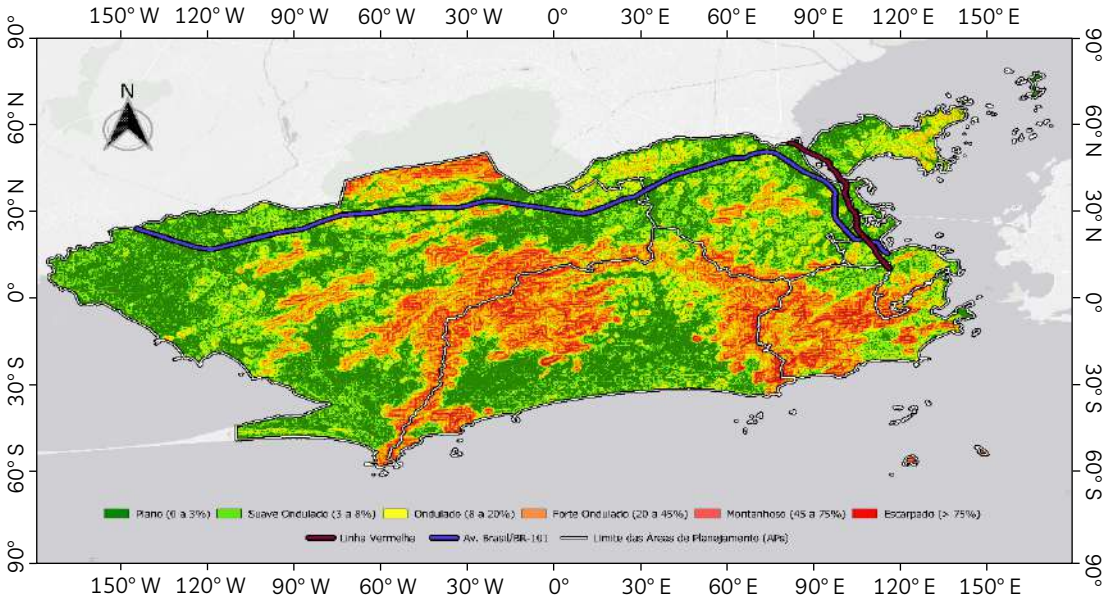


Figura 1: Declividade e topografia por meio do SIG

Na etapa subsequente da análise, a comparação entre os algoritmos evolutivos NSGA-II e NSGA-III evidenciou diferenças relevantes em termos de desempenho operacional e qualidade das soluções geradas. Para além dos indicadores práticos de redução da distância total percorrida, tempo de deslocamento e emissões de CO_2, a avaliação incorporou métricas consolidadas de otimização multiobjetivo, indispensáveis para aferir a distribuição, diversidade e convergência do fronte de Pareto (Tabela 1).

Tabela 1: Indicadores de qualidade do fronte de Pareto

Métrica	NSGA-II	NSGA-III
Hipervolume (HV)	0,68	0,82
nº de soluções não-dominadas	25	38
Espaçamento (Spread)	0,42	0,27
Tempo de convergência (iteração)	120	105
Diversidade do fronte de Pareto	Moderada	Alta
Escalabilidade (nº de objetivos)	Limitada (até 3)	Elevada (>3)

Os resultados evidenciam que o NSGA-III apresentou desempenho superior em todas as métricas de avaliação do conjunto de soluções. O Hipervolume (HV) atingiu um valor de 0,82, em comparação com 0,68 obtido pelo NSGA-II, demonstrando a capacidade do primeiro em explorar o espaço de busca de forma mais abrangente e conciliar objetivos conflitantes de forma mais eficaz. No que se refere ao Número de soluções não-dominadas, o NSGA-III produziu 13 soluções adicionais, ampliando a diversidade de alternativas disponíveis para a tomada de decisão.

Quanto ao Espaçamento (*Spread*), o menor valor registrado no NSGA-III (0,27) indica maior uniformidade na distribuição das soluções e menos ocorrência de lacunas no fronte de Pareto, o que reforça a qualidade da diversidade mantida pelo algoritmo. Por fim, no que concerne ao Tempo de convergência, o NSGA-III alcançou resultados mais robustos, demandando menos iterações para estabilizar o processo evolutivo, aspecto que destaca sua superioridade em termos de eficiência computacional.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação do modelo de roteirização inteligente desenvolvido neste estudo gerou avanços expressivos tanto no desempenho logístico quanto na sustentabilidade ambiental, considerando o contexto urbano da cidade

do Rio de Janeiro. A integração de dados geoespaciais da malha viária com parâmetros logísticos específicos, viabilizada pela aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em conjunto com o algoritmo NSGA-III, permitiu a construção de cenários operacionais realistas com alto potencial de replicabilidade em centros urbanos com características logísticas semelhantes.

Com relação aos resultados obtidos, observou-se uma redução significativa das emissões de CO_2, evidenciando a eficácia da roteirização inteligente tanto no enfrentamento às mudanças climáticas quanto na promoção da mobilidade urbana sustentável. Assim, o modelo proposto não se limita a ganhos quantitativos mensuráveis, mas se consolida como uma ferramenta estratégica de apoio à decisão, capaz de subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas para a gestão sustentável da logística urbana.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a incorporação de dados em tempo real aplicando tecnologias de Internet das Coisas (IoT), bem como a utilização de algoritmos de *Machine Learning* (ML) para predição de tráfego, visando ampliar a adaptabilidade e precisão dos modelos propostos.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CEFET/RJ, à FAPERJ e ao OPTGIS da COPPE/UFRJ pelo apoio institucional, financeiro e técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chaudhari, P. et al. (2022) Comparison of NSGA-III with NSGA-II for multi objective optimization of adiabatic styrene reactor. *Materials Today: Proceedings*, v. 57, n. 4, p. 1509-1514. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.047

Chupin, A. et al. (2025) Multi-objective optimization for intermodal freight transportation planning: a sustainable service network design approach. *Sustainability*, v. 17, n. 12, p. 5541. DOI: 10.3390/su17125541

Deb, K. et al. (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182-197. DOI: 10.1109/4235.996017

Deb, K. e Jain, H. (2014) An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 18, n. 4, p. 577-601. DOI: 10.1109/TEVC.2013.2281535

Guan, J. et al. (2022) Multi-objective optimization for sustainable road network maintenance under traffic equilibrium: Incorporating costs and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, v. 334, p. 130-103. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130103

IBAMA (2021) *Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários:* Ano-base 2019. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br>. Acesso em: 27 jun. 2025.

IPCC (2019) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories.

Jabir, E. et al. (2015) Multi-objective Optimization Model for a Green Vehicle Routing Problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 189, p. 33-39. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.03.189

Konstantakopoulos, G. D. et al. (2020) A multiobjective large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows. *Algorithms*, v. 13, n. 10, p. 243. DOI: 10.3390/a13100243

Marujo, L. G. et al. (2018) Assessing the sustainability of mobile depots: The case of urban freight distribution in Rio de Janeiro, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 62, p. 256-267. DOI: 10.1016/j.trd.2018.02.022

Nascimento, J. W. S. do. et al. (2025) An integrated intelligent routing approach for the sustainable optimization of urban freight transport in Rio de Janeiro. In *Anais do Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*. Vitória: CONTECC, 80ª SOEA, p. 1-5.

Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2019) *Plano de logística urbana sustentável do Rio de Janeiro*. Secretaria Municipal de Transportes. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Shao, C. et al. (2022) Multi-objective optimization of customer-centered intermodal freight routing problem based on the combination of DRSA and NSGA-III. *Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 2985. DOI: 10.3390/su14052985

Wills, W. *et al*. (2019) A simple sinuosity-based method using GPS data to support mitigation policies for public buses GHG emissions. *ArXiv, abs/1907.09335*. DOI: 10.48550/arXiv.1907.09335

Jéssica Wanderley Souza do Nascimento (jessica.souza@ufrj.br)
Gabriel Nakalski Farias (gabriel.farias@pet.coppe.ufrj.br)
Glaydston Mattos Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufrj.br)
Laboratório de Otimização e Sistemas de Informações Geográficas (OPTGIS) do Programa de Engenharia de Transporte (PET) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Avenida Horácio Macedo, 2030, Bloco I, Sala 244, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Cíntia Machado de Oliveira (cintia.oliveira@cefet-rj.br)
Luís Eduardo Santos Fortes (luis.fortes@cefet-rj.br)
Departamento de Engenharia de Produção, CEFET/RJ, Unidade Itaguaí – Rod. Gov. Mário Covas, BR-101, s/n – Santana, Itaguaí – RJ, 23812-101

Distribuição urbana de mercadorias

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

LOGÍSTICA DA ÚLTIMA MILHA: PERSPECTIVAS PARA MELHORAR AS ENTREGAS EM ÁREAS URBANAS QUANDO O DESTINATÁRIO ESTÁ AUSENTE

Ricardo Leonel da Silva, Renato da Silva Lima
Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
Este trabalho explora a logística da última milha, com foco em identificar os problemas e analisar soluções que otimizem as entregas em áreas urbanas, em especial, para os casos em que o destinatário se encontra ausente no momento da entrega. Pretende-se compreender as principais dificuldades enfrentadas neste estágio do processo logístico através de pesquisa bibliográfica e de entrevistas semiestruturadas com entregadores de empresas de e-commerce, bem com identificar e explorar tecnologias, estratégias e práticas que possam melhorar a eficiência e aumentar a satisfação dos clientes. O trabalho tem foco no Brasil e procura considerar a plena proteção conferida ao consumidor brasileiro pelo Código de Defesa do Consumidor que responsabiliza o fornecedor de forma objetiva, independente de dolo ou culpa por vícios e defeitos na cadeia de fornecimento.

1. INTRODUÇÃO

A logística da última milha representa um dos maiores desafios da cadeia de suprimentos moderna, especialmente, diante da crescente urbanização e da transformação digital do consumo. Em alguns países, como o Brasil, um problema recorrente e transversal à logística de última milha é a ausência do destinatário no momento da entrega, independentemente do tamanho da cidade. Essa situação, além de comprometer a experiência do consumidor, acarreta a necessidade de novas tentativas de entrega. Em um cenário de alta competitividade e margens estreitas, esse tipo de falha representa um problema crítico para empresas do setor (Mecalux, 2024). O crescimento exponencial do comércio eletrônico intensificou esse problema, ao passo que os consumidores passaram a exigir entregas mais rápidas, rastreáveis e personalizadas. Essa pressão por agilidade, aliada à rigidez da legislação brasileira, torna ainda mais delicada a gestão de entregas malsucedidas. Casos de avarias ou extravios, muitas vezes decorrentes de práticas improvisadas como o arremesso de pacotes sobre muros ou portões, podem resultar em sanções legais e danos à reputação da empresa (Brasil, 1990; Marshipping, 2024).

Nesse trabalho, a partir de entrevistas realizadas com entregadores atuantes na última milha, identificou-se que cerca de 10% das entregas encontram barreiras na primeira tentativa devido à ausência do destinatário. Em, aproximadamente, metade desses casos, o problema é resolvido por meio de contato direto com o cliente, que se desloca até o local da entrega ou aciona terceiros para o recebimento. Nos demais, os entregadores recorrem a estratégias arriscadas, como deixar o pacote com vizinhos ou lançá-lo sobre barreiras físicas. Quando há recusa por parte dos vizinhos, a entrega é considerada malsucedida, exigindo nova tentativa e gerando retrabalho. Esses problemas comprometem não apenas a eficácia das operações logísticas como também expõem as empresas a riscos legais e reputacionais, sobretudo diante da rigidez da legislação brasileira. Neste cenário, torna-se imperativo adotar soluções tecnológicas e operacionais que mitiguem os impactos da ausência do destinatário. Nesse contexto, o objetivo do trabalho é analisar e propor soluções logísticas aplicáveis à etapa da última milha, com foco na mitigação dos impactos causados pela ausência do destinatário, visando à melhoria da eficiência operacional, à redução de custos e ao aumento da satisfação do consumidor.

2. FUNDAMENTEAÇÃO TEÓRICA

2.1. Comércio Eletrônico, Última Milha e Transformações Logísticas

O comércio eletrônico tem promovido uma reconfiguração profunda nas cadeias logísticas, exigindo maior agilidade, rastreabilidade e personalização nas entregas. Segundo Matos (2024), "*a entrega tornou-se um produto em si, e o tempo de entrega, uma das principais bases de competição entre varejistas digitais*". Durante a pandemia da COVID-19. A infraestrutura logística do varejo eletrônico difere da tradicional por exigir maior capilaridade e descentralização. Conforme Santos *et al.* (2024), "*a logística do e-commerce demanda estruturas mais próximas do consumidor final, o que aumenta a complexidade operacional e os custos da última milha*". Além disso, o consumidor digital tornou-se mais exigente, esperando entregas rápidas, seguras e com possibilidade de rastreamento. Como destaca Santo *et al.* (2022), "*a etapa final da entrega é crucial para a satisfação do cliente, pois é o momento em que este tem o primeiro contato com o produto aguardado*". Ainda, segundo Matos (2024), *"a entrega tornou-se um produto em si, e o tempo de entrega, uma das principais bases de competição entre varejistas digitais"*. Essa mudança de paradigma impõe às empresas a necessidade de reestruturar suas operações logísticas para atender às novas expectativas dos consumidores.

2.2. Entrega Malsucedida por Ausência do Destinatário

A ausência do destinatário no momento da entrega é uma das principais causas de falhas na logística de última milha. Segundo dados levantados em campo nesse trabalho, cerca de 10% das entregas não são concluídas na primeira tentativa por ausência do destinatário. Esse dado é corroborado por Delage (2025), que afirma que *"a ausência do cliente é um dos fatores que mais impactam a eficiência das entregas urbanas".* Essa situação gera impactos operacionais significativos, como a necessidade de reentregas, aumento de custos e insatisfação do consumidor. Conforme Erpo (2025), "*motoristas frequentemente precisam realizar múltiplas tentativas de entrega, o que eleva os custos e compromete a experiência do cliente*". Além disso, há o risco de avarias e extravios quando práticas improvisadas são adotadas. Entre essas práticas, destacam-se o lançamento de pacotes sobre muros e a entrega a vizinhos, que, embora comuns, não garantem a segurança da mercadoria. Segundo Santos *et al.* (2024), "*a falta de protocolos padronizados leva os entregadores a adotarem estratégias arriscadas, que podem comprometer a integridade do produto*". Diante disso, torna-se urgente desenvolver soluções específicas para lidar com a ausência do destinatário. Como destaca Supersonic (2025), "*a comunicação em tempo real com o cliente e o uso de tecnologias de rastreamento são fundamentais para reduzir tentativas malsucedidas*".

2.3. Responsabilidade Objetiva nas Relações De Consumo

O Código de Defesa do Consumidor (CDC), instituído pela Lei nº 8.078/90, estabelece a responsabilidade objetiva dos fornecedores por danos causados ao consumidor, independentemente de culpa. Conforme o artigo 12 do CDC, "*o fabricante, o produtor, o construtor, nacional ou estrangeiro, e o importador respondem [...] pela reparação dos danos causados aos consumidores por defeitos decorrentes de [...] acondicionamento de seus produtos*" (Brasil, 1990). Essa responsabilidade se aplica às falhas na entrega, como avarias decorrentes de práticas inadequadas adotadas na ausência do destinatário. Segundo Nunes, "*a base da responsabilidade objetiva no CDC é o risco da atividade, ou seja, quem aufere lucro com a atividade econômica deve arcar com os riscos dela decorrentes*" (Nunes, 2011, p. 2). Essa tutela exige das empresas medidas preventivas, como treinamento de entregadores, padronização de procedimentos e uso de tecnologias que garantam a rastreabilidade das entregas. Conforme Jusbrasil (2025), "*a responsabilidade objetiva impõe ao fornecedor o dever de indenizar o consumidor, mesmo que o dano tenha sido causado por terceiros*".

2.4 Soluções para Entregas com Destinatário Ausente

Diversas soluções têm sido propostas para mitigar os impactos da ausência do destinatário na logística de última milha. Uma das mais promissoras é o uso de armários inteligentes (*smart lockers*), que permitem ao consumidor retirar sua encomenda em locais estratégicos e horários convenientes. Segundo a Drivin (2025), "*os lockers reduzem significativamente a taxa de insucesso nas entregas e aumentam a satisfação do cliente*". Outra estratégia eficaz é a implantação de centros de distribuição urbanos (*urban hubs*), que descentralizam a logística e aproximam os produtos do consumidor final. Esses centros permitem entregas mais rápidas, com menor custo e menor impacto ambiental, também facilitando a logística reversa (CARGOCENTER, 2025). Softwares de roteirização dinâmica, baseados em inteligência artificial, permitem planejar rotas mais eficientes e adaptáveis em tempo real. Aplicativos de rastreamento e comunicação direta com o entregador permitem ao consumidor ajustar sua disponibilidade, reduzindo tentativas malsucedidas (SUPERSONIC, 2025).

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida em duas etapas: (i) Levantamento de dados em pesquisa semiestruturada (ii) Pesquisa bibliográfica e documental. A primeira foi realizada através de uma investigação de campo, com entrevista de entregadores atuantes na cidade de Itajubá/MG, ligados a quatro plataformas de comércio eletrônico: Amazon; Mercado Livre; Loggi e TNT. As entrevistas buscaram identificar a frequência de entregas malsucedidas por ausência do destinatário, as estratégias adotadas pelos entregadores diante dessa situação e os desdobramentos operacionais decorrentes, entre os meses de abril e junho de 2025. Paralelamente, foi realizada uma pesquisa em publicações acadêmicas e publicações de empresas do setor logístico com objetivo de mapear soluções com foco na redução de falhas de entrega. Os dados qualitativos obtidos nas entrevistas foram analisados permitindo a categorização das respostas e a identificação de padrões de comportamento. Já os dados quantitativos foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados por meio de estatísticas descritivas.

4. RESULTADOS OBTIDOS: BARREIRAS, PRÁTICAS E SOLUÇÕES

A seguir, são explorados os principais elementos que contribuem para a recorrência de entregas malsucedidas, com destaque para a ausência do destinatário, a imprecisão dos aplicativos de rastreamento, as dificuldades em condomínios residenciais e as estratégias que podem ser adotadas para minimizar o problema.

4.1. Ausência do Destinatário e Impactos Operacionais

As entrevistas realizadas com entregadores revelaram que, em média, em 10% das entregas diárias – que variam entre 180 e 200 por profissional – p ocorre a ausência do destinatário. A recorrência desse problema evidencia a fragilidade do modelo atual de entrega domiciliar, especialmente em áreas urbanas. Na pesquisa bibliográfica realizada, não foram encontrados dados que identificam exclusivamente falhas nas entregas em razão da ausência do destinatário, apontando apenas falhas por motivos gerais. Segundo Carvalho (2025): "*Estudos apontam que a taxa média de falhas nas entregas B2C pode chegar a 20%"*. Esse percentual, inclui, além da ausência do destinatário, problemas com endereço incorreto ou incompleto, dificuldades de acesso ao local da entrega, defeitos no veículo da entrega, acidentes, ou outros relacionados ao entregador que, por motivos diversos, que não concluiu a entrega. Os dados corroboram a pesquisa de campo efetuada. A tabela 1 sintetiza essa percepção: (i) dificuldade identificada; (ii) frequência de ocorrência e (iii) observações.

Tabela 1: Principais dificuldades relatadas pelos entregadores

Dificuldade Identificada	Frequência	Observações
Janela de entrega muito ampla (ex: 12h às 20h)	Alta	Contribui para ausência do destinatário
Falta de porteiro em condomínios	Média	Depende da boa vontade de moradores
Comunicação limitada com o destinatário	Média	Algumas plataformas não permitem contato direto
Decisão arriscada de deixar encomenda no vizinho	Média	Pode gerar reclamações e prejuízos
Reclamações por danos ou extravios	Baixa	Em média, uma por mês por entregador

Fonte: *Dados das entrevistas realizadas pelo autor (2025).*

Constatou-se que um dos fatores que contribuem para essa ausência é a imprecisão na previsão do horário de entrega. Embora os aplicativos das plataformas informem o *status* da encomenda, a janela de entrega é demasiadamente ampla, entre 8:00h e 20:00h, o que inviabiliza que o consumidor permaneça disponível durante todo esse período. Além disso, a ausência de mecanismos de agendamento direto com o consumidor e a impossibilidade do destinatário se comunicar com entregador, quando já está na rota de entrega, limita a capacidade de planejamento tanto do consumidor quanto do entregador.

4.2. Barreiras em Condomínios e a Resistência dos Moradores

Outro fator recorrente identificado nas entrevistas foi a dificuldade de entrega em condomínios sem porteiro. A ausência de um responsável pela recepção das encomendas transfere a responsabilidade para os moradores, que muitas vezes se recusam a receber produtos. A resistência dos moradores em colaborar com o processo de entrega reflete uma lacuna na gestão condominial e na cultura de corresponsabilidade. A falta de regulamentação interna sobre o recebimento de encomendas e a ausência de espaços apropriados para armazenamento temporário agravam o problema.

4.3. Comunicação com o Destinatário: Limites e Potencial

As entrevistas também revelaram que a comunicação direta com o destinatário é a estratégia mais eficaz para contornar a ausência no momento da entrega. Algumas plataformas disponibilizam o número de telefone do cliente, permitindo contato direto via chamada ou aplicativos de mensagens. Outras, no entanto, intermediam a comunicação por meio do próprio sistema, entretanto, quando não há resposta do destinatário, o entregador se vê diante de decisões operacionais delicadas: deixar a encomenda com terceiros, arremessá-la sobre muros ou portões, ou retornar com o produto para nova tentativa, práticas temerárias que podem resultar em reclamações, avarias e necessidade de ressarcimentos. A média de uma reclamação por mês por entregador, conforme relatado, evidencia o impacto dessas decisões improvisadas.

4.4. Soluções Emergentes - Barreiras Culturais e Digitais

Diante da recorrência do problema, algumas plataformas têm investido na implantação de centros de distribuição regionais (*urban hubs*), especialmente em cidades de pequeno e médio porte. Nesses casos, a encomenda é direcionada a um ponto fixo, onde o consumidor realiza a retirada. Embora eficiente do ponto de vista logístico, essa solução enfrenta resistência cultural, pois muitos consumidores ainda preferem o recebimento domiciliar. Alternativa crescente é a instalação de armários inteligentes (*smart lockers*) em locais estratégicos, como shoppings, supermercados e estações de transporte. No entanto, sua adoção ainda é limitada a grandes centros urbanos e a perfis de consumidores mais familiarizados com tecnologia.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada evidenciou que a ausência do destinatário no momento da entrega é um dos principais fatores de insucesso logístico, afetando diretamente a eficiência, os custos e a experiência do consumidor. Apesar de as empresas de transporte e plataformas de comércio eletrônico considerarem essa ocorrência como uma margem de perda aceitável, sua recorrência compromete a sustentabilidade e a competitividade do serviço prestado. As entrevistas com entregadores revelaram que, mesmo com o avanço dos sistemas de rastreamento e notificação, a imprecisão na previsão do horário de entrega, aliada à ausência de mecanismos eficazes de comunicação, contribui para o desencontro entre entregador e destinatário. Além disso, a crescente adoção de condomínios sem porteiros e a resistência cultural à retirada de encomendas em pontos alternativos agravam o problema, exigindo soluções mais adaptadas à realidade urbana brasileira. É necessário que as empresas deixem de tratar a ausência do destinatário como uma externalidade tolerável. A implantação de centros de distribuição regionais, armários inteligentes e, sobretudo, o aprimoramento das ferramentas de comunicação, com destaque para tecnologias de rastreamento offline e alertas em tempo real, são caminhos promissores. É importante evidenciar que a questão impacta a sustentabilidade na gestão da cadeia de suprimentos, em especial no *last mile*. Assim, este estudo reforça a necessidade de uma abordagem sistêmica e centrada no consumidor para a logística de última milha, de forma mitigar os problemas da. A superação dos problema da ausência do destinatário no momento da entrega.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro aos projetos que subsidiaram esse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil (1990). Lei nº 8.078, de 11 de setembro de 1990. Código de Defesa do Consumidor. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 12 set. 1990.

Cargocenter (2025). Last Mile Delivery: desafios e soluções para a última milha do transporte de cargas. Disponível em:https://www.cargocenter.com.br/blog/last-mile-delivery-desafios-e-solucoes/. (acesso em 16/06/2025).

Carvalho, P. (2025). Logística de Última Milha: Desafios e o Crescimento dos Custos ao Longo do Tempo. Disponível em: https://logfeed.com.br/artigos/last-mile/logistica-de-ultima-milha-desafios-e-o-crescimento-dos-custos-ao-longo-do-tempo/. (acesso em 10/07/2025).

Delage (2025). Entrega da última milha: o que fazer para superar os desafios e ser mais eficiente. Disponível em: https://www.delage.com.br/blog/entrega-da-ultima-milha/. (acesso em 10 /06/2025).

Drivin (2025). O que é a última milha na logística? Guia atualizado sobre entrega e soluções. Disponível em: https://driv.in/pt/blog/o-que-e-a-ultima-milha-na-logistica/. (acesso em 10/06/2025).

Erpo (2025). Os desafios da última milha na logística e como superá-los. Disponível em: https://www.erpo.com.br/blog/desafios-da-ultima-milha/. (acesso em 15/06/2025).

Jusbrasil. Responsabilidade objetiva no CDC: entenda como funciona. Disponível em: https://www.jusbrasil.com.br/artigos/responsabilidade-objetiva-no-cdc. (acesso em 10/06/2025).

Marshipping. (2024). A influência da legislação brasileira na logística nacional. Disponível em: https://marshipping.com.br/legislacao-brasileira-na-logistica-nacional/. (acesso em 10/06/2025).

Matos, D (2024). Do armazenamento à última milha da entrega: a logística do comércio eletrônico no Brasil. Observatório das Metrópoles, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/logistica-ecommerce/. (acesso em 05/06/2025).

> Citação direta: “a entrega tornou-se um produto em si, e o tempo de entrega, uma das principais bases de competição entre varejistas digitais” (MATOS, 2024, p. 3).

Mecalux. (2024). IA na logística de última milha: inovação no gerenciamento de rotas e entregas. Disponível em: https://www.mecalux.com.br/artigos-logistica/gerenciamento-rotas-ultima-milha-ia-matthias-winkenbach. (acesso em 16/06/2025).

Nunes, R. (2011) A base da responsabilidade objetiva no Código de Defesa do Consumidor: o risco da atividade. Migalhas, São Paulo, 2011. Disponível em: https://www.migalhas.com.br/depeso/136456/a-base-da-responsabilidade-objetiva-no-codigo-de-defesa-do-consumidor. (acesso em 20/06/2025).

Santo, A.L.S do; Sarah C.D.; Kaio R.P.M. e Karine S. (2022). Última milha: as alternativas de entrega diante do e-commerce. EnGeTec – Revista de Engenharia e Tecnologia, FATEC Zona Leste, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 45–58, 2022. Disponível em: https://www.fateczl.edu.br/engetec/engetec_2021/4_EnGeTec_paper_21.pdf/. (acesso em 16/06/2025).

Santos, K. C. S. de O (2024). Sustentabilidade no processo logístico de última milha: um estudo de escopo. Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufcat.edu.br/handle/123456789/2024/. (acesso em: 20/06/2025).

Simpliroute (2025). Roteirização de última milha: como garantir entregas rápidas e eficientes. Disponível em: https://simpliroute.com/pt/blog/roteirizacao-de-ultima-milha. (acesso em 20/06/2025).

PLANEJAMENTO DA ÚLTIMA MILHA: ESTUDO DE DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS EM ENTREGAS DO *E-COMMERCE*

Gabriela Buzzi Ribeiro[1], **Renato da Silva Lima**[2]
[1]Universidade de São Paulo [2]Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
A última milha, etapa de entrega do produto ao cliente final, é fundamental para a logística e altamente influenciada por condições operacionais. Esta pesquisa avalia como diferentes fatores – tipo de veículo, combustível e velocidade — influenciam nos custos e nas emissões de CO_2, visando apoiar a tomada de decisão no planejamento logístico urbano. As simulações são baseadas em dados reais de uma empresa de e-commerce do Rio de Janeiro, processados no software OPTMILE. Foram analisados 16 cenários, combinando dois veículos (carro de passeio e Fiorino), dois combustíveis (gasolina e etanol) e quatro velocidades médias (15 a 30 km/h). Conforme esperado, os resultados mostraram que o etanol apresentou vantagens ambientais e econômicas, e que veículos menores foram mais eficientes em contextos de baixa demanda. Ainda, os resultados mostraram que a combinação de escolha de combustível e veículo pode minimizar aproximadamente 80% dos custos variáveis e 390% dos impactos ambientas.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte de cargas é uma das principais atividades que consomem energia por meio de combustíveis, o que a torna um importante emissor de gases do efeito estufa (GEE). No ano de 2023, as emissões de transportes chegaram a seu recorde histórico, com 224 Mt-CO_2, equivalente a aproximadamente 9,5% das emissões totais do país (SEEG, 2024). No ambiente urbano, o transporte de mercadorias é indispensável para suprir as demandas de moradores e empresas na cidade. Entretanto, suas atividades impactam negativamente a qualidade de vida no meio urbano, tanto em relação a poluição do ar, como no aumento dos níveis de congestionamentos e ruídos (Crainic, Ricciardi E Storchi, 2004). Vale ressaltar também que com o crescimento do comércio eletrônico B2C (Business to Consumer), mais entregas são realizadas, aumentando ainda mais os desafios logísticos existentes, já que cada compra online está associada a uma entrega (Lauenstein e Schank, 2022; De Oliveira, 2023).

A logística de última milha (*last mile*), etapa em que a mercadoria chega ao seu destino final, é considerada a etapa mais cara e desafiadora da cadeia de suprimentos (Mingozzi E Toth, 1981). No Brasil, essa fase representa aproximadamente 45% dos custos logísticos em empresas de e-commerce, sendo marcada por baixas velocidades médias, baixos índices de ocupação dos veículos e frequentes partidas e paradas (Allen *et al.*, 2018; ILOS, 2020). Sendo assim, o planejamento de rotas na entrega de mercadorias nas cidades se faz um componente essencial para a eficiência e a sustentabilidade da logística urbana (Cattaruzza *et al.*, 2017).

Desde 2010, observa-se um crescimento significativo nas pesquisas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa no transporte de cargas, indicando uma maior atenção à sustentabilidade no setor (Moghdani et al., 2021; Nielsen et al., 2024). No entanto, Dündar, Ömürgönülşen e Soysal (2021), ao revisarem estudos sobre roteirização urbana sustentável, apontam que a dimensão ambiental e ainda é menos abordadas em comparação à econômica. Bektas e Laporte (2011) introduzem o *Pollution-Routing Problem* (PRP), uma extensão do VRP que incorpora custos ambientais ao planejamento logístico, considerando fatores como carga, velocidade e janelas de tempo. Outros termos são usados para descrever problemas semelhantes, como *eco-routing* e GVRP (Sabet e Farooq, 2022).

Asghari e Al-Elhashem (2021) classificam os estudos com base no tipo de propulsão dos veículos, abrangendo motores de combustão interna, combustíveis alternativos e veículos elétricos híbridos. Além do tipo de propulsão, outros fatores operacionais também influenciam a pegada de carbono na última milha, como a topografia das rotas, a altitude, o tráfego e as características dos veículos (Velázquez-Martínez, 2019). Esses aspectos físicos e ambientais devem ser considerados de forma integrada ao planejamento logístico para reduzir as emissões de CO_2 nas cidades (Velázquez-Martínez et al., 2016).

Assim, o objetivo desta pesquisa é analisar como algumas combinações de aspectos operacionais, como velocidade, combustível e capacidade do veículo, pode influenciar na eficiência da última milha, tanto no âmbito ambiental quanto financeiro. Nesse contexto, esta pesquisa se justifica pela necessidade de incluir

critérios ambientais no planejamento da última milha, por meio da análise de cenários que auxiliem na tomada de decisão sobre rotas mais eficientes e sustentáveis, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

2. METODOLOGIA

Para analisar a operação logística no quesito ambiental e financeiro, buscando equilibrar estas duas dimensões, esta pesquisa utilizou dados de entrega de uma empresa B2C da cidade do Rio de Janeiro referentes a três meses de vendas, os quais foram processados no software OPTMILE – Ferramenta de Otimização de Última Milha – desenvolvido pela empresa INPO. O software fornece embasamento técnico para suporte a decisões estratégicas e táticas relacionadas ao planejamento da última milha e é capaz de considerar diversos aspectos da operação, como sazonalidade de vendas, trânsito, variabilidade diária dos tipos de pedidos com variação de *drop size*, restrições de circulação em grandes regiões urbanas, entre outros (INPO, 2025).

A geração dos cenários foi realizada a partir da modificação dos parâmetros dos dados de entrada no OPTMILE, simulando diferentes possibilidades operacionais, que consideraram: (i) diferentes tipos de veículos, com diferentes parâmetros operacionais de custo e capacidade de carga; (ii) diferentes combustíveis – gasolina e etanol e; (iii) diferentes valores de velocidade média operacional (15, 20, 25 e 30 km/h), a fim de representar distintas condições de tráfego urbano. Considerou-se uma carga horária de oito horas diárias para todos os cenários. Os custos operacionais de cada cenário são obtidos diretamente a partir das simulações realizadas no software. Já o cálculo das emissões de CO_2 foi conduzido de forma complementar, considerando as especificidades técnicas de cada configuração simulada, como eficiência energética e fator de emissão por tipo de combustível. A partir dos resultados de custo e emissões, realizou-se análises de regressão linear múltipla, com o auxílio do software aberto RStudio, com o objetivo de identificar os principais fatores que influenciam as emissões de CO_2 no planejamento da última milha. Considerou-se estatisticamente significativo qualquer p-valor menor que 0,05, de modo a rejeitar a hipótese nula de ausência de efeito.

3. RESULTADOS

Para os primeiros testes, foram considerados dois tipos de veículos para a realização das entregas: carro de passeio (CP) e Van Leve (VL), visto que estes são veículos comuns para entregas urbanas de pacotes. Ambos os veículos podem ser operados com gasolina ou etanol, e foram avaliadas quatro velocidades médias: 15, 20, 25 e 30 km/h. Quanto aos custos variáveis atribuídos a cada veículo, considerou-se o preço médio da gasolina (G) e do etanol (E) no Brasil, sendo R$ 6,23/litro e R$ 4,13/litro, respectivamente (ANP, 2025). Em relação à eficiência energética, para o carro de passeio, foram adotados os valores de 15,3 km/l com gasolina e 10,8 km/l com etanol. Para a Van Leve, considerou-se uma eficiência de 12,4 km/l com gasolina e 8,7 km/l com etanol (INMETRO, 2025). Além disso, no que diz respeito às emissões de CO_2 associadas ao consumo de combustível, foram utilizados os fatores de emissão de 1,792 kg/l para gasolina e 0,318 kg/l para etanol (MCTI, 2022). A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados preliminares do planejamento da última milha nos 16 cenários simulados.

A utilização do etanol como combustível se mostrou vantajosa do ponto de vista ambiental, uma vez que seu fator de emissão é aproximadamente 80% inferior ao da gasolina, conforme reconhecido na literatura. Além disso, o etanol também apresentou vantagem econômica relativa, dada a diferença média de preços entre os combustíveis observada no cenário nacional (ANP, 2025). Torna-se importante ressaltar que os valores de referência dos preços dos combustíveis utilizados são médias nacionais, podendo variar o resultado conforme a região do país. Do ponto de vista operacional, os veículos de menor porte (carro de passeio) se mostraram mais adequados à demanda simulada, pois possibilitaram maior média de ocupação, alcançando até 100% da capacidade em diversos cenários. Isso resulta em maior eficiência operacional, com melhor aproveitamento da frota e diluição dos custos por unidade transportada. Assim, em contextos de baixa a média demanda por viagem, o uso da Van Leve revelou-se menos eficiente.

Neste sentido, observa-se que em todas as faixas de velocidade, os cenários com veículos do tipo carro de passeio movidos a etanol se mostraram mais vantajosos do ponto de vista financeiro e ambiental. Entretanto, ao comparar os custos variáveis de todos os cenários entre si, percebe-se que as melhores opções nem sempre estão relacionadas a esta combinação, sendo que os quatro cenários de menor custo variável total são: C14, C2, C13 e C1, respectivamente. Esta situação pode ser explicada por um menor consumo total de combustível em velocidades menores, visto que os veículos percorrem menores distâncias por dia. A presença dos cenários

C2 e C1 entre os mais econômicos demonstra que, embora o uso do etanol contribua para a redução de custos, o tipo de veículo (carro de passeio) exerce papel ainda mais decisivo na formação do custo variável total. Além disso, é importante destacar que o aumento da frota exigida em velocidades menores não impacta diretamente os custos variáveis, uma vez que estes estão associados apenas ao consumo de combustível, e não à aquisição ou manutenção de veículos.

Tabela 1: Resumo dos cenários de planejamento da última milha

Cenário	Veículo	Combustível	Velocidade	Frota	Custos Variáveis (R$)	Aumento relativo à melhor opção financeira	Emissões de CO_2 (kg)	Aumento relativo à melhor opção ambiental	Média de Ocupação
C1	CP	G	15	13	36.732,63	9,40%	10.482,24	309,34%	0,94
C2	CP	E	15	13	34.044,87	1,40%	2.598,16	1,46%	0,94
C3	VL	G	15	12	60.011,52	78,74%	12.518,11	388,85%	0,49
C4	VL	E	15	12	57.421,56	71,02%	3.194,28	24,74%	0,49
C5	CP	G	20	12	41.909,62	24,82%	10.356,45	304,43%	0,99
C6	CP	E	20	12	39.254,12	16,91%	2.566,98	0,24%	0,99
C7	VL	G	20	11	55.753,24	66,05%	12.270,55	379,18%	0,54
C8	VL	E	20	11	53.214,50	58,49%	3.131,11	22,27%	0,54
C9	CP	G	25	8	41.460,14	23,48%	10.331,25	303,45%	1,00
C10	CP	E	25	8	38.811,11	15,59%	2.560,74	0,00%	1,00
C11	VL	G	25	8	42.186,63	25,65%	12.234,12	377,76%	0,56
C12	VL	E	25	8	39.655,43	18,11%	3.121,81	21,91%	0,56
C13	CP	G	30	7	36.226,02	7,89%	10.337,67	303,70%	1,00
C14	CP	E	30	7	33.575,34	0,00%	2.562,33	0,06%	1,00
C15	VL	G	30	7	42.018,02	25,15%	12.185,23	375,85%	0,57
C16	VL	E	30	7	39.496,94	17,64%	3.109,33	21,42%	0,57

Ainda, a velocidade média mostrou-se uma variável determinante para o atendimento da demanda, dado o limite diário de 8 horas de operação. Ou seja, velocidades mais elevadas ampliam a demanda atendida por veículo, impactando diretamente na quantidade de entregas possíveis por viagens. No entanto, os resultados do modelo de regressão linear múltipla indicaram que as variáveis custo variável total ($p = 0,945$) e velocidade média ($p = 0,741$) não apresentaram influência estatisticamente significativa sobre as emissões totais de CO_2 no intervalo observado. Isso reforça que, em operações de curta distância como a última milha, a escolha do combustível e do tipo de veículo são os principais determinantes do impacto ambiental, enquanto ajustes marginais nos custos ou velocidades operacionais oferecem benefícios limitados sob essa perspectiva.

4. CONCLUSÕES

Diante de sua complexidade e altos custos, a logística de última milha exige estratégias que conciliem eficiência operacional e sustentabilidade no contexto urbano. Nesse sentido, a simulação de diferentes configurações logísticas permite apoiar decisões estratégicas relacionadas à escolha de veículos, tipos de combustível e modos de operação, com o objetivo de reduzir tanto os custos quanto os impactos ambientais no transporte de cargas nas cidades. A análise dos 16 cenários simulados para operações de última milha permitiu identificar os principais fatores que influenciam os custos variáveis e as emissões de CO_2 em contextos urbanos de curta distância. Os resultados demonstraram que a escolha do tipo de combustível e do veículo exerce impacto mais significativo sobre o desempenho ambiental e econômico da operação do que a velocidade média ou a dimensão da frota.

Observa-se que o cenário de menor custo (C14) não é o mesmo que o cenário de menor emissão de CO_2 (C10). No entanto, ao se considerar a diferença relativa entre os dois — com uma variação de apenas 0,06% nas emissões e 15,59% nos custos variáveis — conclui-se que o cenário C14 representa a melhor opção geral, por oferecer o melhor equilíbrio entre ganhos financeiros e ambientais. Assim, esses resultados fornecem subsídios

importantes para o planejamento logístico urbano, evidenciando que é possível alcançar ganhos simultâneos em custo e emissões por meio de decisões integradas sobre tecnologia veicular, combustível e organização da frota.

Por fim, destaca-se a importância de uma abordagem integrada e orientada por dados para o planejamento da última milha, incorporando critérios econômicos e ambientais na análise de cenários. Dessa forma, torna-se possível atender simultaneamente às demandas de gestores urbanos e operadores logísticos, promovendo decisões que equilibrem custos financeiros e impactos ambientais.

Agradecimentos
Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento que viabilizou a produção dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., & McLeod, F. (2018). *Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 61, 325–338. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020

ANP. (2025). *Levantamento de Preços de Combustíveis*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. https://www.gov.br/anp

Asghari, M., Ghodratnama, A., Iranpour, D., & Ghatee, M. (2021). *Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review*. International Journal of Production Economics, 231, 107899. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899

Bektas, T., & Laporte, G. (2011). *The pollution-routing problem*. Transportation Research Part B: Methodological, 45(8), 1232–1250. https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004

Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). *Vehicle routing problems for city logistics*. EURO Journal on Transportation and Logistics, 6(1), 51–79.

Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2004). *Advanced freight transportation systems for congested urban areas*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 12(2), 119–137. https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.07.002

De Oliveira, M. A. (2023). *Logística aplicada ao e-commerce*. São Paulo: Editora Senac São Paulo.

Dündar, H., Ömürgönülşen, M., & Soysal, M. (2021). *A review on sustainable urban vehicle routing*. Journal of Cleaner Production, 285, 125444. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125444

ILOS. (2020) *Desafios e soluções do Last Mile urbano*. ILOS Report.

INMETRO. (2025). *Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. https://www.gov.br/inmetro

Lauenstein, S., e Schank, C. (2022). *Design of a sustainable last mile in urban logistics—A systematic literature review*. Sustainability, 14(9), 5501. https://doi.org/10.3390/su14095501

MCTI. (2002). *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatórios de Referência*. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/5266

Moghdani, R., Jabbarzadeh, A., & Fahimnia, B. (2021). *The green vehicle routing problem: A systematic literature review*. Journal of Cleaner Production, 279, 123691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691

Nielsen, P., Dahanayaka, M., Perera, H. N., Thibbotuwawa, A., & Kilic, D. K. (2024). *A systematic review of vehicle routing problems and models in multi-echelon distribution networks*. Supply Chain Analytics.

SEEG. (2024*). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970–2023)*. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – Observatório do Clima. https://seeg.eco.br

Velázquez-Martínez, J. (2019). *Mexican retailer Coppel travels alternative route to a fuel-efficient last mile. Trellis*. https://trellis.net/article/mexican-retailer-coppel-travels-alternative-route-fuel-efficient-last-mile/

Velázquez-Martínez, J. C., Fransoo, J. C., Blanco, E. E., & Dekker, R. (2016). *A new statistical method of assigning vehicles to delivery areas for CO_2 emissions reduction*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 43, 133–144.

Gabriela Buzzi Ribeiro (gabuzzi@usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos - SP, 13566-590.
Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)/ Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG). Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903.

Distribuição urbana de mercadorias

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ENTREGAS NOTURNAS NA LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA DO E-COMMERCE BRASILEIRO: UM ESTUDO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES

Ana Luiza Pimenta Giacchero , Jesimar da Silva Arantes , Roberta Alves
Universidade Federal de Lavras

RESUMO
O objetivo deste estudo foi analisar o uso de *Delivery Lockers* como forma de viabilizar a entrega noturna no e-commerce. Foi utilizado a modelagem e simulação baseada em agentes como método de estudo, foram simulados 264 cenários alternando: diferentes cargas, quantidade de caminhões e níveis de adesão aos *DLs*. Os resultados mostraram que cargas intermediárias com alta adesão aos *DLs* garantem maior eficiência.

1. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é analisar o uso de *Delivery Lockers* como forma de viabilizar a entrega noturna no *e-commerce*, por meio da Modelagem e Simulação Baseada em Agentes (MSBA). A experiência de entregas noturnas em Nova York, com o projeto *Off-Hour Delivery* (2010), demonstrou ganhos em eficiência, produtividade e redução da poluição, sendo incorporada como política pública (CET-SP, 2023). Nesse contexto, a MSBA destaca-se como ferramenta eficaz para testar estratégias logísticas em ambientes urbanos complexos (Alves, 2019).

2. METODOLOGIA

Esta pesquisa utilizou uma abordagem quantitativa com foco na MSBA, visando analisar estratégias logísticas no *e-commerce* urbano. O modelo foi desenvolvido na plataforma AnyLogic, seguindo a metodologia proposta por Chwif e Medina (2015).

A experimentação focou na viabilidade das entregas noturnas (OHD) com uso de *Delivery Lockers* (DLs), como forma de reduzir o tempo e o custo das entregas porta a porta, concentradas no intervalo das 20h às 24h, utilizou-se uma velocidade média de 18 km/h (50% superior ao horário de pico), os demais parâmetros de entrada do modelo seguiram os propostos por Alves *et al.* (2023). A simulação ocorreu na região do Contorno, em Belo Horizonte, considerando diferentes percentuais de uso dos DLs (0% a 100%) e avaliando o impacto sobre o tamanho da carga (40, 50, 60, 70, 80 e 90) e o número de caminhões necessários (8, 9, 10 e 11). Essa combinação resultou em um número de 264 (obtido por 11 × 6 × 4) cenários simulados. Os resultados foram analisados com base em dois critérios principais: 1. A carga e o número de caminhões simulados atendem à demanda? e 2. O tempo total de entrega permanece abaixo de 4 horas?

3. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta um mapa de calor com todos os cenários simulados.

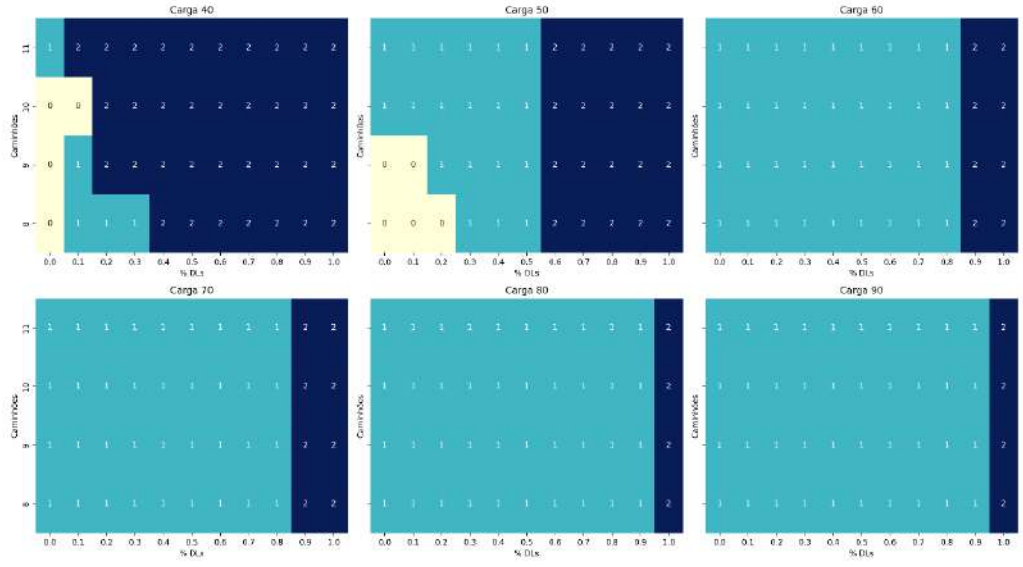


Figura 1: Mapa de calor dos cenários simulados

A figura 01 foi plotada com as seguintes condições: 0 = não atende nenhum dos critérios propostos, 1 = atende parcial, 2 = atende por completo (seria a demanda e ao tempo de entregas). Com a análise da figura foi possível obter algumas considerações sobre o uso de DLs para promover as entregas noturnas:

- Comparando os cenários 80 pedidos/carga e os cenários 90 pedidos/carga, percebe-se que a eficiência operacional, tanto em relação aos pedidos entregues quanto a duração da operação, decaiu no cenário de 90. Uma possível razão para isso é que o uso da capacidade do caminhão depende da duração da operação.
- Nos cenários de 40 e 50 pedidos por carga, verificou-se que a quantidade de pedidos influencia diretamente a viabilidade da operação.
- À medida que a carga aumenta, a eficiência passa a depender de níveis mais elevados de adesão aos DLs.
- Embora cargas maiores (90 pedidos) atendam à demanda, elas comprometem o tempo de entrega, mostrando que utilizar toda a capacidade dos caminhões nem sempre é eficiente.
- Nos cenários com cargas menores (40 e 50 pedidos/carga), a baixa adesão aos DLs inviabiliza o atendimento da demanda, mesmo com o aumento do número de veículos. Já em cargas intermediárias (60 e 70 pedidos/carga), a operação mostra-se mais equilibrada quando há alta adesão aos DLs (≥ 90%), garantindo entregas dentro da janela de 4 horas.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que a eficiência das entregas noturnas depende da interação entre a consolidação de pedidos e a adesão dos consumidores aos Delivery Lockers (DLs). Nos cenários com cargas elevadas (90 pedidos), a demanda foi atendida, mas o tempo da operação foi comprometido, evidenciando que o uso total da capacidade do caminhão nem sempre é eficiente. Já as cargas menores (40 e 50 pedidos) mostraram-se pouco atrativas quando associadas a baixa adesão aos DLs, mesmo com o aumento de veículos. Os melhores resultados foram observados em cargas intermediárias (60 e 70 pedidos) com alta adesão (≥ 90%), que possibilitaram cumprir a janela de quatro horas. Este estudo inicial fornece subsídios para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias de logística urbana mais eficientes e sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, R.; Pereira, C. A.; Lima , R. (2023). Operational cost analysis for e-commerce deliveries using agent-based modeling and simulation. Research in Transportation Economics, v. 101, p. 101348.

Alves, R. (2019). Modelagem e simulação baseada em agentes aplicada ao transporte urbano de cargas do comércio eletrônico-B2C. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

CET-SP. (2023). Off-Hour Delivery (OHD): Experiência de Entregas Noturnas em Nova York (2010). São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego.

Chwif, L.; Medina, A. (2015). Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria e aplicações (4ª ed.). São Paulo: Elsevier Brasil.

Ana Luiza Pimenta Giacchero (ana.giacchero@estudante.ufla.br)
Universidade Federal de Lavras, ICTIN -Instituto de Ciência, Tecnologia e Inovação, Câmpus São Sebastião do Paraíso R. Antonio Carlos Pinheiro Alcântara, n° 855 - Jardim Mediterranée, São Sebastião do Paraíso - MG, 37950-000, Brasil
Jesimar da Silva Arantes (jesimar.arantes@ufla.br)
Universidade Federal de Lavras, Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos Universidade Federal de, Lavras - MG, 37203-202, Brasil
Roberta Alves (robertaalves@ufla.br)
Universidade Federal de Lavras, ICTIN -Instituto de Ciência, Tecnologia e Inovação, Câmpus São Sebastião do Paraíso R. Antonio Carlos Pinheiro Alcântara, n° 855 - Jardim Mediterranée, São Sebastião do Paraíso - MG, 37950-000, Brasil

Distribuição urbana de mercadorias

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILHA: ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS COM ÊNFASE EM ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

Gabriela Buzzi Ribeiro[1], **Renato da Silva Lima**[2]
[1]Universidade de São Paulo, [2]Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
A última milha, etapa crucial da entrega ao cliente final, é fortemente influenciada por variáveis operacionais. Esta pesquisa busca avaliar como fatores como tipo de veículo, combustível, velocidade média, localização de instalações e tempo de descarregamento impactam nos custos e nas emissões de CO_2, auxiliando no planejamento da logística urbana. As simulações, realizadas com dados reais de uma empresa de e-commerce do Rio de Janeiro, fornecerão os custos operacionais diretamente das rotas, a partir dos quais serão calculadas as emissões de CO_2, buscando analisar de modo conjunto variáveis como eficiência energética, tipo de combustível, distância percorrida e número de viagens. Nos testes preliminares, observou-se que o tipo de veículo e o combustível escolhido influenciam mais significativamente os custos e as emissões do que a velocidade média, sendo que veículos menores se mostraram mais adequados à demanda simulada, por proporcionarem melhor aproveitamento da frota e maior eficiência operacional.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de cargas é uma das atividades que mais consomem energia derivada de combustíveis fósseis no Brasil, o que o torna um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEE). Em 2023, as emissões do setor atingiram seu recorde histórico, totalizando 224 Mt-CO_2 — cerca de 9,5% das emissões nacionais (SEEG, 2024). Nos centros urbanos, esse transporte é essencial para o funcionamento da vida cotidiana, apoiando o abastecimento comercial, a entrega domiciliar de produtos e a logística entre empresas. No entanto, essas operações impactam negativamente a qualidade de vida nas cidades, contribuindo para a poluição do ar, o aumento dos congestionamentos e dos níveis de ruído (Crainic, Ricciardi e Storchi, 2004).

Com o avanço do comércio B2C (*Business to Consumer*), intensificado pelas compras online, a complexidade da logística urbana aumentou significativamente (Lauenstein e Schank, 2022; De Oliveira, 2023). Neste contexto, a logística de última milha, etapa em que o produto é entregue ao consumidor final, é considerada a mais custosa e desafiadora da cadeia de suprimentos (Mingozzi e Toth, 1981). No Brasil, essa fase representa cerca de 45% dos custos logísticos em empresas de e-commerce, sendo marcada por baixa eficiência operacional, como reduzidas velocidades médias e baixos índices de ocupação dos veículos (Allen et al., 2018; ILOS, 2020). Esse processo enfrenta o desafio de conciliar as demandas do comércio global com requisitos ambientais cada vez mais rigorosos, o que exige inovações em tecnologias, modais e estratégias organizacionais (Ranieri et al., 2018). Além disso, sua complexidade a torna um campo promissor para pesquisas sobre eficiência energética e consumo de combustível (Velázquez-Martínez, 2019).

Desde 2010, observa-se um crescimento significativo nas pesquisas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa no transporte de carga, indicando uma maior atenção à sustentabilidade no setor (Moghdani et al., 2021; Nielsen et al., 2024). No entanto, Dündar, Ömürgönülşen e Soysal (2021), ao revisarem estudos sobre roteirização urbana sustentável, apontam que a dimensão ambiental ainda é menos abordada em comparação à econômica.

Bektas e Laporte (2011) introduzem o *Pollution-Routing Problem* (PRP), uma extensão do VRP que incorpora custos ambientais ao planejamento logístico, considerando fatores como carga, velocidade e janelas de tempo. Outros termos são usados para descrever problemas semelhantes, como *eco-routing* e GVRP (Sabet e Farooq, 2022). Asghari e Al-Elhashem (2021) classificam estes estudos com base no tipo de propulsão dos veículos, abrangendo motores de combustão interna, combustíveis alternativos e veículos elétricos híbridos. Além do tipo de propulsão, outros fatores operacionais também influenciam a pegada de carbono na última milha, como a topografia das rotas, a altitude, o tráfego e as características dos veículos (Velázquez-Martínez, 2019). Esses aspectos físicos e ambientais devem ser considerados de forma integrada ao planejamento logístico para reduzir as emissões de CO_2 nas cidades (Velázquez-Martínez et al., 2016).

Assim, o objetivo desta pesquisa é investigar aspectos operacionais da última milha, como capacidade do veículo, combustível, velocidade média, localização de instalações de transbordo e tempo de entrega,

relacionando-os com a variação dos custos logísticos e dos impactos ambientais gerados. A partir da combinação desses fatores, serão estruturados cenários de planejamento da última milha, que visam apoiar a escolha de alternativas mais eficientes e sustentáveis. Tais cenários buscam mitigar as adversidades inerentes a essa etapa da logística urbana, beneficiando tanto os operadores logísticos quanto a qualidade de vida nas cidades.

2. MÉTODOLOGIA

Com o intuito de analisar o planejamento da última milha, considerando critérios econômicos e ambientais, esta pesquisa utilizará dados de entrega de uma empresa B2C da cidade do Rio de Janeiro referentes a três meses de vendas. Estes dados serão processados pelo software OPTMILE – Ferramenta de Otimização de Última Milha – que fornece embasamento técnico para suporte a decisões estratégicas e táticas relacionadas ao planejamento da última milha (INPO, 2025).

A geração dos cenários será conduzida por meio da alteração sistemática dos parâmetros de entrada no OPTMILE, permitindo a simulação de diferentes configurações operacionais aplicáveis à logística de última milha. Serão consideradas variações nos tipos de veículos, levando em conta suas capacidades de carga, níveis de consumo e custos associados, de modo a refletir diferentes estratégias de transporte. Também serão simuladas alternativas quanto ao tipo de combustível utilizado, uma vez que este fator influencia diretamente tanto na eficiência energética dos veículos quanto nos custos variáveis da operação.

Além disso, serão exploradas diferentes velocidades médias de deslocamento, que afetam diretamente a quantidade de entregas possíveis dentro de uma jornada de trabalho limitada, bem como a eficiência no atendimento da demanda. Outros elementos operacionais, como o tempo de descarregamento por entrega e a localização e quantidade de instalações logísticas, também serão ajustados para compor os diferentes cenários. Essa abordagem permitirá avaliar o impacto de múltiplas combinações de fatores operacionais sobre os custos e as emissões, fornecendo uma base mais robusta para a análise e a tomada de decisão.

Os custos operacionais de cada cenário serão obtidos diretamente a partir das simulações realizadas no software. Já o cálculo das emissões de CO_2 será conduzido de forma complementar, considerando as especificidades técnicas de cada configuração simulada, como eficiência energética e fator de emissão por tipo de combustível, além de resultados relacionados a distância percorrida e a quantidade de viagens realizadas. A partir dos resultados de custo e emissões, pretende-se realizar análises de regressão linear múltipla, com o objetivo de identificar os principais fatores que influenciam as emissões de CO_2 no planejamento da última milha. Espera-se que tais análises subsidiem a tomada de decisão quanto à escolha de operações logísticas mais eficientes e sustentáveis, tanto sob a perspectiva econômica quanto ambiental.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Nos testes preliminares realizados, foram avaliadas diferentes configurações de veículos e combustíveis comumente utilizados em entregas urbanas de curta distância, considerando variações na velocidade média das operações. Neste caso, a utilização de veículos menores foi mais adequada com a demanda simulada, tendo em vista a otimização do uso da frota e a redução dos custos por unidade transportada.

A velocidade média, embora importante para ampliar o atendimento da demanda diária limitada a 8 horas, não teve impacto estatisticamente significativo nas emissões totais de CO_2, conforme indicado pela análise de regressão múltipla. Dessa forma, a escolha do tipo de veículo e do combustível se destacaram com os parâmetros mais sensíveis para as variações de custos e impactos ambientais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do crescimento de entregas urbanas devido aos avanços do e-commerce e considerando os desafios da última milha, torna-se essencial desenvolver estudos que avaliam o desempenho de diferentes configurações no planejamento desta etapa, considerando aspectos econômicos e ambientais. Neste contexto, simulações baseadas em dados reais possibilitam o entendimento da influência de cada parâmetro operacional nos custos e nas emissões logísticas. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento de soluções que conciliem viabilidade econômica e responsabilidade ambiental nas operações urbanas.

Como próximas etapas, pretende-se definir a variedade de veículos considerados na operação da última milha, assim como os tipos de combustíveis analisados. Adicionalmente, destaca-se a importância de incorporar outros fatores que influenciam as emissões de CO_2 e os custos operacionais, como o tempo de entrega e a localização de instalações logísticas. Com essa ampliação, busca-se obter resultados que simulem diferentes possibilidades de atuação na última milha, a fim de subsidiar a tomada de decisão nessa etapa, promovendo a conciliação entre eficiência ambiental e viabilidade econômica nas operações logísticas urbanas.

Agradecimentos
Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento que viabilizou a produção dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., & McLeod, F. (2018). *Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 61, 325–338. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020

ANP. (2025). *Levantamento de Preços de Combustíveis*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. https://www.gov.br/anp

Asghari, M., Ghodratnama, A., Iranpour, D., & Ghatee, M. (2021). *Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review*. International Journal of Production Economics, 231, 107899. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899

Bektas, T., & Laporte, G. (2011). *The pollution-routing problem*. Transportation Research Part B: Methodological, 45(8), 1232–1250. https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.004

Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D., & González-Feliu, J. (2017). *Vehicle routing problems for city logistics*. EURO Journal on Transportation and Logistics, 6(1), 51–79.

Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2004). *Advanced freight transportation systems for congested urban areas*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 12(2), 119–137. https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.07.002

De Oliveira, M. A. (2023). *Logística aplicada ao e-commerce*. São Paulo: Editora Senac São Paulo.

Dündar, H., Ömürgönülşen, M., & Soysal, M. (2021). *A review on sustainable urban vehicle routing*. Journal of Cleaner Production, 285, 125444. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125444

ILOS. (2020) *Desafios e soluções do Last Mile urbano*. ILOS Report.

INMETRO. (2025). *Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. https://www.gov.br/inmetro

Lauenstein, S., & Schank, C. (2022). *Design of a sustainable last mile in urban logistics—A systematic literature review*. Sustainability, 14(9), 5501. https://doi.org/10.3390/su14095501

MCTI. (2002). *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatórios de Referência*. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/5266

Moghdani, R., Jabbarzadeh, A., & Fahimnia, B. (2021). *The green vehicle routing problem: A systematic literature review*. Journal of Cleaner Production, 279, 123691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691

Nielsen, P., Dahanayaka, M., Perera, H. N., Thibbotuwawa, A., & Kilic, D. K. (2024). *A systematic review of vehicle routing problems and models in multi-echelon distribution networks*. Supply Chain Analytics.

SEEG. (2024*). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970–2023)*. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – Observatório do Clima. https://seeg.eco.br

Velázquez-Martínez, J. (2019). *Mexican retailer Coppel travels alternative route to a fuel-efficient last mile. Trellis*. https://trellis.net/article/mexican-retailer-coppel-travels-alternative-route-fuel-efficient-last-mile/

Velázquez-Martínez, J. C., Fransoo, J. C., Blanco, E. E., & Dekker, R. (2016). *A new statistical method of assigning vehicles to delivery areas for CO_2 emissions reduction*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 43, 133–144.

Gabriela Buzzi Ribeiro (gabuzzi@usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos - SP, 13566-590.
Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)/ Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG). Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903.

OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO PARA A EQUIDADE DAS ENTREGAS DE ÚLTIMA MILHA DO *E-COMMERCE* EM ASSENTAMENTOS URBANOS INFORMAIS

Cecília Aparecida Pereira[1], **Renato da Silva Lima**[1], **Mark H. P. Zuidgeest**[2]
[1]Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), [2]University of Cape Town (UCT)

RESUMO
Na prática, o transporte urbano de cargas (TUC) não garante acesso equitativo a bens de consumo, especialmente para grupos desfavorecidos, como moradores de assentamentos urbanos informais (AUIs). Consequentemente, essa população enfrenta desafios logísticos para comprar *online*. Nesse contexto, este estudo busca investigar os pontos de coleta e entrega (PCE) como solução eficiente e equitativa para entregas de última milha do *e-commerce* em AUIs. Um modelo de otimização baseado em simulação multiagente será desenvolvido para determinar a quantidade e distribuição espacial de PCEs em um AUI, minimizando simultaneamente os esforços dos consumidores para acessarem PCEs e os custos operacionais das transportadoras. Essa abordagem será aplicada em um estudo de caso na Rocinha, Rio de Janeiro. Resultados preliminares demonstram que os consumidores reduziram o tempo médio de viagem em aproximadamente 63,25%, demandando investimentos nas operações logísticas locais. Este modelo piloto será expandido para identificar soluções ótimas de Pareto neste contexto de *trade-off*.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

O transporte urbano de cargas (TUC) viabiliza o acesso da população a bens essenciais ao conectar regiões produtoras com as consumidoras (Pereira *et al.*, 2025). No entanto, na prática, muitos grupos e territórios desfavorecidos são excluídos das redes logísticas, intensificando a exclusão social relacionada aos transportes (Pereira *et al*., 2025). Entre eles, citam-se os moradores de assentamentos urbanos informais (AUI), que somam mais de um bilhão de pessoas no mundo (ONU, 2022). No Brasil, área de estudo desta pesquisa, 16,4 milhões de pessoas vivem em favelas (IBGE, 2024), movimentando cerca de R$120 bilhões anuais (Data Favela e Locomotiva, 2020). Apesar dessa relevância econômica, a maioria dessa população enfrenta desafios de acesso ao *e-commerce* devido a barreiras logísticas advindas de infraestrutura viária inadequada, endereçamento informal, falta de dados e informações locais, restrições de *stakeholders* e questões de segurança (Duarte *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2025). Consequentemente, essas barreiras impedem que muitos recebam entregas em domicílio ou resultam em elevados custos de frete e tempos de espera para aqueles que podem (Navarro *et al.*, 2021; Pongeluppe, 2022). Em resposta, os pontos de coleta e entrega (PCE) surgem como iniciativa potencial para simplificar essas operações em AUIs (Pereira *et al.*, 2025). Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo investigar os PCEs como uma solução eficiente e equitativa para as entregas de última milha do *e-commerce* em AUIs. Para tanto, um modelo de otimização baseado em simulação multiagente será desenvolvido para definir a quantidade e distribuição espacial de PCEs em um AUI, minimizando os custos operacionais das transportadoras e os esforços dos consumidores para acessar os PCEs simultaneamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

Uma revisão sistemática de literatura foi conduzida nas bases de dados bibliográficos Scopus, Web of Science e fontes complementares, identificando poucos estudos sobre a equidade do TUC em AUIs. No Senegal, Green *et al.* (2013) concluíram que a sustentabilidade econômica do transporte de resíduos para esvaziamento de latrinas em AUIs depende de mudanças na rede de transporte local. No Brasil, Duarte *et al.* (2019) propuseram cinco diretrizes para entregas em favelas: empregar localmente; retribuir à comunidade; flexibilizar pontos de entrega; reconhecer a criminalidade; transportar discretamente. Hirakawa (2019) identificou menor integração em áreas extremas de AUI no Brasil e Colômbia. Navarro *et al.* (2021) mostraram que os desafios logísticos variam entre regiões de baixa e alta renda de São Paulo, onde 6,89% e 0,91% da população mora em AUIs, respectivamente. Pongeluppe (2022) evidenciou custos até 90% maiores em entregas do *e-commerce* dentro de favelas. Tuomala e Grant (2022) discutiram como a cadeia de suprimentos compromete a segurança alimentar em uma *township* sul-africana. Recentemente, Oliveira *et al.* (2024) descreveram um sistema de varredura à *laser* aerotransportado para mapeamento das vias de favelas. Pereira *et al.* (2025) identificaram barreiras logísticas em comum para entregas do *e-commerce* em AUIs brasileiros e sul-africanos, tendo os PCEs como iniciativa promissora para essas operações. Até o momento, nenhum estudo aplicou modelagem matemática para definir redes ótimas de PCE que considerem diretamente as particularidades logísticas de AUIs. Além disso, salvo Pereira *et al.* (2025), a literatura negligencia a integração entre TUC e teorias de justiça social. Esta pesquisa preenche essas lacunas ao adotar o Igualitarismo de Rawls e a Abordagem das Capacidades como fundamentos teóricos centrais, combinados a uma abordagem quantitativa de investigação.

3. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa segue uma abordagem de otimização baseada em simulação dividida em cinco etapas metodológicas de acordo com Bertrand e Fransoo (2002). A primeira etapa consiste na contextualização do estudo conforme descrito na Seção 1. Nesse sentido, a área de estudo será a Rocinha, Rio de Janeiro, Brasil. Segundo o IBGE (2024), a Rocinha é a favela mais populosa do Brasil com 72.021 habitantes, sendo também caracterizada por um relevo íngreme e um número significativo de ruas inacessíveis e endereços informais, o que limita a logística local e o acesso ao *e-commerce*. Com isso, para esta pesquisa, foram considerados estabelecimentos comerciais localizados em vias acessíveis da Rocinha como candidatos para compor a rede de PCEs da região, conforme sugerido por Duarte *et al.* (2019) e Pereira *et al.* (2025). A partir desse contexto, a segunda etapa da metodologia envolve o desenvolvimento de um modelo conceitual usando a modelagem e simulação baseada em agentes (MSBA). Embora a MSBA seja amplamente aplicada ao TUC, ela apresenta significativa complexidade estrutural. Para isso, o protocolo *Overview, Design, Details* (ODD) é utilizado para organizar claramente a estrutura do modelo, além de facilitar a compreensão e replicação (Grimm *et al.*, 2020). Com o protocolo ODD desenvolvido, a coleta de dados foi baseada tanto em fontes primárias, por meio de entrevistas em uma empresa de logística da Rocinha (Pereira *et al.*, 2025), quanto em fontes secundárias. Em seguida, o modelo conceitual é aplicado em um modelo computacional no AnyLogic®, *software* que integra Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com MSBA. Esse modelo computacional estabelece a base para a fase seguinte da metodologia, que se concentra na solução por meio de uma otimização baseada em simulação. Essa abordagem consiste em um *loop* integrado que combina o algoritmo de otimização com os componentes estocásticos da modelagem de simulação (Juan *et al.*, 2019). Em consonância com os objetivos deste estudo, o modelo é integrado a um problema de otimização multiobjetivo para definir redes de PCEs ótimas em um AUI. As duas funções objetivo —minimizar os custos operacionais das transportadoras (Z1) e os esforços dos consumidores para acessar os PCEs (Z2)— criarão um *trade-off*, resultando em soluções ótimas em uma Fronteira de Pareto. Por fim, essa metodologia segue um processo circular no qual todas as etapas são interconectadas e continuamente refinadas. Isso implica que a contextualização, o modelo conceitual, o modelo computacional e a solução passarão por validação e verificação contínuas até que os objetivos da pesquisa sejam alcançados com sucesso (Bertrand e Fransoo, 2002). A validação será conduzida sob três perspectivas. Primeiro, pesquisadores avaliarão o modelo principalmente em uma perspectiva teórica. Em seguida, partes interessadas do setor privado validarão a relevância prática. Terceiro, representantes do setor público avaliarão as implicações políticas do modelo. Além disso, para garantir a robustez e a precisão do modelo, a verificação será conduzida por meio de testes estáticos da ferramenta de correção do AnyLogic®.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES PRELIMINARES

Até o momento, resultados preliminares foram gerados a partir de uma única replicação de dois cenários piloto. O Cenário S1 baseia-se na minimização da função objetivo Z1, na qual todos os consumidores só podem retirar suas encomendas no Distribuidor local. Nesse cenário, os consumidores percorrem em média 1.054,69 metros para retirar suas encomendas, o que corresponde a um tempo médio de viagem de 21,44 minutos, conforme mostrado pela Figura 1b. Estudos anteriores demonstraram que esses valores excedem as preferências dos consumidores. Os valores máximos de 5.520,97 metros e 112,21 minutos evidenciam ainda mais as inequidades desse contexto. Já o Cenário S2 baseia-se na função objetivo Z2, na qual todos os consumidores podem escolher o PCE potencial mais próximo para retirar seus pedidos. Dentre os 287 PCEs potenciais, 179 foram selecionados, conforme ilustrado na Figura 1a. Apenas cerca de 18,5% dos PCEs selecionados receberam mais de 50 pedidos durante o período de simulação de 30 dias. Como esperado, esse percentual corresponde aos PCEs mais isolados, que consequentemente são escolhidos por um número maior de consumidores. Além disso, os consumidores percorrem em média 387,73 metros para retirar seus pedidos, o que corresponde a um tempo médio de deslocamento de 7,88 minutos. Esses valores se alinham às preferências do consumidor, visto que estudos anteriores demonstraram que a maioria dos indivíduos está disposta a caminhar até 15 minutos para acessar um PCE. Os resultados do terceiro quartil reforçam ainda mais esse alinhamento, indicando que pelo menos 75% dos consumidores conseguem acessar um PCE em até 15 minutos. No entanto, uma parcela considerável de consumidores não consegue acessar um PCE dentro do tempo de deslocamento desejado, com alguns deles caminhando até 71,51 minutos para retirar suas encomendas. Isso evidencia uma lacuna sob a perspectiva da equidade horizontal. No entanto, quando comparado ao Cenário S1, o Cenário S2 mostra melhorias no acesso do consumidor à rede de CDPs, com um número maior de consumidores chegando aos CDPs em até 15 minutos. Logo, o S2 demonstra melhorias na equidade em comparação com o S1. No entanto, para a versão final desta pesquisa, que visa um forte

alinhamento às teorias de justiça social, o S2 passará por validação e será estendido posteriormente para abranger a solução descrita na Seção 3. Por fim, espera-se que não apenas soluções mais equitativas, mas também soluções economicamente e ambientalmente atrativas sejam identificadas por meio da Fronteira de Pareto, promovendo o debate sobre a equidade do TUC em AUIs de maneira teórica e prática.

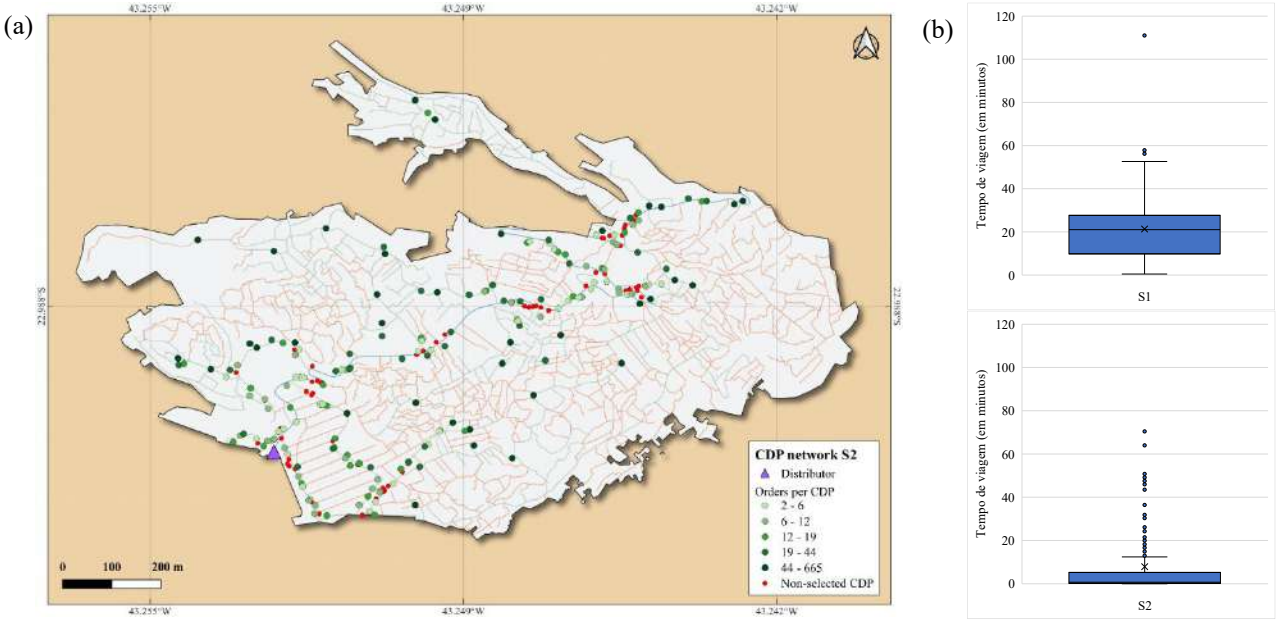


Figura 1: (a) Rede de PCEs do S2; (b) tempo de viagem do consumidor por pedido coletado

Agradecimentos
Os autores agradecem à FAPEMIG, ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro aos projetos que subsidiaram este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bertrand, J. e J. Fransoo (2002) Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 22, n. 2. DOI: 10.1108/01443570210414338.

Data Favela; Locomotiva (2020) Economia das Favelas - Renda e Consumo nas Favelas Brasileiras.

Duarte, A.; F. Macau; C. Silva e L. Sanches (2019) Last mile delivery to the bottom of the pyramid in Brazilian slums. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, v. 49, n. 5, p. 473-491. DOI: 10.1108/IJPDLM-01-2018-0008.

Green, J.; O. Weck e P. Suarez (2013) Evaluating the economic sustainability of sanitation logistics in Senegal, *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, v. 3, n. 1, p. 7-21. DOI: 10.1108/20426741311328484.

Grimm, V. *et al.* (2020) The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. DOI: 10.18564/jasss.4259.

Hirakawa, A. (2019) Logística urbana em favelas: estudo de casos múltiplos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

IBGE (2024) Censo Demográfico 2022: Favelas e Comunidades Urbanas. Rio de Janeiro: IBGE.

Juan, A.; J. Panadero; L. Reyes-Rubiano; J. Faulin; R. de la Torre e I. Latorre (2019) Simulation-Based Optimization in Transportation and Logistics: Comparing Sample Average Approximation with Simheuristics. In Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC). DOI: 10.1109/WSC40007.2019.9004905.

Navarro, H.; J. Vieira e J. Fransoo (2021) Understanding urban logistics and consumer behavior in São Paulo city. *Case Studies on Transport Policy*, v. 9, n. 4, p. 1630-1640. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.06.017.

Oliveira, H. *et al.* (2024) Mapeamento de vielas em favelas baseado em dados de sistema de varredura à laser aerotransportado. In 10º Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável.

ONU (2022) World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities.

Pereira, C.; M. Zuidgeest e R. Lima (2025) How about including urban informal settlements in city logistics? An equity comparative analysis of e-commerce last mile deliveries. *International Journal of Logistics Management*, v. 36, n. 4, p. 1326-1345. DOI: 10.1108/IJLM-05-2024-0304.

Pongeluppe, L. (2022) The favela effect: Spatial inequalities and firm strategies in disadvantaged urban communities. *Strategic Management Journal*, v. 43, n. 13, p. 2777-2808. DOI: 10.1002/smj.3414.

Tuomala, V. e D. Grant (2022) Exploring supply chain issues affecting food access and security among urban poor in South Africa, *International Journal of Logistics Management*, v. 33, n. 5. DOI: 10.1108/IJLM-01-2021-0007.

Logística humanitária

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

APLICACIÓN DE TEORÍA DE COLAS PARA OPTIMIZAR EL SISTEMA DE ATENCIÓN PREHOSPITALARIA DE BOGOTA D.C.

Ricardo José Peña Lindarte[1], Mario Iván Tarride Férnandez[2], Ivonne Daniela Carrasco Caro[1], Jair Eduardo Rocha Gonzalez[1], Andres Felipe Acosta Mora[1]
[1]Univesridad Nacional de Colombia, [2]Universidad de Santiago de Chile

RESUMEN
Los sistemas de atención prehospitalaria son fundamentales para la respuesta ante emergencias en contextos urbanos, incidiendo directamente en la reducción de la mortalidad y en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la salud. Este estudio aplica teoría de colas para analizar la eficiencia operativa del sistema de atención prehospitalaria en Bogotá D.C., evaluando indicadores como tiempos de espera, ocupación del sistema y número de servidores (ambulancias). Los resultados muestran que aumentar la flota diaria a 77 ambulancias elimina el tiempo de despacho, mientras que una ampliación del 13 % (hasta 60 unidades) reduce los tiempos de espera en un 84,8 %. Estos hallazgos evidencian el potencial de la teoría de colas como herramienta para la toma de decisiones estratégicas en la asignación de recursos, mejorando la eficiencia, oportunidad y calidad del servicio, y ofreciendo una base cuantitativa sólida para futuras intervenciones en logística humanitaria urbana.

1. INTRODUCCIÓN

El servicio de atención médica prehospitalaria es de gran importancia para el sistema de salud, ya que cada minuto es crucial para la vida y el bienestar de los pacientes (Mena, 2023). Gauss et al., (2019) determinó que las probabilidades de muerte aumentan 9% por cada 10 minutos del tiempo prehospitalario, así mismo, Champion et al., (2016) evidenció que después de un accidente de tránsito durante los primeros 30 minutos el riesgo de mortalidad es de 0.4%, mientras que para los próximos 60 minutos se aumenta el riesgo de mortalidad a 1% por cada minuto que pasa, por otro lado, Chandrasekharan et al., (2016), evidenció que la falta de servicios de atención prehospitalaria y las demoras en los traslados de los pacientes al hospital, están asociados significativamente con el aumento de mortalidad.

La Secretaría de Salud de Bogotá reportó un total de 608.493 incidentes en 2022, de los cuales el 73% correspondió a llamadas telefónicas y el 27% al despacho de vehículos (Forero et al., 2023). Esto denota la alta demanda de los servicios de atención prehospitalaria, y la importancia de prestar un servicio eficiente y oportuno. Bajo este contexto, se plantea analizar la operación del servicio de atención médica prehospitalaria de la ciudad de Bogotá DC, mediante la aplicación de teoría de colas, calculando indicadores de utilización y rendimiento del sistema a fin de reconocer como los recursos disponibles impactan en la eficiencia del sistema, de tal forma que se pueda optimizar la gestión de los recursos.

Así, se contribuye a mejorar la prestación de los servicios de urgencias, buscando la disminución de los tiempos de espera y el manejo eficiente de los recursos. De acuerdo con Mena (2023), los tiempos de respuesta son críticos en la atención prehospitalaria, ya que cada fase por menor que parezca influye en el resultado final, también destaca la necesidad de una respuesta óptima en situaciones de emergencia para maximizar las posibilidades de éxito en la atención al paciente. Adicionalmente al buscar soluciones que mejoren la eficiencia del sistema APH se aporta al cumplimiento del objetivo establecido en el plan distrital de seguridad vial 2017 – 2026 de Bogotá D.C., que consiste en reducir a diez años un 35% del total de muertes y heridos graves por siniestros en Bogotá, en la estrategia de seguimiento y control de ambulancias que se basa en hacer más eficiente la operación, y de fortalecimiento de la atención de víctimas a nivel prehospitalario, esperando que se agilice el proceso de atención de víctimas especialmente durante los minutos siguientes al acontecimiento, en el marco de la hora dorada (Cowley, 1975), que corresponde a los 60 minutos posteriores a un siniestro en los que la víctima debe recibir atención médica a la mayor brevedad posible para aumentar las posibilidades de salvar a la víctima.

El alcance de la investigación se da en el marco del análisis del desempeño de la prestación del servicio de atención médica prehospitalaria ante urgencias y emergencias ocurridas en la ciudad de Bogotá, de lo cual se encarga el Centro de Regulador de Urgencias y Emergencias – CRUE adscrito a la Secretaría Distrital de Salud, y va desde la recepción de la llamada donde se solicita la ambulancia, pasando por el despacho, el traslado hasta el lugar del incidente, accidente o siniestro; la atención in situ, el traslado hasta el centro médico de así requerirse, y la espera en centro médico hasta la recepción del paciente, enfocándose en la capacidad

operativa y los tiempos de atención mediante la aplicación de teoría de colas. Este análisis se limita a las operaciones regulares o promedio del sistema, adicionalmente, no identifica el comportamiento individual de las etapas como traslados, atención in situ o retención en centro médico, sino que considera el tiempo total de servicio en el sistema, lo que busca brindar una visión global del desempeño del sistema y proponer mejoras para optimizar la gestión del mismo, dejando la oportunidad de abordar futuras investigaciones donde se analice cada fase para hallar cuellos de botella, e identificar estrategias de optimización más precisas.

2. METODOLOGÍA

Se procesó la base de datos facilitada por el CRUE mediante el software Microsoft Excel. Esta base incluía los datos registrados de la prestación del servicio de atención prehospitalaria durante 365 días continuos, de 24 horas diarias, se determinó el promedio de incidentes diarios de cada mes, desde enero hasta diciembre del año 2017. Se seleccionó un día que representaba el promedio del tiempo de respuesta de todos los incidentes registrados, mediante un análisis de clúster. Este día fue utilizado para construir y aplicar el modelo de colas, permitiendo trabajar con los datos diarios de manera representativa.

Luego de procesar la información del día típico y determinar la duración en el sistema, se utilizó el modelo M/M/c, que corresponde a un modelo de colas utilizado para analizar sistemas donde múltiples servidores atienden a clientes o eventos que llegan de manera aleatoria. Es especialmente útil en situaciones como centros de llamadas, sistemas de APH o cualquier entorno en el que se gestionen servicios de manera simultánea con un equipo limitado de recursos.

Para explicar la base teórica del modelo de colas M/M/c, se toma como base el documento de López E. y Barberán P. (2019), donde se define el modelo de colas M/M/c como un sistema con un número finito de c servidores, que considera una población infinita con una tasa de llegadas λ y una tasa de servicio μ en cada servidor. Las llamadas siguen un modelo aleatorio exponencial y las que no se puedan servir pasarán a la cola de espera, cada estado representa el número de unidades en el sistema, ver Figura 1.

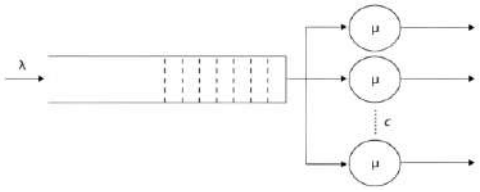


Figura 1: Representación gráfica modelo M/M/c. Fuente: López E. y Barberán P., 2019

Cuando el estado del sistema sea superior a c, todos los c servidores estarán activos, y, por lo tanto, la tasa de servicio para los estados superiores a c será constante, de valor $c\mu$. Por otra parte, las llegadas se producen con tasa λ, independientemente del número de unidades en el sistema. En cuanto a las probabilidades de estado se define la intensidad de tráfico y el factor de utilización ρ mediante la Ecuación 1.

$$A = \frac{\lambda}{\mu}, \qquad \rho = \frac{\lambda}{c\mu} \tag{1}$$

Obteniendo las probabilidades de estado de los procesos de nacimiento y muerte para el modelo M/M/c, ver Ecuaciones 2 y 3. La expresión de Po es válida siempre que se cumpla que $A < c$ y trata de la condición de estabilidad que garantiza que el tráfico ofrecido es menor que el número de recursos disponibles, donde $\rho < 1$

$$P_n = P_0 \prod_{i=1}^{n} \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} = \begin{cases} \frac{1}{n!}\left(\frac{\lambda}{c\mu}\right)^n Po & 0 \le n \le c-1 \\ \frac{c^c}{c!}\left(\frac{\lambda}{c\mu}\right)^n Po & n \ge c \end{cases} \tag{2}$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{i=1}^{n} \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i}} = \frac{1}{\sum_{n=0}^{c-1} + \frac{A^c}{c!\,(1-\rho)}} \tag{3}$$

En el caso de bloqueo del sistema, la probabilidad de que una llegada quede bloqueada y tenga que esperar en la cola corresponderá a la posibilidad de que los c servidores están ocupados y, por lo tanto, a la probabilidad de que el sistema esté en un estado c o superior, situación representada por la Ecuación 4 y 5.

$$P_B = C(c.A) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = 1 - \sum_{n=0}^{c-1} P_n = 1 - P_0 \sum_{n=0}^{c-1} \frac{A^n}{n!} = 1 - \frac{\sum_{n=0}^{c-1} \frac{A^n}{n!}}{\sum_{n=0}^{c-1} \frac{A^n}{n!} + \frac{A^c}{c!(1-\rho)}} \quad (4)$$

$$C(c.A) = \frac{\frac{A^n}{c!}}{(1-\rho)\sum_{n=0}^{c-1} \frac{A^n}{n!} + \frac{A^c}{c!}} = \frac{\frac{A^n}{c!}}{(1-\rho)} P_0 \quad (5)$$

Finalmente, como métricas del rendimiento del sistema, y teniendo en cuenta la ley de Little, se tienen:
Estimación del número medio de unidades (pacientes) en cola (L_q), Ecuación 6

$$L_q = \sum_{n=c}^{\infty} (n-c)P_n = \sum_{n=0}^{\infty} nP_{n+c} = \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{c^c}{c!} \left(\frac{\lambda}{c\mu}\right)^{n+c} . P_0 = \frac{A^c}{c!} P_0 \sum_{n=0}^{\infty} n\rho^n = \frac{A^c}{c!} P_0 \frac{\rho}{(1-\rho)^2}$$
$$= \frac{\rho . C(c,A)}{1-\rho} \quad (6)$$

Tiempo medio de permanencia en cola (W_q). Ecuación 7

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{\frac{\rho . C(c,A)}{1-\rho}}{\lambda} = \frac{C(c,A)}{c\mu(1-\rho)} \quad (7)$$

Número promedio de unidades (pacientes) en el sistema (L_s). Ecuación 8

$$L_s = \frac{\lambda}{\mu} \quad (8)$$

Tiempo promedio que una unidad (paciente) permanece en el sistema (W_s), que corresponde a la suma del tiempo de espera y el tiempo de servicio.

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (9)$$

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presenta el análisis de la relación entre las solicitudes diarias y la asignación de recursos, al igual que el resultado obtenido de la aplicación de un modelo de teoría de colas en el sistema APH de la CRUE en la ciudad de Bogotá D.C. Se calculó la correlación entre las variables de número promedio de incidentes diarios por mes y número promedio de ambulancias disponibles diarias por mes, donde se obtuvo una correlación moderada de 0.547 como se puede ver en la figura 2, lo que permite evidenciar que aunque hay una correlación positiva, y la cantidad de recursos disponibles aumenta a medida que aumentan las solicitudes, existen ineficiencias respecto a la asignación de recursos de acuerdo con la demanda de servicios; ocasionado que en meses donde hay mayor número de solicitudes se dispongan de menor cantidad de recursos disponibles que en meses donde hay menor demanda del servicio, esto permite demostrar la importancia de valorar los procedimientos o la metodología que se está usando desde la entidad para establecer los recursos que van a operar durante el día.

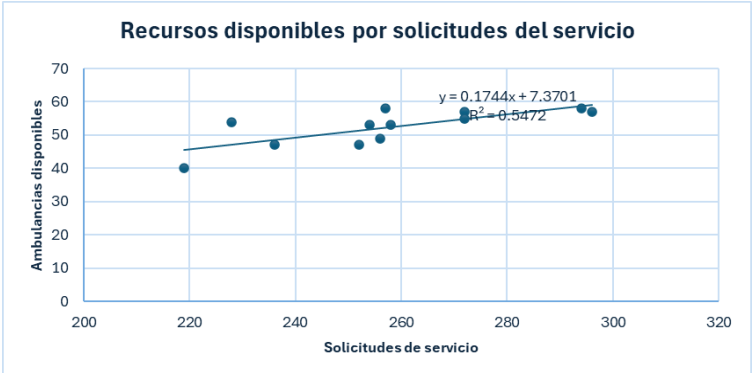


Figura 2: Gráfica de correlación entre solicitudes de servicio y recursos disponibles

Se aplicaron las ecuaciones de teoría de colas descritas en el apartado de la metodología, correspondientes al modelo M/M/c, para determinar las medidas de rendimiento del sistema, por lo cual primero se tuvieron que calcular los respectivos parámetros a partir de la información contenida en base de datos suministrada, y luego solucionar las ecuaciones descritas; a continuación, se presenta la tabla 1 con el consolidado de los parámetros usados y el resultado de las medidas de rendimiento.

Tabla 1: Consolidación de parámetros y medidas de rendimiento del modelo M/M/C

Parámetros	Valor	Medidas de rendimiento	Valor
Número de solicitudes recibidas	231	ρ (Factor de utilización del sistema)	0.9285
Número de recursos disponibles (ambulancias)	53*0.67	W (Tiempo promedio que un paciente dura en el sistema)	3.812 [h]
Tiempo de atención del servicio prehospitalario	3.38 [h]	Wq (Tiempo promedio que un paciente espera en cola)	0.434 [h]
λ (Número promedio de arribos por hora)	9.625	L (Número promedio de pacientes en el sistema)	36.69 [Ud]
μ (Número promedio de pacientes atendidos por hora)	0.296	Lq (Número promedio de pacientes esperando en cola)	4.18 [Ud]

Sobre el número de ambulancias disponibles se debe aclarar que se establece como 53*0.67, en razón a un factor de ajuste; esto se debe a que se identificaron un total de 53 ambulancias disponibles durante el día analizado, sin embargo, estas no operan durante todo el día, es decir que aunque la teoría indica que tan pronto un servidor se desocupa puede ingresar otro paciente, en la realidad lo que sucede es que hay vehículos que terminan un servicio y no se les vuelve a asignar a otro paciente aunque estén disponibles, lo que se justifica por los tiempos no operacionales de los recursos, que usualmente corresponden a cambios de turno, horarios de almuerzo, abastecimiento de combustible, o mantenimientos preventivos. Con la base de datos se determinó que en promedio cada ambulancia está operando durante 16 horas diarias, las otras 8 horas corresponden a tiempos no operacionales, lo que representa el 0.33% del tiempo; así se establece el factor de corrección como 0.67, dado que realmente están operando el 67% de los vehículos durante un periodo de 24 horas.

El proceso de APH inicia con la recepción de llamadas que solicitan el servicio. Si hay recursos disponibles, se asigna una ambulancia a la solicitud. Una vez enviada, la ambulancia se traslada al lugar indicado; sin embargo, en el 45 % de los casos el servicio es cancelado por el solicitante, por lo que el recurso es reasignado a otra emergencia. Para los pacientes que no cancelan la atención, se brinda asistencia en el lugar. En algunos casos, la situación no es grave ni requiere traslado a un centro médico, por lo que la atención finaliza en el sitio. No obstante, la mayoría de los pacientes atendidos in situ sí requieren ser trasladados, y al llegar al centro médico, la ambulancia debe esperar a que se reciba al paciente y se le asigne una camilla para poder finalizar el servicio y quedar disponible nuevamente para otra solicitud.

Teniendo en cuenta el procedimiento definido para la atención médica prehospitalaria, para calcular el tiempo de servicio del sistema se multiplicó el tiempo promedio que dura cada etapa (tránsito, reasignación por cancelación, atención in situ, reasignación por finalización e in situ, traslado a cm, y retención en cm) por la cantidad de usuarios que requirieron ese tipo de atención, después se hizo la sumatoria de estos productos y se dividió entre el número total de pacientes que requirieron un despacho de ambulancia, para este caso equivalente a 231 usuarios, con lo cual se obtuvo un tiempo de atención promedio en el sistema de 3.38 horas.

Sobre las medidas de rendimiento se puede observar que el factor de utilización corresponde al 92.85%, lo que significa que se está operando al 92.85% de la capacidad disponible, y que si llegaran a aumentar las solicitudes del servicio el sistema podría ser explosivo teniendo más solicitudes de las que puede atender, esto denota una falencia en términos de disponibilidad y asignación de recursos. A su vez, repercute en la generación de colas y de tiempos de espera, lo que es perjudicial para los pacientes teniendo en cuenta que el contexto del servicio es de urgencias y emergencias, por lo cual el tiempo de atención y de respuesta es un factor de gran importancia para la adecuada prestación de un servicio de calidad y que resguarde la salud de los habitantes. Además, se identificó que el tiempo promedio que dura un paciente desde que solicita la ambulancia hasta que termina de ser atendido es de 3.81 horas, lo que corresponde a 3 horas y 48 minutos, de los cuales tuvo que esperar 26 minutos para que hubiera una ambulancia disponible.

Conociendo los factores de rendimiento del sistema y sus implicaciones, se evidencia la necesidad de mejorar la asignación de los recursos, con el objetivo de minimizar el tiempo en cola o eliminarlo de ser posible; como se busca reducir el factor de utilización, se deben asignar más recursos y de esta forma mejorar la eficiencia del sistema considerando que los demás parámetros se mantienen en las mismas condiciones, para esto se presenta a continuación, la tabla 2, que indica la cantidad de recursos usados así como su impacto en el factor de utilización del sistema, en el tiempo de espera en cola y en el tiempo del sistema, así como la representación gráfica de los recursos asignados vs. los tiempos de atención en la figura 3.

Tabla 2: Rendimiento del sistema de acuerdo con la asignación de recursos

Número de recursos	ρ	W [h]	Wq [h]	Número de recursos	ρ	W [h]	Wq [h]
53*0.67 = 36 – actual	0.9198	3.812	0.434	66*0.67 = 44	0.7386	3.389	0.011
55*0.67 = 37	0.8864	3.638	0.260	68*0.67 = 45	0.7169	3.385	0.007
57*0.67 = 38	0.8553	3.540	0.162	69*0.67 = 46	0.7065	3.383	0.004
59*0.67 = 39	0.8263	3.481	0.103	71*0.67 = 47	0.6866	3.381	0.003
60*0.67 = 40	0.8125	3.444	0.066	72*0.67 = 48	0.6771	3.380	0.002
62*0.67 = 41	0.7863	3.420	0.042	74*0.67 = 49	0.6588	3.379	0.001
63*0.67 = 42	0.7738	3.405	0.027	75*0.67 = 50	0.6500	3.379	0.001
65*0.67 = 43	0.7500	3.395	0.017	77*0.67 = 51	0.6331	3.379	0.000
				78*0.67 = 52	0.6250	3.379	0.000



Figura 3: Gráfica de tiempos de atención y de espera respecto a la asignación de ambulancias

Los principales hallazgos permiten evidenciar que el aumento en la asignación de ambulancias diarias permite reducir el tiempo de atención en el sistema e incluso eliminar el tiempo de espera en el despacho del recurso si se dispone de 77 ambulancias para operar durante el día. Sin embargo, en la gráfica se puede apreciar que los tiempos mejoran considerablemente al aumentar los recursos disponibles hasta 60 ambulancias, después de esto, la mejora en los tiempos de atención no es representativa, aunque sigue disminuyendo a mayor cantidad de recurso disponible, esto quiere decir que haciendo un análisis de costo-beneficio lo más recomendable para la operación es aumentar la flota de vehículos disponibles a 60, y de esta manera pasar de un tiempo de espera 0.434 horas o 26 minutos, a un tiempo de espera de 0.066 horas o 3.96 minutos. Lo que significa una reducción en los tiempos de espera equivalente al 84.8% consecuencia de aumentar la flota vehicular en un 13%.

4. CONCLUSIONES

El aumento en la asignación de ambulancias reduce significativamente los tiempos de atención y espera en el sistema prehospitalario de Bogotá. Un análisis costo-beneficio sugiere que la flota óptima para operar durante el día es de 60 ambulancias, lo que permite disminuir el tiempo de espera promedio de 26 a aproximadamente 4 minutos, logrando una reducción del 84,8%. La reducción del factor de utilización no fue el objetivo principal, sino un efecto secundario del aumento progresivo de ambulancias, lo que permite priorizar la atención oportuna y la seguridad de los pacientes por encima del aprovechamiento económico de los recursos.

Estos hallazgos pueden orientar la planificación de recursos de salud urbana y servir como base para futuros estudios que integren análisis de costos, contribuyendo a la mejora continua de la gestión del sistema de APH.

Agradecimientos
Los autores agradecen a la Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá por el respaldo institucional y el suministro de la información para el desarrollo del estudio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Champion, H. R., Lombardo, L. V., Wade, C. E., Kalin, E. J., Lawnick, M. M., y Holcomb, J. B. (2016). *Time and place of death from automobile crashes: Research endpoint implications*. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 81(3), 420–426. https://doi.org/10.1097/TA.0000000000001124

Chandrasekharan, A., Nanavati, A. J., Prabhakar, S., y Prabhakar, S. (2016). *Factors impacting mortality in the pre-hospital period after road traffic accidents in Urban India*. Trauma Monthly, 21(3). https://doi.org/10.5812/TRAUMAMON.22456

Cowley. (1975), *A total emergency medical system for the state of Maryland*. Md State Med J; 45:37-45.

Forero, D. A., Martínez, D. P., y Cuevas, E. (2023). *Boletín estadístico y epidemiológico. Informe de gestión anual,* Dirección de Urgencias y Emergencias en Salud. N° 43. https://revistas.saludcapital.gov.co/index.php/BEE/issue/view/80/98

Gauss, T., Ageron, F. X., Devaud, M. L., Debaty, G., Travers, S., Garrigue, D., Raux, M., Harrois, A., y Bouzat, P. (2019). *Association of Prehospital Time to In-Hospital Trauma Mortality in a Physician-Staffed Emergency Medicine System*. JAMA Surgery, 154(12), 1117–1124. https://doi.org/10.1001/JAMASURG.2019.3475

López E. y Barberán P., 2019. *Análisis mediante teoría de colas*. Universitat Oberta de Catalunya. Recuperado de https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/148227/2/Modulo2_AnalisisMdianteTeoriaDeColas.pdf

Mena Medrano, C. L. (2023). *Determinación de factores y propuesta de mejora para reducir el tiempo óptimo de respuesta en emergencias de la ambulancia de atención prehospitalaria del Hospital General del Sur de Quito IESS durante el periodo enero–diciembre 2022* (Master's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2023).

Movilidad Bogotá. (2021). *Plan distrital de seguridad vial 2017-2026***.** https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/23-09-2021/plan_distrital_de_seguridad_vial_2017-2026.pdf

Secretaría de Salud de Bogotá. (2019). *Informe anual 2019 del boletín epidemiológico virtual DUES***.** https://www.saludcapital.gov.co/DCRUE/Boletines%20Epidemiolgicos/2019/13_BoletinEpi_VirtualDUES_inf_anual2019.pdf

Ricardo José Peña Lindarte (rjpenal@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Mario Iván Tarride Férnandez (mario.tarride@usach.cl)
Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial, Av. Víctor Jara 3769 Estación Central, Región Metropolitana, Chile.

Jair Eduardo Rocha González (jerochag@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Ivonne Daniela Carrasco Caro (icarrascoc@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Andrés Felipe Acosta Mora (afacostam@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

GESTÃO LOGÍSTICA NA RESPOSTA A DESASTRES: DESENVOLVIMENTO DE UM *FRAMEWORK* PARA A LOGÍSTICA HUMANITÁRIA NO BRASIL

Julia Braga Soares da Silva[1], Patricia Baldini de Medeiros Garcia[1,2], Ester Divieso[1], Robson Flávio Castro[1], Orlando Fontes Lima Jr. [1], Janaina Antonino Pinto[1]
[1] LALT – Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transporte - Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP,[2]Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

RESUMO
O estudo teve como objetivo analisar a logística humanitária diante dos desastres ocorridos no Rio Grande do Sul em 2024, visando a elaboração de um *framework* teórico. O método incluiu revisão bibliográfica, coleta de dados secundários, análise dos resultados e desenvolvimento do *framework*. Os resultados mostraram a complexidade logística encontrada, devido a danos na infraestrutura, gestão fragmentada de estoques e doações e necessidade de deslocamentos multimodais para alcançar as regiões que ficaram isoladas. Destacam-se como práticas eficazes a priorização de itens essenciais, gestão dos produtos recebidos, além de integração entre voluntariado e centros de distribuição regionais. No entanto, há a necessidade de sistemas de informação em tempo real, além de aprimoramento e capacitação profissional. Para trabalhos futuros, recomenda-se criar plataformas integradas, realizar estudos comparativos entre tipos de desastres e validar *frameworks* teóricos para fortalecer a resposta emergencial.

1. INTRODUÇÃO

A frequência e a intensidade dos desastres naturais têm sido impulsionadas por mudanças climáticas e pela expansão urbana desordenada, resultando em diversos impactos, como inundações, deslizamentos e outros eventos que exigem respostas rápidas e eficientes por parte de governos e organizações humanitárias. Os impactos não se limitam aos aspectos humano e ambiental, mas também ao econômico. Entre 1992 e 2012, estes eventos afetaram 4,4 bilhões de pessoas e causaram danos de 2 trilhões de dólares. Entre 2015 e 2021 as perdas econômicas causadas por desastres alcançaram uma média anual de U$330 bilhões (Leiras *et al*., 2014; Bündnis Entwicklung Hilft, 2023).

O termo “desastre” pode ser definido como uma interrupção severa que excede a capacidade de resposta de uma comunidade, causada por eventos adversos que afetam ecossistemas vulneráveis e resultam em impactos humanos, materiais, econômicos, sociais e ambientais. Eventos adversos, geralmente de caráter repentino e calamitoso, interrompem as atividades sociais e provocam perdas que superam os locais. Um evento adverso configura risco de desastre quando há exposição de pessoas, bens ou infraestrutura a determinados níveis de vulnerabilidade (Çelik *et al*., 2012; IFRC, 2024; UNDRR, 2025).

Exemplos recentes ilustram a gravidade da situação no Brasil. As inundações e deslizamentos de terra ocorridos em Petrópolis em 2022 resultaram em mais de 230 mortes e deixaram cerca de 4 mil pessoas desabrigadas (Blaudt *et al*., 2023). As intensas chuvas que atingiram o Rio Grande do Sul em 2024 provocaram uma das maiores tragédias climáticas da história do estado. De acordo a Defesa Civil – RS (2024), 478 municípios foram afetados, impactando diretamente 2.398.255 pessoas. O número de óbitos confirmados foi de 184, com 25 pessoas desaparecidas e 806 feridos (Defesa Civil - RS, 2024). Nesse contexto, a logística humanitária torna-se essencial, uma vez que abrange processos e sistemas que estão envolvidos na mobilização de pessoas, recursos, habilidades e conhecimentos para ajudar pessoas afetadas por desastres. O aumento da frequência e intensidade dos desastres, tanto naturais quanto tecnológicos, reforçam a necessidade de sistemas logísticos bem estruturados. Em termos operacionais, a logística humanitária envolve o pré-posicionamento, planejamento, execução e controle de fluxos e estoques para reduzir o sofrimento das populações afetadas (Thomas e Kopczak, 2005; Van Wassenhove, 2006).

A logística humanitária apresenta características distintas da empresarial, operando em contextos de incertezas, demandas instáveis, e infraestruturas comprometidas e escassez de recursos. As doações – físicas ou monetárias, de origem privada ou institucional – constituem elemento central, exigindo processos logísticos específicos. Há uma predominância de doações em espécie, motivada pela desconfiança em relação à gestão de recursos financeiros e pela busca de maior controle (Nogueira e Gonçalves, 2009; Silva, 2011; Instituto Brasil Logística, 2021; Sánchez-Partida *et al*., 2021; Guilherme, 2024).

A gestão de estoques representa um ponto crítico, exigindo melhorias na triagem de itens, coordenação

interinstitucional e uso eficiente dos recursos disponíveis. O pré-posicionamento de estoques em centros logísticos, embora potencialmente benéfico, enfrenta entraves como infraestrutura deficiente, insegurança e falta de acessibilidade. O uso crescente de tecnologias – especialmente plataformas digitais para rastreamento e mapeamento – tem se mostrado promissor na otimização das operações. Contudo, a ausência de sistemas de informação robustos favorece o congestionamento dos canais logísticos com itens de baixa ou nenhuma prioridade, comprometendo a eficácia da resposta e a entrega de suprimentos essenciais às populações afetadas (Balcik *et al*., 2010; Varella e Gonçalves, 2015; Sánchez-Partida *et al*., 2021; Guilherme, 2024).

Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a estrutura, processos e desafios da logística humanitária no Rio Grande do Sul diante das inundações de 2024, visando compreender as práticas adotadas na gestão de doações, a organização das instituições envolvidas, a eficiência operacional e propor diretrizes, por meio de um *framework* para aprimorar o sistema de resposta emergencial. A escolha do caso do Rio Grande do Sul como objeto de estudo se justifica não apenas pela magnitude dos eventos, mas também pela recorrência do tipo de desastre analisado. De acordo com dados do CRED (2024), as inundações representam o tipo de desastre natural mais frequente no Brasil, totalizando, aproximadamente, 115 ocorrências entre os anos de 2000 e 2024.

2. MÉTODO

O desenvolvimento deste trabalho foi feito por meio das seguintes etapas: (1) Definição do objeto de estudo e delimitação do escopo; (2) Revisão da Literatura (3) Coleta de dados secundários; (4) Análise dos dados; (5) Desenvolvimento do *framework*.

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O objeto de estudo deste trabalho consiste na análise das operações relacionadas à logística humanitária no contexto de desastres ambientais, com ênfase nos processos de gestão da demanda, dos estoques e dos transportes de doações. Para isso, adotou-se o desastre caracterizado por fortes inundações e deslizamentos de terra que atingiram o estado do Rio Grande do Sul em 2024, evento no qual exigiu uma grande complexidade logística para o atendimento das pessoas que foram impactadas por ele. Mais de 2 milhões de pessoas foram afetadas, com cerca de 580 mil desalojadas e mais de 150 mortes confirmadas (Rio Grande do Sul, 2024a).

O período selecionado para a análise abrange desde o início dos temporais (27/04/2024) até um mês após o evento, o que corresponde a fase mais crítica do ponto de vista logístico, uma vez que a infraestrutura ainda estava muito comprometida e os processos de resposta ao desastre estavam em fase de estruturação. A Figura 1 apresenta registros da época das inundações, destacando-se o trecho da BR-116, em Caxias do Sul, em que houve a ruptura quase que total da pista (a); e a área externa do Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre, completamente alagada (b).



Figura 1: Trecho da BR-116 em Caxias do Sul (a); e a área externa do Aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre (b)
Fonte: Adaptado de Gaúcha ZH (2024); CNN (2024)

3.1. Cronologia dos desastres no Rio Grande do Sul

A fim de compreender a magnitude e a cronologia do desastre, apresenta-se na Tabela 1 os principais eventos ocorridos no Rio Grande do Sul. Ao longo do primeiro mês de resposta às inundações e deslizamentos no Rio Grande do Sul, houve mobilização articulada de diversos atores – sociedade civil, ONGs, empresas privadas, Defesa Civil e forças militares – para estruturar uma rede de apoio integrada (Guilherme, 2024). O Centro de

Operações de Emergência (COE) em Porto Alegre coordenou a comunicação e a alocação de recursos. Paralelamente, os Correios recolheram mais de 15 mil toneladas de doações em todo o país, das quais 3,5 mil toneladas foram entregues à Defesa Civil até 22 de maio de 2024, contando com o apoio logístico da Força Aérea Brasileira para transporte entre as bases em Guarulhos (SP) e Galeão (RJ). Em Porto Alegre, o Centro de Distribuição Vila Jardim funcionou como um *hub* central, com voluntários na triagem e despacho. Na fase final, pontos de distribuição comunitários em escolas e centros sociais garantiram as entregas das doações à população afetada (Guilherme, 2024).

Tabela 1: Resumo cronológico das ações

Data	Eventos
27/04/2024	Início dos temporais no Vale do Rio Pardo.
29/04/2024	Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia) emite alerta vermelho para chuvas intensas.
01/05/2024	Decretado estado de calamidade e início das evacuações nas áreas de risco.
05/05/2024	Reativado Canal SOS RS e mobilização de ONGs e da população civil.
06/05/2024	Correios iniciam campanha nacional de arrecadação para as vítimas.
09/05/2024	Desabastecimento de supermercados (água e alimentos básicos) afetam 4,7 milhão de pessoas.
10/05/2024	Interrupções em rodovias; fechamento do aeroporto de Porto Alegre; redução das operações ferroviárias.
13/05/2024	Parceria com empresas para operação de *call center* e sistema de gestão de doações em tempo real.
14/05/2024	Correios intensificam transporte com o apoio da FAB.
15/05/2024	Defesa Civil suspende recebimento de roupas e prioriza itens essenciais.
16/05/2024	Lançamento da plataforma Solidariedade RS.
17/05/2024	Reabertura do Porto de Pelotas após 15 dias fechado.
21/05/2025	Ampliação da rede logística dos Correios com apoio privado.
24/05/2024	Lançamento do Plano Rio Grande - Lei nº 16.134 (Rio Grande do Sul, 2024).
29/05/2024	Início dos programas Auxílio Reconstrução e Saque Calamidade do FGTS.

Fonte: Adaptado de EBA (2024); Rio Grande do Sul (2024a); Rio Grande do Sul (2024b); Widelabs (2024).

3.2. Gestão de doações e o processo logístico

A gestão de doações no Rio Grande do Sul seguiu um processo estruturado para atender as populações afetadas, embora ainda enfrentassem desafios em sua execução. Esse sistema envolveu etapas essenciais, desde o recebimento e triagem das doações até a análise da demanda e a entrega final nas áreas mais necessitadas. Cada fase desse processo foi coordenada em parceria com a Defesa Civil e outras entidades, que trabalharam juntas para organizar e priorizar itens fundamentais, como água, alimentos e produtos de higiene. A maior demanda na Plataforma Solidariedade RS foi por alimentos (29%), seguida de itens diversos (29%), higiene pessoal e limpeza (18%), itens de vestuário (6%) e água (4%) (Widelabs, 2024).

Observa-se uma diferença nas necessidades identificadas, principalmente em eventos como este em que o sistema de fornecimento de água ficou temporariamente comprometido. Esperava-se que a água figurasse como o item de maior demanda. No entanto, os dados da plataforma Solidariedade RS, indicaram que a demanda por este item representou apenas 4% do total, revelando uma possível incoerência entre as necessidades reais e as registradas ou então fato de a plataforma apresentar dados coletados entre 20 e 60 dias após o início dos eventos. Vale destacar que os dados extraídos da plataforma Solidariedade RS (Widelabs, 2024) não incluíam medicamentos, item essencial, principalmente nas fases iniciais da resposta a desastres.

3.2.1. Processo logístico nas entregas das doações

De acordo com os dados da plataforma Solidariedade RS (Widelabs, 2024), foi possível identificar aspectos positivos e pontos de melhoria no processo logístico utilizado. Em relação à **demanda**, a classificação e priorização de itens nas etapas da triagem, principalmente de alimentos e produtos de higiene foi um item positivo. A mídia, publicações nas redes sociais e toda a sociedade civil se mobilizou para estimular doações. Contudo, a ausência de controle e atualização manual das demandas tornou o processo de doações lento. Um mapeamento socioeconômico da população permitiria otimizar e direcionar estrategicamente o envio de suprimentos. Quanto ao **estoque,** a criação de centros de distribuição em cidades estratégicas, como Caxias do Sul, Lajeado e Passo Fundo, facilitou o armazenamento e a adaptação às demandas locais, o que pode ter contribuído para uma resposta mais rápida e eficiente. Mas a eficácia deste sistema, desenvolvido pela empresa Latromi Technology, sobre gestão de estoques em tempo real, permanece incerta por falta de dados disponíveis para a consulta pública.

Em relação ao **transporte e distribuição**, os danos à infraestrutura (rodovias, ferrovias e aeroportos) representaram um grande obstáculo às operações logísticas. Em resposta, a criação de rotas alternativas e o uso de diferentes modos de transporte foram medidas essenciais para contornar as interdições e manter o fluxo de suprimentos, assegurando que as doações chegassem mesmo em condições mais adversas.

3.3. *Framework* de logística humanitária

O *framework* elaborado (Figura 2) está estruturado em cinco etapas: planejamento pré-desastre, gestão da demanda, gestão de estoque, gestão de transporte e distribuição/entrega.



Figura 2: *Framework* de logística humanitária
Fonte: Autores, 2024.

No planejamento pré-desastre, a prioridade deve ser mapear as áreas de risco e infraestruturas críticas, a criação de estoque estratégicos (de emergência) e formalização de parcerias para garantir rapidez e eficiência na resposta. A gestão da demanda está relacionada na atualização constante das necessidades das áreas afetadas, por meio de uma plataforma de monitoramento em tempo real e comunicação com órgãos locais. A gestão de estoques visa organizar e controlar o armazenamento de doações e suprimentos para garantir que itens essenciais estejam disponíveis e sejam distribuídos conforme a demanda.

A gestão de transporte está relacionada com o uso de mapeamento, roteirização e otimização de rotas utilizando-se múltiplos modos de transporte para superar barreiras e interrupções nas infraestruturas. A etapa de distribuição e entrega está relacionada à garantia de atendimento às necessidades das comunidades de forma eficiente e eficaz, por meio de pontos estrategicamente localizados e com o suporte de líderes comunitários. A colaboração e a integração tecnológica entre as entidades atuantes e adaptação contínua entre os processos pode garantir respostas mais rápidas e eficazes em situações de desastres.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os eventos ocorridos no Rio Grande do Sul em 2024 evidenciaram a vulnerabilidade urbana frente a diversos tipos de desastres, como inundações e deslizamentos, destacando a necessidade de uma resposta emergencial mais robusta, principalmente devido a intensidade das chuvas ocorridas em um curto período e com um grande volume de água. Como pontos positivos, pode-se destacar os centros de distribuição regionalizados, a priorização de itens essenciais e o uso multimodal de transportes para atender a população que ficou isolada sem ter como se deslocar.

No entanto, a dificuldade de acesso em alguns lugares, de controle das demandas devido à ausência de um sistema integrado e da reposição contínua foram desafios encontrados, mesmo com uma grande quantidade de doações enviadas por todo o país. A falta de transparência e de dados confiáveis sobre a gestão de doações no país limitou um planejamento mais eficaz. Observa-se a necessidade de ampliação da rede de monitoramento meteorológico e aprimoramento da capacitação da Defesa Civil para atuações emergenciais. É preciso que haja um sistema integrado para otimizar o processo logístico e assegurar que as doações cheguem com rapidez e precisão às comunidades afetadas, pois o foco da logística humanitária é resolver conflitos e salvar vidas.

Sugere-se, para estudos futuros: (i) ampliar pesquisas com *stakeholders*, avaliando a capacitação e treinamento de diversos profissionais e voluntários envolvidos com a logística humanitária; (ii) estudos sobre o uso integrado de plataformas, para otimizar o fluxo de informações e monitoramento em tempo real das doações e suprimentos em contextos de desastres; (iii) estudos comparativos entre diferentes tipos de desastres naturais no Brasil para desenvolver modelos logísticos adaptativos; e (iv) validação de *frameworks* que orientem políticas públicas e ações no âmbito do planejamento e execução da logística humanitária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balcik, B.; B. M. Beamon; C. Krejci; K. M. Muramatsu e M. Ramirez (2010) Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities. *International Journal of production economics*, v. 126, n. 1, p. 22-34.

Blaudt, L. M.; T. W. Alvarenga e Y. Garin (2023) Desastre ocorrido em Petrópolis no verão de 2022: aspectos gerais e dados da defesa civil. *Geosciences= Geociências*, v. 42, n. 1, p. 59-71.

Bündnis Entwicklung Hilft; Ruhr University Bochum. Institute for International Law of Peace and Armed Conflict (IFHV). *World Risk Report 2023*. Berlin: Bündnis Entwicklung Hilft; Bochum: IFHV, 2023.

Çelik, M.; Ö. Ergun; B. Johnson; P. Keskinocak; Á. Lorca; P. Pekgün e J. Swann (2012) Humanitarian logistics. In: *New directions in informatics, optimization, logistics, and production*. Informs, p. 18-49.

CRED (2024). *EM-DAT: The International Disaster Database*. Bélgica: Université Catholique de Louvain. Disponível em: https://www.emdat.be/ (acesso em 19/09/2024)

CNN (2024) Imagens mostram aeroporto de Porto Alegre tomado pela água. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/imagens-mostram-aeroporto-de-porto-alegre-tomado-pela-agua-veja/ (acesso em 12/11/2024).

EBA-Empresa Brasileira de Logística (2024) Transporte de doações para o sul. Disponível em: https://www.eba.com.br/2024/05/16/transporte-de-doacoes-para-o-sul/ (acesso em 01/11/2024).

Guilherme, A.C.F. (2024) Humanitarian logistics as a guarantee of fundamental rights: a theoretical and practical analysis in the case of the floods in Rio Grande do Sul. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 10, p. e09409.

Instituto Brasil Logística (2021) *Guia da Logística Humanitária*. Disponível em: https://ibl.org.br/wp-content/uploads/2021/08/GuiadeLogisticaHumanitaria1.pdf. (acesso em 25/05/2024)

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies – IFRC (2024) *What is a Disaster?* Disponível em: https://www.ifrc.org/our-work/disasters-climate-and-crises/what-disaster. (acesso em 19/10/2024)

Leiras, A.; Brito Jr, I.; Peres, E.; T. Bertazzo e H. Yoshizaki (2014) Literature review of humanitarian logistics research: trends and challenges. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, v. 4, n. 1, p. 95-130.

Nogueira, C. W.; M. B. Gonçalves e D. D. Oliveira (2009) O enfoque da logística humanitária no desenvolvimento de uma rede dinâmica para situações emergenciais: o caso do Vale do Itajaí em Santa Catarina. In: ANPET - XXIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Salvador/BA.

Rio Grande do Sul. Defesa Civil (2024a) *Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 01/07/2024*. Disponível em: https://defesacivil.rs.gov.br (acesso em 21/10/2024).

Rio Grande do Sul (2024b) Lei nº 16.134, de 24 de maio de 2024. Institui o Plano Rio Grande, Programa de Reconstrução, Adaptação e Resiliência Climática do Estado do Rio Grande do Sul, cria o Fundo do Plano Rio Grande – FUNRIGS – e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul*, n. 103.

Sánchez-Partida, D.; J. L. Martínez-Flores; S. O. Caballero-Morales; P. Cano-Olivos; I. Mora-Ochomogo e I. Serrato (2021) Donation management in disaster relief operations: a survey. *Disaster Risk Reduction in Mexico: Methodologies, Case Studies, and Prospective Views*, p. 245-261.

Silva, L. F. (2011) *Gestão da logística humanitária: proposta de um referencial teórico*. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto COPPEAD de Administração, Rio de Janeiro.

Thomas, A. S. e L. R. Kopczak (2005) From logistics to supply chain management: the path forward in the humanitarian sector. Fritz Institute, v. 15, n. 1, p. 1-15.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction-UNDRR (2025) *Disaster Losses and Damages Data*: A Review of Existing Applications and Use Cases. Disponível em: https://www.undrr.org/media/105262 (acesso em 28/05/2025).

Van Wassenhove, L. N. (2006) Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear. *Journal of the Operational Research Society*, v. 57, n. 5, p. 475-489.

Varella, L.; Gonçalves, M. B. (2015) A gestão das doações na logística humanitária: estratégias para evitar o caos. In: ANPET- XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte, Ouro Preto/MG.

Widelabs (2024) Projeto Solidariedade RS. Disponível em: https://solidariedaders.widelabs.com.br (acesso em 28/11/2024).

Julia Braga Soares da Silva (julia.bragasrs@gmail.com)[1]
Patricia Baldini de Medeiros Garcia (patricia.garcia@unifei.edu.br)[1,2]
Ester Divieso (esterdivieso@gmail.com)[1]
Robson Flávio Castro (robsonca@unicamp.br)[1]
Orlando Fontes Lima Jr. (oflimaj@unicamp.br) [1]
Janaina Antonino Pinto (janainaantonino@unicamp.br)[1]
[1] LALT/UNICAMP, R. Albert Einstein, 951, 3º Piso, Sala 02, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas – SP
[2]UNIFEI - Instituto de Engenharias Integradas, Rua Irmã Ivone Drumond, 200 – Distrito Industrial II, Itabira - MG

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO NO MÉTODO *ε-CONSTRAINT* PARA RESOLVER DOIS PROBLEMAS BIOBJETIVOS DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS DURANTE A COVID-19

Filipe Mendes Gonçalves Machado, Glaydston Mattos Ribeiro, Marcus Vinicius Oliveira Camara
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Frente ao aumento na quantidade de desastres, a logística humanitária se coloca como uma área que visa minimizar seus impactos. A utilização de ferramentas como otimização multiobjetivo auxilia no processo de tomada de decisão durante a operação logística no âmbito humanitário, devido a existência, muitas vezes, de *trade-offs* nos contextos analisados. Esta pesquisa propôs resolver dois problemas de otimização biobjetivo a partir da implementação do Método *ε-Constraint* aliado a aplicação de um algoritmo para atualizar o valor dos parâmetros ε. A otimização proposta visa minimizar custos e maximizar a demanda atendida de uma cadeia logística de suprimentos hospitalares durante a pandemia de COVID-19 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, sendo que um dos dois modelos prioriza a alocação da demanda a hospitais prioritários enquanto o outro aloca a demanda de forma igualitária. Os experimentos computacionais foram aplicados à quatro instâncias e o resultado final é definido pelo conjunto de soluções não dominadas de cada instância.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A quantidade de desastres reportados no Banco de Dados de Desastres Internacionais, entre o final da década de 1950 e o final da década de 2010, cresceu mais de 100% (Silva, 2011). Nesse contexto, Negreiros *et al*. (2021) evidenciaram as perdas de vidas humanas como as maiores consequências imediatas dos desastres na maioria dos casos. Além disso, pandemias apresentam uma complexidade ímpar em relação a outros tipos de desastres, devido às instabilidades que se apresentam e aos desafios logísticos impostos por conta de fatores como restrições à circulação de pessoas, mão de obra e matéria prima disponíveis (Carvalho *et al*., 2025).

Frente ao panorama do aumento na ocorrência de desastres, em especial os biológicos, a logística humanitária surge como um campo voltado para as operações de socorro às populações afetadas, e visa minimizar as consequências dos desastres (Dos Santos e Lopes, 2023). Ela atua na gestão da cadeia de suprimentos, atendimentos de vítimas e na continuidade de serviços essenciais à população afetada. Além disso, a complexidade do planejamento logístico ressalta a necessidade de buscar ferramentas no campo científico que auxiliem este processo (Carvalho, 2022). O campo da Pesquisa Operacional se coloca, nesse sentido, como uma alternativa viável no cenário científico, a partir da utilização de modelos matemáticos que auxiliem no processo de tomada de decisão durante a operação logística no âmbito humanitário (Altay e Green, 2006).

Entretanto, em alguns casos, não existe uma única decisão que atenda simultaneamente a todos os objetivos almejados de maneira satisfatória (Modiri-Delshad e Rahim, 2016). Por vezes, a existência de um conflito de interesses entre os diferentes objetivos considerados, também chamado de *trade-off*, impacta de forma definitiva o contexto analisado (Coello *et al*., 2007; Camara, Ferrari e Ribeiro, 2024).

Nessa pesquisa, propomos dois problemas biobjetivos que foram resolvidos com o Método de Solução *ε-Constraint* em conjunto a um algoritmo que reduz a quantidade de iterações do método por meio da atualização inteligente dos parâmetros ε. Os problemas biobjetivos propostos têm como base a modelagem matemática apresentada em Machado (2025) e visam: (1) minimizar custos; e (2) maximizar a demanda atendida de uma cadeia logística de suprimentos hospitalares com roteamento de veículos em um cenário de pandemia de COVID-19 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. O primeiro modelo, nomeado DSP, não prioriza a alocação de demanda dos hospitais localizados em regiões mais afetadas pela doença. Já o segundo modelo, nomeado DCP, considera o atendimento prioritário a hospitais localizados em áreas com maior número de casos de COVID-19.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Esta seção apresenta a cadeia logística e modelagem multiobjetivo que são objetos de estudo deste trabalho e, por fim, as descrições da implementação do Método de Solução *ε-Constraint* para os dois problemas biobjetivos e do algoritmo proposto para atualizar os parâmetros ε.

2.1. Cadeia logística

A cadeia de suprimentos hospitalares considerada, inicialmente descrita em Carvalho (2022) é composta por dois elos logísticos, na qual o primeiro elo (Elo 1) compreende a distribuição dos insumos oriundos de fornecedores para os centros de distribuição e o segundo (Elo 2) é formado pela alocação destes insumos aos

hospitais. O Elo 1 apresenta viagens simples de ida e volta e, no Elo 2, as viagens dos centros de distribuição aos hospitais para abastecimento dos suprimentos solicitados são realizadas a partir de rotas. A cadeia considera frotas heterogêneas nos dois elos e duas diferentes amostras de demanda oriundas de duas amostras temporais diferentes na qual, em ambas, a quantidade de demanda é insuficiente devido às incertezas de uma pandemia. A Figura 1 apresenta o esquema ilustrativo da cadeia proposta.

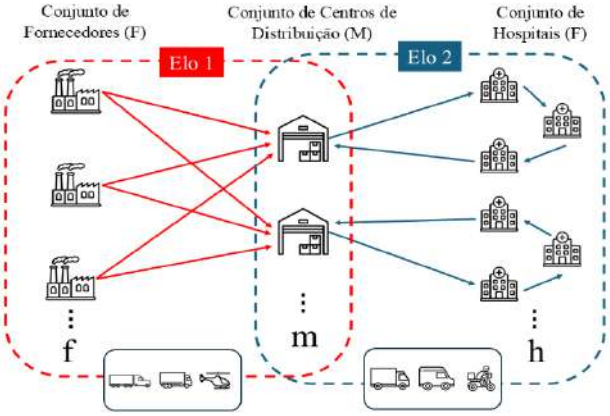


Figura 1: Cadeia logística utilizada.

2.2. Modelagem matemática multiobjetivo

Os problemas biobjetivos visam minimizar os custos totais da cadeia logística e maximizar a demanda atendida. No primeiro problema, o Modelo DSP não prioriza a alocação de demanda dos hospitais localizados em regiões mais afetadas pela doença e é apresentado a seguir:

$$Minimizar\ z_1 = C_f + C_{var} + C_{cd} + C_t \quad (2.1)$$

$$Maximizar\ z_2 = dem_a \quad (2.2)$$

Sujeito a: restrições apresentadas em Machado (2025).

No segundo problema, o Modelo DCP prioriza a alocação da demanda e visa, também, maximizar o atendimento da demanda a estes hospitais.

$$Minimizar\ z_3 = C_f + C_{var} + C_{cd} + C_t - \frac{dem_a}{DEM_{tot}}\ FP \quad (2.3)$$

$$Maximizar\ z_4 = dem_a \quad (2.4)$$

Sujeito a: restrições apresentadas em Machado (2025).

Em que: C_f se refere aos custos fixos de aluguel de veículos para viagens, nos dois elos; C_{var} se refere aos custos variáveis, de acordo com o trajeto escolhido para realização da viagem, nos dois elos; C_{cd} se refere ao custo fixo de abertura dos centros de distribuição; e, por fim, C_t se refere aos custos atrelados aos tempos de viagem de acordo com o trajeto escolhido nos dois elos. dem_a se refere à demanda atendida; DEM_{tot} se refere a quantidade total de demanda total solicitada e FP é um fator referente a priorização de cada hospital de acordo com a incidência de novos casos na localidade do hospital. Quanto maior a quantidade de novos casos, maior o fator FP.

No Modelo DSP, a Função Objetivo (2.1) minimiza os custos totais da cadeia logística englobando o custo associado ao tempo total das viagens realizadas. A Função Objetivo (2.2) maximiza a demanda atendida. Já no Modelo DCP, a Função Objetivo (2.3) minimiza os custos totais além de considerar a alocação da demanda prioritária. Esta parcela é acrescentada na Função Objetivo (2.3) já considerando as características do Método ε-*Constraint* na etapa seguinte. A Função Objetivo (2.4) maximiza a demanda atendida também.

As restrições do modelo garantem que a quantidade de suprimentos da cadeia logística não exceda a capacidade de oferta, assim como é garantido que não há excedentes nos centros de distribuição (estoque). O modelo garante que sejam respeitadas as capacidades máximas dos veículos nos Elos 1 e 2, além das capacidades máximas dos centro de distribuição. O roteamento garante que todos os veículos iniciem viagens para hospitais ou centros de distribuição virtuais e que apenas centros de distribuição abertos iniciem viagens. Cada hospital pode receber no máximo uma viagem e é respeitada a conservação de fluxo (a quantidade de viagens que chega

a cada hospital é igual a quantidade de viagem que parte deste hospital). Por fim, são consideradas janelas de tempo para garantir o atendimento no horário adequado, além de impedir a criação de sub-rotas. Para detalhamento matemático das restrições, consultar Machado (2025).

2.3. Método ε-*Constraint*

Para determinar o conjunto de soluções ótimas não dominadas para cada caso analisado foi implementado o Método de Solução ε-*Constraint*. O primeiro passo considerado envolveu a escolha da função objetivo principal do problema. Na literatura, alguns autores indicam o custo como o mais importante elemento a ser considerado na Otimização Multiobjetivo (Camara, 2021).

Esta análise levou em consideração, também, o caráter constante das quantidades máximas e mínimas de demanda que pode ser atendida. Para todos os casos tratados, os limitantes inferiores são iguais a zero caso a solução ótima indique não atender a nenhum hospital e os limitantes superiores são equivalentes ao máximo valor possível de atender da demanda solicitada (valor este que é conhecido a partir dos dados de entrada de oferta e demanda do estudo de caso).

Desta forma, para aplicar o Método ε-Constraint aos dois problemas biobjetivos propostos, foram definidas a Função Objetivo (2.1) como principal para o Modelo DSP, enquanto a Função Objetivo foi definida como principal para o Modelo DCP. As Funções Objetivo (2.2) e (2.4) foram incluídas como Restrição (2.5) nos dois modelos, respectivamente. Foram definidos 50 valores para o parâmetro ε_i (totalizando 51 valores devido a $\varepsilon_0 = 0$). Eles correspondem à intervalos de igual tamanho da demanda, compreendidos entre os valores mínimo e máximo possíveis de serem atendidos, levando em consideração a demanda solicitada e a capacidade limitada de oferta.

$$\varepsilon_i \leq dem_a \,,\; i \in \mathbb{Z} \mid i = [0{,}50] \tag{2.5}$$

As Restrições (2.5) determinam que a quantidade de demanda atendida em sua totalidade na cadeia logística, englobando Elos 1 e 2, seja igual ou superior ao valor limitante de ε_i. Isto ocorre, pois, a função objetivo visa a minimização do custo, enquanto a maximização da demanda implica em aumento dos custos. Assim, para cada iteração, o modelo gera soluções ótimas que correspondem à solução de menor custo para uma quantidade de demanda que seja igual ou superior ao parâmetro ε_i da atual iteração.

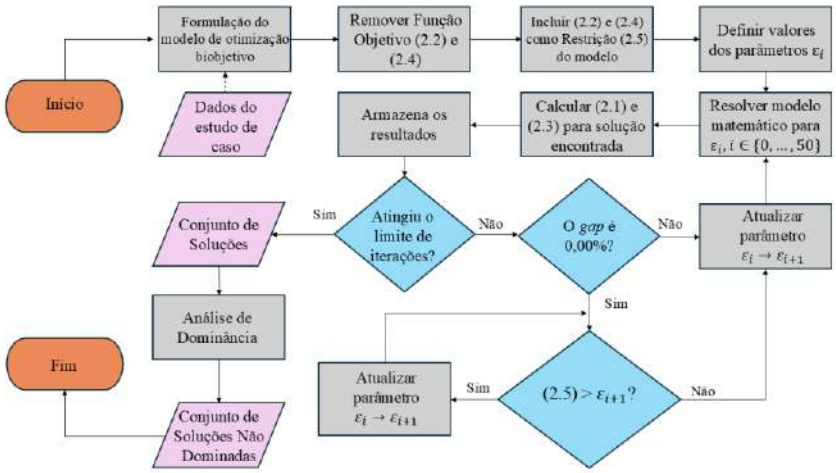


Figura 2: Algoritmo implementado.

Devido a possibilidade da abordagem ε-*Constraint* requerer um alto número de iterações, foi implementado um algoritmo a fim de atualizar o parâmetro ε_i de forma que fosse possível reduzir o número de iterações e eliminar iterações desnecessárias. Ou seja, iterações na qual valor do parâmetro ε_i é inferior à quantidade de demanda atendida da solução obtida.

Durante o processo de implementação da abordagem ε-*Constraint*, o parâmetro ε_i foi atualizado através do algoritmo da seguinte maneira: inicia-se o método a partir da primeira iteração ($\varepsilon_0 = 0$). Após obter a solução, calcula-se o valor de dem_a, isto é, a Restrição (2.5). Em seguida, caso ainda não tenha sido atingido o limite de iterações e se a solução obtida na iteração atual for ótima, compara-se o valor da Restrição (2.5) com o parâmetro ε da iteração seguinte, isto é, ε_{i+1}. Se o valor da Restrição (2.5) for superior, atualiza-se $\varepsilon_i = \varepsilon_{i+1}$

e compara-se novamente o valor da Restrição (2.5) com o parâmetro ε da iteração seguinte, isto é, ε_{i+1}. Este processo segue sucessivamente até que o valor do parâmetro ε_{i+1} correspondente a iteração seguinte seja superior ao valor da Restrição (2.5).

Se, após obter a solução da iteração atual, o limite de iterações estiver atingido o limite ou se a solução obtida não for ótima, o algoritmo apenas atualiza o parâmetro $\varepsilon_i = \varepsilon_{i+1}$ e resolve o modelo matemático novamente. O fluxograma que ilustra as etapas do Método ε-*Constraint* e do algoritmo implementado é visto na Figura 2.

3. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Nesta seção são apresentados o estudo de caso, as instâncias utilizadas e os resultados dos experimentos computacionais. O modelo matemático foi implementado em linguagem Python® em computador equipado com processador Intel® Core™ i5-3350P CPU 3.10GHz, 8 GB de memória RAM, rodando o solver Gurobi® 10.0.3 build v10.0.3rc0 sob o sistema operacional Microsoft Windows 11 Pro de 64 Bits. Como critério de parada adicional, foi definido um limite de tempo de 7.200 segundos para cada iteração realizada.

3.1. Estudo de caso

O estudo de caso escolhido nesta pesquisa foi inicialmente apresentado na literatura em Carvalho (2022) e Machado (2025). Foram escolhidos cinco municípios da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Duque de Caxias, Niterói, Petrópolis, Rio de Janeiro e São João de Meriti). A cadeia logística compreende 12 fornecedores, cinco locais candidatos a centro de distribuição, 23 hospitais, seis produtos a serem distribuídos, três tipos de veículos no Elo 1 e três tipos de veículos no Elo 2. São utilizadas duas diferentes amostras de demanda dos suprimentos hospitalares, de forma que a oferta de suprimentos seja inferior à demanda em diferentes graus de insuficiência para todo as duas amostras. Co isso, são utilizadas quatro amostras (duas para cada modelo biobjetivo) que são nomeadas da seguinte forma: DSP-1, DSP-2, DCP-1 e DCP-2.

3.2. Resultados computacionais

A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados para as quatro instâncias utilizadas. Os resultados foram consolidados após análise de dominância das soluções individuais de cada iteração do Método ε-*Constraint.* Somente a instância DCP-2 não apresentou ganhos na redução de iterações com aplicação do algoritmo para definição inteligente dos parâmetros ε.

Tabela 1: Localização dos pontos de coleta utilizados na pesquisa

Instância	Quantidade de soluções obtidas	*Gaps* médios	Tempos computacionais médios	Quantidade de soluções não dominadas
DSP-1	48	5,29 %	5.809 s	46
DSP-2	49	6,77 %	5.931 s	41
DCP-1	48	6,13 %	6.143 s	42
DCP-2	51	7,71 %	6.375 s	43

A Figura 3 apresenta os gráficos dos conjuntos de soluções não dominadas. As subdivisões dos eixos das abcissas indicam todos os 51 intervalos de ε_i. A Figura 3a apresenta a comparação entre os dois modelos para a amostra 1 da instância e a Figura 3b apresenta a comparação entre os modelos para a amostra 2. Estes gráficos não podem ser classificados como Pareto Ótimo devido aos *gaps* residuais em algumas iterações após tempo limite de 7.200 segundos.

Para as duas amostras de demanda, o Modelo DCP abrangeu soluções com menor custo total. Isto se deve, em partes, devido a existência da parcela da priorização na função objetivo, pois esta gera soluções com custo inferior ao considerado "custo real". Isto é, o custo que não consideraria penalizações subjetivas como a parcela de priorização.

Para as quatro instâncias, foi possível verificar que a variação do custo à medida que a quantidade de demanda atendida aumentava apresentou uma variação pequena em relação ao custo total para as soluções correspondentes às primeiras iterações. Nas últimas iterações de cada instância, que correspondem a maiores valores de demandas atendidas, as variação nos custos totais apresentaram maiores diferenças em relação à variação apresentada nas iterações iniciais. A causa destas variações percentualmente maiores nas últimas iterações é um aumento do custo atrelado às viagens no Elo 1. O Elo 2, devido ao roteamento de veículos implementado, apresentou um melhor resultado em relação ao aumento dos custos. Foi identificado, também, que todas as quatro instâncias apresentaram três *clusters* de soluções. Cada *cluster* apresenta soluções cujos custos totais apresentam uma variação percentual menor em relação à variação nos percentuais da demanda

atendida para estas mesmas soluções. Com isso, é possível identificar soluções que apresentam maiores quantidades de demanda atendida associadas a pequenos acréscimos no custo total.

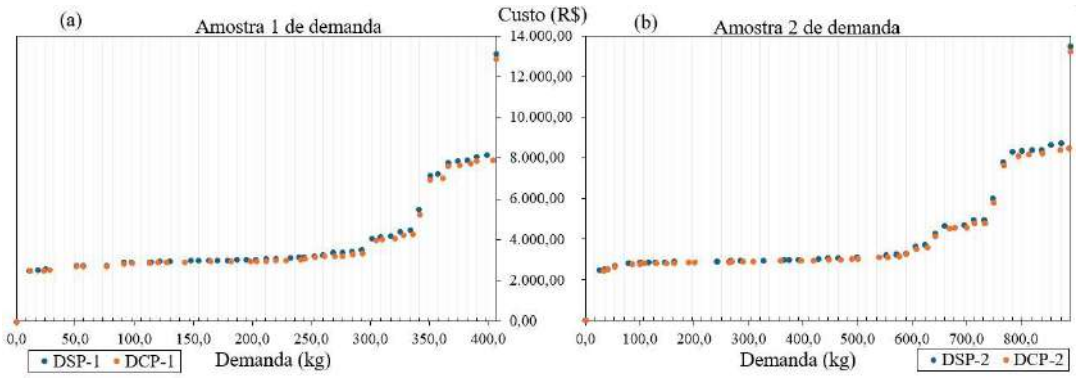


Figura 3: Resultados das quatro instâncias aplicadas aos dois modelos biobjetivos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs resolver dois modelos biobjetivos aplicando o Método de Solução ε-*Constraint* e um algoritmo inteligente para atualizar os parâmetros ε. Os resultados dos experimentos computacionais demonstraram que a aplicação do Método de Solução foi satisfatório e possibilitou identificar três *clusters* de soluções não dominadas por instância que representam diferentes valores de demanda atendida para variações percentualmente menores dos custos totais. Além disso, esta pesquisa busca contribuir com a literatura através do algoritmo empregado. É sugerido como pesquisas futuras que os problemas biobjetivos aqui propostos sejam resolvidos a partir do Método de Solução da Soma Ponderada, a fim de comparar as diferenças nos resultados obtidos entre os dois métodos de solução. Sugere-se, também, a implementação de soluções não-exatas como heurísticas ou meta-heurísticas devido aos *gaps* residuais de algumas iterações com tempo limite de 7.200 segundos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altay, N. e W. Green (2006) OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, v. 175, pp. 475-493.

Camara, M. V. O. (2021) *Abordagens multiobjetivo para alguns problemas de localização de facilidades*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Camara, M. V. O.; T. Ferrari; G. M. Ribeiro (2024) Modified NSGA-II for solving Bi-objective support unit location problem to assist roadside traffic survey with multi-stages. *Expert Systems with applications*, v. 249, p. 123448.

Carvalho, P. R. D. (2022) *Otimização da distribuição de suprimentos hospitalares frente à pandemia da Covid-19 considerando incertezas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Carvalho, P. R. D.; J. A. Caetano; G. M. Ribeiro e L. Bahiense (2025) Optimization of the distribution of hospital supplies during the Covid-19 pandemic under uncertainties. *Case Studies on Transport Policy*. Submetido 2025.

Coello, C. A. C.; G. B. Lamont; D. A. Van Veldhuizen; et al. (2007) *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, v. 5. Springer.

Dos Santos, M. L. P. e H. S. Lopes (2023) A logística humanitária no gerenciamento de desastres naturais: Revisão Sistemática da Literatura (RSL)orientada ao COVID-19, *Revista De Gestão E Secretariado*, v. 14, n. 2.

Machado, F. M. G. (2025) *Análises mono e biobjetivo para o problema da distribuição de suprimentos hospitalares considerando a pandemia da COVID-19 na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Modiri-Delshad, M. e N. A. Rahim (2016) Multi-objective backtracking search algorithm for economic emission dispatch problem, *Applied Soft Computing*, v. 40, pp. 479– 494.

Negreiros, F.; et al. (2021) *Guia de Logística Humanitária*. Brasília: Instituto Brasil Logística. Disponível em: <https://ibl.org.br/wpcontent/uploads/2021/08/GuiadeLogisticaHumanitaria1.pdf>. Acesso em: 21 de jan de 2025.

Silva, L. de C. F. da (2011) *Gestão da logística humanitária: proposta de um referencial teórico*. Dissertação (Mestrado), COPPEAD/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Filipe Mendes Gonçalves Machado (filipemgm@pet.coppe.ufrj.br)
Glaydston Mattos Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufrj.br) Laboratório de Otimização e Sistemas de Informações Geográficas (OPTGIS) do Programa de Engenharia de Transporte (PET) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Avenida Horácio Macedo, 2030, Bloco I, Sala 244, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Marcus Vinicius Oliveira Camara (marcus@pet.coppe.ufr.br)

MODELO MATEMÁTICO PARA UM PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO DE REPATRIAÇÃO APLICADO EM CENÁRIO DE DESASTRE DE INÍCIO SÚBITO

Thiago Almeida[1], **Alexandre Duarte**[1], **Irineu Brito Jr**[2]
[1]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), [2]Universidade Estadual Paulista (UNESP)

RESUMO
Este artigo propõe um modelo matemático para o problema de designação de repatriação (*repatriation scheduling problem*), além de testar sua aplicação em um caso real brasileiro de migração involuntária. Foi conduzida uma revisão da literatura para estabelecer o estado da arte e identificar lacunas de pesquisa passíveis de abordagem por programação linear. A partir do modelo proposto, um estudo de caso foi conduzido com dados reais de uma operação brasileira de repatriação. Os resultados indicaram que repatriar através da maximização de cidadãos por seus respectivos grupos de prioridade não necessariamente produz soluções operacionalmente eficientes, apesar de garantir um atendimento total dos afetados pela crise humanitária. Dessa maneira, a eficácia da resposta humanitária depende intrinsecamente de uma clara definição das preferências do decisor, permitindo que a modelagem otimize um trade-off estratégico entre objetivos sociais e a eficiência operacional dos recursos.

1. INTRODUÇÃO

A partir de 2019, os países vêm sendo cada vez mais pressionados a se preparar para operações logísticas de emergência, diante de estopins gerados por eventos climáticos extremos, polarização social e migrações involuntárias. No Brasil, essa tendência se confirmou por meio de diversas operações de repatriação: entre fevereiro e junho de 2020, mais de 25 mil brasileiros foram trazidos de volta durante os primeiros meses da pandemia de COVID-19 (Brasil, 2020). Em 2023, o país repatriou 1.500 pessoas durante a crise entre Israel e Hamas (Brasil, 2023a), na Operação 'Voltando em Paz'. Em setembro de 2024, com a escalada do conflito no oriente médio, o Brasil realizou sua maior operação de resgate, chamada 'Raízes do Cedro', trazendo mais de 2.600 cidadãos de zonas de guerra (Brasil, 2024), enfrentando grandes desafios geopolíticos e logísticos.

As repetidas situações de crise sugerem que a rede logística brasileira para resgates internacionais está sob forte pressão (Leiras *et al.*, 2017). A complexidade do planejamento se agrava pela diversidade de causas, que incluem pandemias, conflitos armados, desastres naturais ou eventos imprevistos, exigindo estruturas preparadas para uma mobilização rápida e eficaz (Leiras *et al.*, 2017; Adsanver *et al*., 2023). Nesse sentido, este estudo tem como objetivo fortalecer a capacidade de resposta do Brasil a crises humanitárias por meio de decisões mais rápidas e embasadas, oferecendo uma ferramenta flexível e adaptável a diferentes contextos. O foco está nas fases de planejamento e resposta da logística humanitária voltada à repatriação de pessoas vulneráveis em desastres de ocorrência súbita. A iniciativa se alinha ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 16 da Organização das Nações Unidas (ONU) – Paz, Justiça e Instituições Eficazes – ao contribuir para respostas institucionais mais eficientes e transparentes em situações de crise (United Nations, 2015).

O artigo foi estruturado da seguinte forma: após a introdução, discute-se restrições e critérios em modelos de repatriação e descreve-se as características de um problema de designação aplicado no contexto de repatriação. Em seguida, propõe-se um modelo matemático para o problema e apresenta-se o estudo de caso com dados reais da Operação Voltando em Paz. Finalmente, os resultados e as conclusões são apresentados.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelos de repatriação: restrições e critérios

A literatura sobre o problema de designação especificamente aplicada a repatriação é notavelmente escassa, contrastando com a complexidade e a criticidade dessas missões. Al-Shihabi e Mladenovic (2022) abordam o tema no contexto da pandemia de COVID-19, com um modelo que foca na maximização do número de indivíduos repatriados por grau de prioridade. De forma similar, Marmor (2005), embora em um estudo de evacuação aeromédica pós-ataques terroristas, também explora o contexto de resposta imediata, aplicável em repatriação. Embora problemas de designação em geral busquem eficiência em setores como o industrial, otimizando tempo ou custo, a repatriação enfrenta desafios únicos. Os resultados podem variar conforme a função objetivo: tempo, custos, área não coberta, eficiência operacional (Rebouças, 2022; Al-Shihabi e Mladenovic, 2022). Além de restrições convencionais como tamanho da frota aérea e capacidade de abrigos, modelos de repatriação devem considerar o fechamento de fronteiras, grupos prioritários de indivíduos e tempo

de quarentena antes da relocação final, em casos de desastres sanitários (Al-Shihabi e Mladenovic, 2022). Essa lacuna de estudos sobre repatriação, já constatada previamente por Al-Shihabi (2021), reforça a necessidade de um modelo que possa estruturar operações ao longo do tempo, com adaptabilidade em tempo real, um requisito crucial para cenários de incerteza (Altay e Green, 2006; Kunz, 2012; Leiras, 2014).

Tomasini e Wassenhove (2009) propõem diretrizes para modelos matemáticos em logística humanitária: a função objetivo deve ser clara e alinhada às informações disponíveis no momento da decisão; as restrições devem refletir a limitação de recursos; e o modelo deve lidar com alta incerteza, típica de cenários pós-desastre. Seguindo essa abordagem e a priorização de Al-Shihabi (2021), este estudo busca maximizar o número de cidadãos repatriados, conforme seu grupo de prioridade. As restrições envolvem: a capacidade de recepção nas cidades de destino; limitações operacionais nas cidades de origem; e a capacidade da frota aérea disponível.

2.2 Modelo Matemático para o problema de designação de repatriação

Baseado na estrutura genérica de um problema de transportes (Dantzig e Thapa, 2003), a Figura 1 propõe uma representação em rede para um problema genérico de designação no contexto de repatriação. Indivíduos e seus níveis de prioridade são representados por círculos: preenchido indica alta prioridade, hachurado, média, e em branco, baixa. A posição inicial dos indivíduos é denotada por *Location I*, representando os múltiplos locais de residência no momento do desastre de início súbito. Os pontos de partida para a repatriação (i) são denotados por *Location II*, e os locais de destino (j), por *Location III*; ambos definidos pelas autoridades responsáveis pela operação humanitária. Os indivíduos em *Location II* são alocados aos modais disponíveis (terrestre, marítimo ou aéreo) conforme suas prioridades e transportados para os destinos em *Location III*, de acordo com a capacidade desses nós. Ao chegar, podem permanecer em abrigos temporários ou se deslocar para outras regiões (*Location IV*). A formulação matemática proposta abrange as etapas entre *Location II* e *III*, e o resultado do modelo será a estratégia de repatriação, respeitando restrições operacionais.

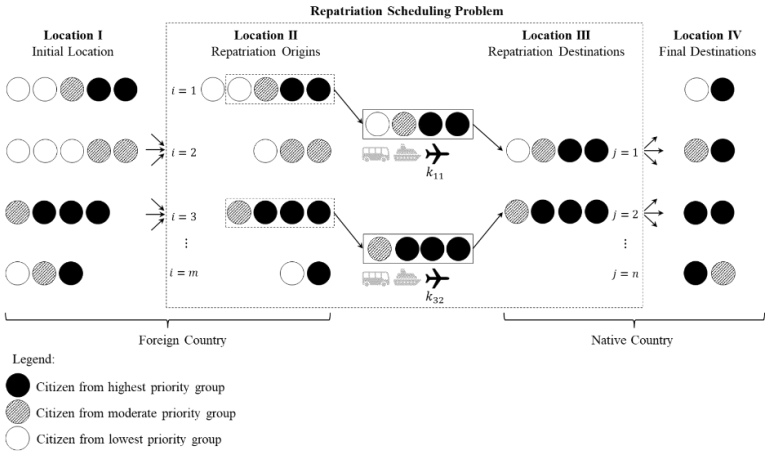


Figura 1: Representação genérica de um problema de designação em repatriação. Adaptado de Dantzig e Thapa (2003).

Apesar de programas de repatriação envolverem múltiplas fases, adota-se, neste trabalho, uma abordagem que divide o problema em múltiplas fases únicas, alterando capacidades e restrições do sistema a cada etapa, customizando o modelo para suportar condições dinâmicas (Al-Shihabi *et al.*, 2021). Ademais, assume-se a premissa de um problema de designação *offline* (Pinedo, 2022), no qual todos os dados (e.g., origens e destinos, capacidades, número de indivíduos e seus respectivos grupos de prioridade) são conhecidos *a priori* e podem ser diretamente utilizados no modelo de otimização. Finalmente, utiliza-se exclusivamente o modal aéreo.

Propõe-se o modelo matemático a seguir para o problema de designação em repatriação para casos de desastres humanitários de início súbito. O conjunto $C = \{1,2,\dots,c\}$ denota os cidadãos, e $P = \{1,2,\dots,p\}$ as prioridades de cada indivíduo; w_{cp} é o peso atribuído ao grupo de prioridade p do indivíduo c. $I = \{1,2,\dots,i\}$ é o conjunto de cidades de origem, com capacidade limite de atendimento (QO_i); $J = \{1,2,\dots,j\}$ é o conjunto de cidades de destino, com capacidade limite de absorção (QD_j). A partir disso, define-se o conjunto A de arcos válidos, $A = \{(i,j): i \in I, j \in J, i \neq j\}$. $K = \{1,2,\dots,k\}$ denota o tipo das aeronaves, que possuem capacidade máxima (QT^k) e número máximo de viagens no horizonte de tempo (F^k). As variáveis de decisão do problema são:

X_{ij}^k (número de viagens que a aeronave do tipo k realiza entre as cidades i e j) e Y_{cij}^k (variável binária que indica se o cidadão c é alocado na aeronave do tipo k para ser repatriado de i para j.

$$\max Z = \sum_{c \in C} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} w_{cp}\, Y_{cij}^k \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Y_{cij}^k \leq QO_i, \forall i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{(i,j) \in A} X_{ij}^k \leq F^k, \forall k \in K \tag{3}$$

$$\sum_{c \in C} Y_{cij}^k \leq QT^k\, X_{ij}^k, \forall (i,j) \in A, \forall\, k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} y_{cij}^k \leq QD_j, \forall j \in J \tag{5}$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} Y_{cij}^k \leq 1, \forall c \in C \tag{6}$$

A função objetivo (Eq. 1) maximiza a quantidade de indivíduos repatriados ponderado por suas respectivas prioridades. As restrições garantem que: a quantidade de indivíduos atendidos na cidade i não exceda o limite operacional daquele local (Eq. 2); a quantidade de viagens realizadas pela aeronave do tipo k é menor do que F^k (Eq. 3); a quantidade de passageiros por aeronave não excede a sua respectiva capacidade (Eq. 4); a quantidade de indivíduos repatriados para uma determinada cidade j não excede o limite de absorção (Eq. 5); cada cidadão é alocado em apenas uma possível combinação (i, j, k) (Eq. 6). O modelo foi estruturado em python, utilizando a versão 11.0.2 da biblioteca Gurobipy, um solver de otimização, sem limite de tempo.

2.3 Dados da Operação Voltando em Paz

O modelo matemático da seção 2.2 foi aplicado a dados reais da Operação Voltando em Paz (VeP-OP), conduzida para repatriar brasileiros após os conflitos entre Israel e Hamas iniciados em outubro de 2023. Considerada a maior operação de repatriação da história do Brasil até aquela data, sua última fase envolveu (Brasil, 2023b): três cidades de origem (Tel Aviv – TLV, Jordânia – AMM e Cairo – CAI); três destinos (Brasília – BSB, Rio de Janeiro – GIG e Guarulhos – GRU); frota heterogênea – KC-30 (238 passageiros), KC-390 (80) e VC-2 (38); e 1.559 cidadãos repatriados. Estes foram organizados em grupos prioritários: A – idosos ($w_{cp} = 10$), B – crianças ($w_{cp} = 6$), C – adolescentes ($w_{cp} = 4$) e D – adultos ($w_{cp} = 2$). Devido à indisponibilidade de dados individuais e da distribuição real entre grupos, foram utilizados percentuais etários da população brasileira com base no Censo Demográfico (IBGE, 2022).

Para ser possível refletir as complexidades logísticas da operação, como os desafios de transporte e as restrições diplomáticas, a fim de se obter resultados mais próximos do caso real, o modelo é capaz de se adaptar seus dados de entrada conforme particularidades do problema em questão. Essa flexibilidade permitiu que as restrições de origem fossem ajustadas conforme desafios logísticos e diplomáticos inerentes à operação. Disso, o número de cidadãos que embarcaram na Jordânia (AMM) e no Cairo (CAI) foram fixados com base nos dados reais da VeP-OP (32 e 114, respectivamente), e a diferença foi então alocada em Tel Aviv (TLV), com 1.413 indivíduos. Além disso, a operação real, dividida em 13 fases, permitiu determinar as restrições de transporte para a frota F^k (máximo de vôos por aeronave k), com um máximo de 9 voos para o KC-30, 2 para o KC-390 e 2 para o VC-2.

Este estudo de caso inicial validou o modelo em um contexto real, permitindo avaliar seu desempenho a partir

de indicadores utilizados em operações da aviação civil. A próxima seção apresentará Tabela 3 com as métricas da solução otimizada e os dados reais da Operação Voltando em Paz. Essa análise aprofundará a validação da aplicabilidade do modelo para otimizar futuras missões humanitárias.

3. RESULTADOS

Obteve-se a Tabela 1 utilizando o modelo da seção 2.2 e os dados da seção 2.3, implementado no Gurobi. Ao todo, foram utilizadas 13 aeronaves, com ocupação média ponderada pelo total de repatriados de 62,6%. Conforme pode ser observado na Tabela 1, alguns vôos performados pelas aeronaves KC-390 e KC-30 possuem uma ocupação média abaixo do valor médio global de 86,2% (IATA, 2024). Isso se deve ao fato de que o modelo não otimiza o uso da frota disponível, fazendo com que vôos operem com baixa ocupação.

Tabela 1: Resultados obtidos – cenário base – tabela resumo.

		Proporção do grupo (%)						
		A	**B**	**C**	**D**	**Total de repatriados**	**Ocupação média (%)**	**Número de vôos**
KC-30	TLV-BSB	29,0	29,0	9,7	32,4	238	100	1
	TLV-GRU	28,1	26,9	8,8	36,2	260	54,6	2
	TLV-GIG	11,5	10,4	3,6	74,5	907	95,3	4
	AMM-BSB	0,0	0,0	100	0,0	32	13,4	1
	CAI-GIG	0,0	0,0	0,0	100	45	18,9	1
KC-390	AMM-BSB	0,0	100	0,0	0,0	8	5,0	2
VC-2	CAI-BSB	0,0	97,4	0,0	2,6	38	100	1
	CAI-GIG	0,0	100	0,0	0,0	31	81,6	1
	Média ponderada	10,1	40,1	10,9	38,9	349,8	62,6	-

Ademais, o número de vôos por aeronave foi determinado com base nas operações conduzidas pela Força Aérea Brasileira na VeP-OP. Somando-se toda a capacidade ofertada (2378), percebe-se que a mesma excede a demanda (1.559 indivíduos), o que contribui para que a solução ótima utilize aeronaves com baixa ocupação.

Em um cenário hipotético extremo, sugerido por Karim *et al.* (2020), pode-se avaliar o comportamento do modelo quando as restrições operacionais não permitem o atendimento total da demanda por repatriação. Nesse caso, assume-se que 30% do espaço interno das aeronaves KC-30 e KC-390 é utilizado para transportar profissionais de saúde e suprimentos. Esse ajuste impõe uma nova capacidade limite de transporte, que combinada a uma oferta menor de aeronaves, levam a uma nova solução ótima, resumida Tabela 2.

Tabela 2: Resultados obtidos – cenário extremo – tabela resumo.

		Proporção do grupo (%)						
		A	**B**	**C**	**D**	**Total de repatriados**	**Ocupação média (%)**	**Número de vôos**
KC-30	TLV-BSB	29,3	36,5	12,0	22,2	167	100	1
	TLV-GRU	27,8	40,4	11,1	20,7	334	100	2
	TLV-GIG	28,1	34,1	16,2	21,6	167	100	1
KC-390	TLV-GIG	28,6	46,4	25,0	0,0	56	100	1
	TLV-BSB	28,6	33,9	21,4	16,1	56	100	1
VC-2	TLV-BSB	65,8	28,9	2,6	2,6	38	100	1
	Média ponderada	33,7	37,3	14,2	14,8	164,6	100	-

Nesse novo cenário, apenas 818 assentos foram ofertados (a demanda permaneceu em 1.559 indivíduos). Na ausência de assentos suficientes para atender toda a necessidade de repatriação, as vagas são preenchidas por indivíduos com alta prioridade, conforme estabelecido na função objetivo do modelo proposto. Para a amostra considerada, todos os indivíduos do grupo A, B e C foram repatriados (246, 309 e 111, respectivamente). Em contrapartida, apenas 152 dos 893 indivíduos do grupo D foram repatriados, representando 17% da categoria.

O modelo matemático gerou uma solução com 13 voos e ocupação média ponderada de 62,6, com alta variância nas taxas de ocupação (5% a 100%). Em contraste, a operação da FAB demonstrou alta eficiência, com a maioria dos voos operando entre 84,2% e 92,0%. As únicas baixas taxas de ocupação média, da aeronave KC-30, se devem a dois voos pouco populados realizados ao final da operação. O modelo matemático proposto, em vez do custo operacional, repatria em função da prioridade dos indivíduos, o que acarreta em taxas de ocupação inferiores. O comparativo das soluções é apresentado na Tabela 3. Vale destacar que a operação da

FAB utilizou, além das 12 aeronaves militares, 1 voo comercial para repatriar apenas 4 indivíduos, sendo que este último não contribui para as taxas de ocupação apresentadas na Tabela 3, por não haver dados de ocupação relativa; caso esse último voo tivesse sido conduzido por uma aeronave militar, a ocupação ponderada teria sido impactada por mais um voo com baixa ocupação.

Tabela 3: Comparativo entre os resultados do modelo e a VeP-OP.

	VeP-OP			Resultados do modelo proposto		
Aeronave	**Total de voos**	**Total de repatriados**	**Ocupação (%)**	**Total de voos**	**Total de repatriados**	**Ocupação (%)**
KC-30	8	1.353	60,5	9	1.482	69,2
KC-390	2	138	74,4	2	8	5,0
VC-2	2	64	70,9	2	69	90,8
Origem	**Total de voos**	**Total de repatriados**	**Ocupação (%)**	**Total de voos**	**Total de repatriados**	**Ocupação (%)**
TLV	8	1.413	79,2	9	1.413	77,4
AMM	1	32	70,9	1	32	13,4
CAI	4	114	7,9	3	114	36,3
Destino	**Total de voos**	**Total de repatriados**	**Ocupação (%)**	**Total de voos**	**Total de repatriados**	**Ocupação (%)**
BSB	6	394	34,5	4	278	43,7
GRU	1	32	70,9	3	298	58,0
GIG	6	1.133	79,6	6	983	80,0

Vale salientar que, enquanto o modelo de período único oferece uma alocação imediata dos recursos necessários, a operação de repatriação real levou quase dois meses para ser concluída. Essa limitação reforça a necessidade de um modelo multi-período, melhoria que será melhor desemvolvida nas sugestões de estudos futuros. Finalmente, é importante destacar que a ordem de repatriação executada pela FAB não seguiu, necessariamente, o nível de prioridade dos indivíduos, enquanto que o modelo matemático proposto utiliza a mesma métrica proposta por Al-Shihabi (2021), alocando de forma prioritária pessoas com maior peso nos primeiros voos. Os dados publicamente divulgados da VeP-OP não oferecem um perfil detalhado dos indivíduos repatriados, o que pode favorecer uma alocação mais eficiente conforme a demanda ao longo do tempo, contribuindo para taxas de ocupação mais homogêneas.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposto um modelo matemático para o problema de designação em repatriação aplicado no contexto de desastres de início súbito, cujo objetivo é maximizar a repatriação de indivíduos conforme os seus respectivos níveis de prioridade. O modelo foi testado com dados reais da operação Voltando em Paz.

Os resultados obtidos indicam que o modelo matemático proposto, ao ser aplicado no conjunto original de dados, produz soluções em que os cidadãos são totalmente atendidos, porém com baixa eficiência operacional (i.e., vôos com baixa lotação). Em um cenário extremo, em que parte da capacidade das aeronaves é utilizado para transportar suprimentos de ajuda humanitária e profissionais de saúde, as soluções obtidas possuem uma eficiência operacional maior; todavia, isso se deve ao fato da demanda por repatriação não ter sido totalmente atendida. Nesse sentido, é fundamental definir claramente as preferências do tomador de decisão para um melhor refinamento das soluções obtidas pelo modelo, haja vista que convém incluir outros critérios na função objetivo, garantindo um balanço entre critérios sociais, humanitários e econômicos no contexto de repatriação.

Uma limitação da metodologia proposta neste estudo é a consideração de ofertas e demandas constantes. Apesar desses dados oscilarem significativamente em cenários emergenciais, nos quais as informações são escassas e as necessidades dos afetados se alteram com frequência, uma missão de repatriação conta com uma etapa de planejamento prévia. Nesta fase, o Ministério das Relações Exteriores disponibiliza um formulário online no qual as pessoas interessadas podem se cadastrar e informar características que ajudam a estabelecer grupo de prioridade, cidade de embarque, necessidades extras, entre outras. É a partir desse formulário, com prazo para preenchimento, que se garante uma estimativa de demanda para a etapa de planejamento prévio.

Para pesquisas futuras, recomenda-se: explorar cenários com ofertas e demandas variáveis, permitindo a aplicação do modelo em cenários posteriores ao de planejamento prévio; implementar funções bi-objetivo, permitindo uma maior ocupação; expandir o modelo para multi-período, com formação de filas e penalização da quantidade de períodos em que indivíduos com alta prioridade esperam para serem repatriados.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e do CNPq processo 311232/2022-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adsanver, B., Balcik, B., Bélanger, V., & Rancourt, M. È. (2024). Operations research approaches for improving coordination, cooperation, and collaboration in humanitarian relief chains: A framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, *319*(2), 384-398. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.11.031.

Al-Shihabi, S., AlDurgham, M. M., & Arafeh, M. (2021). COVID-19 repatriation programs — Classification and optimization models. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *12*, 100499. DOI: 10.1016/j.trip.2021.100499.

Al-Shihabi, S., & Mladenović, N. (2022). A mixed integer linear programming model and a basic variable neighborhood search algorithm for the repatriation scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, *198*, 116728. DOI: /10.1016/j.eswa.2022.116728.

Altay, N., & Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. European Journal of Operational Research, v. 175, n. 1, p. 475–493. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.05.016.

Brasil (2020). Mais de 25 mil brasileiros já foram repatriados durante a pandemia. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/noticias/assistencia-social/2020/06/mais-de-25-mil-brasileiros-ja-foram-repatriados-durante-pandemia (acesso em: 16/02/2025).

IBGE (2022). Disponível em: https://www.ibge.gov.br/en/statistics/social/labor/22836-2022-census-3.html?lang=en-GB. (acesso em: 10/11/2024).

Brasil (2023a). 1.477 resgatados: conheça detalhes da Operação Voltando em Paz. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/11/1-477-resgatados-conheca-os-detalhes-da-operacao-voltando-em-paz (acesso em: 16/02/2025).

Brasil (2023b). Governo faz balanço da maior operação de retirada de brasileiros de uma zona de conflito. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/10/governo-faz-balanco-da-maior-operacao-de-repatriacao-em-uma-zona-de-conflito (acesso em: 16/02/2025).

Brasil (2024). Os números finais da operação de resgate de brasileiros no Líbano, a maior já feita pelo país. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/12/operacao-de-resgate-de-brasileiros-no-libano-e-a-maior-ja-feita-pelo-pais (acesso em: 16/02/2025).

Dantzig, G. B., & Thapa, M. N. (2003). *Linear programming: Theory and extensions* (Vol. 2). New York: Springer.

IATA (2024). Passenger Demand Up 8.6% in August: Load Factor Reaches Record High. Disponível em: https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-10-03-02/ (acesso em: 20/02/2025).

Karim, S. S. A., Tahir, F. A. M., Mohamad, U. K., Bakar, M. A., Mohamad, K. N., Suleiman, M., Kahn, H. O., & Noor, J. M. (2020). Experience repatriation of citizens from epicenter using commercial flights during COVID-19 pandemic. International Journal of Emergency Medicine, 13, 1-7. DOI: 10.1186/s12245-020-00308-7.

Kunz, N., & Reiner, G. (2012). A meta-analysis of humanitarian logistics research. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, Vol. 2 No. 2, pp. 116-147. DOI: 10.1108/20426741211260723.

Leiras, A., Jr, I. B., Peres, E., Bertazzo, T., & Yoshizaki, H. (2014). Literature review of humanitarian logistics research: Trends and challenges. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, Vol. 4 No. 1, pp. 95-130. DOI: 10.1108/JHLSCM-04-2012-0008.

Leiras, A., Yoshizaki, H., Samed, M. M. A., & Goncalves, M. B. (2017). *Logística humanitária* (1ª. ed.). Rio de Janeiro: Elsevier.

Pinedo, M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (6ª. ed.). DOI: 10.1007/978-3-031-05921-6.

Rebouças, S., Rebouças, C. A., Scarpel, R. A., & Correia, A. R. (2022). Logística em Desastres: Otimização de Rotas de Unidades Aéreas de Resgate. *Spectrum: Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa*, *23*(1), 44.

Tomasini, R. M., & Van Wassenhove, L. N. (2009). From preparedness to partnerships: case study research on humanitarian logistics. *International Transactions in operational research*, *16*(5), 549-559. DOI: 10.1111/j.1475-3995.2009.00697.x.

United Nations (2015). The UN Sustainable Development Goals. Disponível em: http://www.un.org/sustainabledevelopment/summit/ (acesso em: 16/02/2025).

Thiago Rodrigues de Almeida (thiago.almeida@usp.br), *Alexandre Duarte* (alexandre.duarte@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Av. Prof. Luciano Gualberto, 380, Butantã, São Paulo, SP, Brasil
Irineu de Brito Junior (irineu.brito@unesp.br)
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência e Tecnologia, Av. Engenheiro Francisco José Longo, 777, Jardim São Dimas, São José dos Campos, SP, Brasil

Logística reversa

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

APLICAÇÕES DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO EM CIDADES INTELIGENTES

Alice Maria Costa Silva, Lino Guimarães Marujo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
O setor da construção civil é um grande gerador de resíduos, que se tiverem destinações inadequadas, geram um enorme impacto ambiental e social. Como solução, surgiram na literatura conceitos como a logística reversa, responsável pelo retorno ambientalmente correto desses resíduos, e cidades inteligentes, baseadas na integração de tecnologias para solucionar problemas urbanos e gerir processos na cidade. Desse modo, essa pesquisa, de natureza exploratória e qualitativa, possui o objetivo de mapear na literatura aplicações da logística reversa de resíduos de construção civil em cidades inteligentes, através de uma revisão nas bases Scopus e Web of Science. A análise identificou a utilização de tecnologias como IoT, RFID, *Blockchain*, entre outras, em diversas etapas da logística reversa, por exemplo: na coleta, através da adoção de lixeiras inteligentes, na gestão inteligente do transporte e na destinação final. Portanto, esse estudo corrobora a importância desses conceitos, porém ressalta a necessidade de aplicações práticas.

1. INTRODUÇÃO

Segundo ABREMA (2024), estima-se que o setor de construção gerou aproximadamente 44 milhões de toneladas de resíduos no Brasil em 2023, ou seja, o setor é um grande gerador de resíduos. Nesse sentido, a logística reversa desses resíduos surge como uma alternativa para diminuir os impactos gerados pelo setor. Esses resíduos de construção seriam retornados para serem reutilizados, reciclados ou para terem uma disposição adequada (CSCMP, s.d.; Da Silva *et al.*, 2023).

Além disso, outro termo que vem ganhando destaque é o de Cidades Inteligentes, que utilizam tecnologias como sensores para melhorar a qualidade de vida e o meio ambiente das regiões, solucionando problemas urbanos existentes. Nesse contexto, a aplicação de uma logística reversa de resíduos de construção em cidades inteligentes poderia otimizar o processo, elevar o desempenho do canal reverso e promover eficiência e sustentabilidade. Entretanto, observa-se que, embora haja uma literatura consolidada sobre o conceito de cidades inteligentes (Allahar, 2020; Cengiz et al., 2025; Pezua; Christofle, 2025; Silva; Khan; Han, 2018) e sobre tecnologias digitais aplicadas à economia circular da construção (Elghaish et al., 2022), são ainda escassos os estudos que conectam diretamente esses dois campos — cidades inteligentes e logística reversa de resíduos de construção.

Ademais, a adoção de uma logística reversa inteligente na construção civil também enfrenta outros desafios, como a falta de capacitação para realizar o canal reverso e incluir tecnologias nele, bem como a quantidade limitada de estudos que relacionam logística reversa com tecnologias — realidade semelhante à apontada em pesquisas sobre gestão de resíduos em cidades inteligentes, que destacam a ausência de uma visão holística no tema. Além disso, o setor de construção tende ao conservadorismo, optando por métodos tradicionais e amplamente conhecidos (Ness et al., 2015; Silva et al., 2021; Szpilko et al., 2023).

Entretanto, é inegável que a possibilidade de aplicar tecnologias na logística reversa da construção revolucionaria e otimizaria o processo reverso dos resíduos, trazendo benefícios como a melhoria da qualidade de vida e do meio-ambiente, auxiliando inclusive nas pautas estabelecidas pela ONU de desenvolvimento sustentável, mais especificamente nos ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Por conseguinte, esse estudo tem como objetivo contribuir com o avanço do conhecimento nessa área pouco estudada, porém importante para o desenvolvimento urbano, através de uma revisão bibliográfica de aplicações de logística reversa no setor de construção civil em cidades inteligentes (Elghaish *et al.*, 2022; Nações Unidas Brasil, s.d.; Silva; Khan; Han, 2018).

2. METODOLOGIA

Considerando os objetivos desta pesquisa, será adotada uma abordagem qualitativa, exploratória e descritiva. Além disso, esse projeto foi baseado em uma revisão bibliográfica, de forma a mapear e agrupar nesse estudo aplicações de logística reversa de resíduos de construção em cidades inteligentes. Para isso, baseando-se no protocolo PRISMA, foram utilizadas as bases de dados *Scopus* e *Web Of Science* para encontrar publicações no tema. Dessa forma, foram buscadas publicações com as palavras-chave “Logística Reversa” e “Cidades Inteligentes”, e os documentos utilizados obedecem ao critério de terem sido publicados entre 2015 e 2025, sendo em português ou inglês. Além disso, outro método para busca de referências utilizado foi o método “bola

de neve", procedimento esse trazido por Wohlin (2014), fundamentado na busca entre as citações de artigos já selecionados como referência. Desse modo, seguindo o protocolo PRISMA, 4 estudos foram incluídos numa versão prévia da revisão, 1 estudo através das bases de dados e 6 através do método "bola de neve", tendo um total de 11 estudos incluídos na revisão. Outros estudos encontrados ao longo da revisão foram eliminados por não corresponderem aos critérios estabelecidos, por estarem duplicados, por fugirem ao tema após análise de títulos e resumos, por falta de acesso ao documento completo ou por não focarem em aplicações de logística reversa em cidades inteligentes relevantes ao setor de construção. Nesse sentido, os materiais de pesquisa escolhidos são relacionados a logística reversa em cidades inteligentes, ou relacionados a temas semelhantes, como aplicações em cidades inteligentes ou uso de tecnologias na economia circular ou na gestão de resíduos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram encontradas oito aplicações de logística reversa em cidades inteligentes, porém nenhuma era referente especificamente aos resíduos de construção civil. Entretanto, pode ser feito um paralelo entre resíduos de construção civil e outros tipos de resíduos, desde que sejam respeitadas as classificações definidas na norma ABNT NBR 10.004 (2004), e sejam levadas em consideração as classes de resíduos de construção civil definidas pela Resolução CONAMA nº 307 (2002). Essa consideração é necessária devido à diversidade de resíduos provenientes da construção civil, que está diretamente relacionada à ampla gama de materiais utilizados nas atividades do setor. Segundo a Resolução do CONAMA citada, dentre os resíduos de Classe A estão inclusos argamassa, concreto, solo e cerâmica; a Classe B é composta por materiais recicláveis como plásticos, papel, metais e madeira; a Classe C, resíduos como gesso, de difícil reciclagem; e a Classe D, resíduos perigosos, como tintas, solventes e óleos. Portanto, é possível aplicar à gestão dos resíduos da construção civil exemplos bem-sucedidos de logística reversa e boas práticas adotadas em outros tipos de resíduos.

- Adoção de lixeiras inteligentes na coleta de resíduos

Szpilko *et al.* (2023) comenta sobre a adoção de lixeiras inteligentes para medir o peso e o nível de resíduos dentro do recipiente. Esse monitoramento em tempo real seria transmitido para central responsável, para então programar as coletas desses resíduos, aumentando a produtividade da gestão de resíduos. Nesse sentido, segundo Salman e Hasar (2023), esse monitoramento pode ser feito através de sensores de *Internet of Things* (IoT), podendo ser aprimorado com o uso de Identificação por Radiofrequência (RFID), GPS e Sistema de Informação Geográfica. Ademais, eles também ressaltam a importância da primeira etapa da gestão de resíduos, sendo nesse caso a coleta, visto que um problema nessa etapa afetaria todas as outras subsequentes. Desse modo, sem a adoção de lixeiras inteligentes, os autores Salman e Hasar (2023) citam problemas como os caminhões de coleta percorrendo grandes distâncias para coletar recipientes parcialmente vazios, ou falta de coleta antes que os recipientes transbordem.

- Segregação inteligente de resíduos

Szpilko *et al.* (2023) cita a utilização de tecnologias como *Machine Learning* para essa etapa de segregação e classificação de resíduos em casos de reciclagens mistas, porém os autores não definem como seria utilizada tal tecnologia. Já Giel e Dabrowska (2024) criam uma estrutura para separação de resíduos com a utilização sensores para obter dados sobre fluxo de volumes de resíduos, algoritmos de *Machine Learning* para classificar materiais através de capturas de imagem, desenvolvimento de uma simulação com esses dados no *Digital Twin* e por fim uma integração com algoritmos de aprendizado para otimizar o sistema.

- Rastreamento de materiais

Bekrar *et al.* (2021) ressalta a importância do rastreamento de materiais ao longo do sistema de logística reversa, com dados como localização, qualidade, quantidade e tipo de material para definir aspectos como recursos necessários ao transportador, capacidade necessária e modos de transporte. O autor sugere para esse rastreamento o uso da tecnologia *Blockchain*. Nesse sentido, para registrar essas informações, faz-se necessário um sistema seguro e transparente de dados, o que, segundo Gaur *et al.* (2025), a tecnologia *Blockchain* garante, evitando assim a perda de privacidade. Portanto, esse rastreamento de resíduos de construção é importante para garantir que não tenham uma destinação ambientalmente inadequada ou ilegal, evitando impactos ambientais indesejáveis. Além disso, o rastreamento também promove a transparência das operações de logística reversa.

- Gestão inteligente do transporte na logística reversa

Em relação ao transporte ao longo do processo de logística reversa foram encontradas algumas aplicações. Szpilko *et al.* (2023) cita, por exemplo, a utilização da tecnologia IoT para otimização de rotas, mais especificamente para coleta de resíduos. Além disso, os autores também citam a possibilidade de mapear a geração de resíduos e as coletas que estão sendo realizadas através da tecnologia *Big Data* e de outros sistemas que fornecem localizações geográficas. Esse mapeamento também auxiliaria na otimização de rotas, especialmente para diminuir distâncias percorridas ao longo da coleta de resíduos, além de identificar caso haja ineficiência da coleta. Nessa pesquisa é ressaltado também como essas tecnologias estão transformando positivamente o transporte na gestão de resíduos.

Segundo Salman e Hasar (2023), a gestão inteligente do transporte no âmbito da gestão de resíduos está relacionada com a utilização de lixeiras inteligentes, visto que através dos dados sobre a capacidade de coletores é possível planejar rotas de coletas eficientes, reduzindo emissão de gases, evitando congestionamentos e diminuindo o tempo gasto com as coletas de resíduos.

Já Demirel (2023) comenta que Istanbul possui um centro de controle do meio ambiente que faz o acompanhamento do transporte resíduos através de sensores acoplados a esses veículos. Tal iniciativa é importante para garantir a segurança, a gestão e inspeção desse transporte e garante que esses resíduos sejam destinados adequadamente, ou seja, seria um monitoramento da logística reversa desses resíduos.

- Simulações das etapas e operações da logística reversa

Cada processo e etapa do canal reverso de resíduos de construção pode ser simulado e previsto através de tecnologias como *Digital Twin*, que cria uma cópia da realidade no meio digital. Desse modo, essa simulação auxilia a visualizar o caminho de retorno do material, identificando possíveis problemas, especialmente devido ao caráter dinâmico da logística reversa, e prevendo impactos da cadeia nos âmbitos social, econômico e ambiental (Abideen *et al.*, 2021; Giel; Dabrowska, 2024; Sun; Yu; Solvang, 2023).

- Uso de etiquetas de Identificação por Radiofrequência e sensores de estresse para reutilização de aço

Ness *et al.* (2015), com o intuito de transformar a indústria do setor mais inteligente, propõe o uso de tais tecnologias para promover a reutilização do aço, promovendo consequentemente sua logística reversa, e criando oportunidades de novos negócios para empresas de aço. Nesse sentido, o autor defende o uso de tais etiquetas para adquirir dados sobre o ciclo de vida do aço, teor de carbono, tipo de aço e local utilizado, para depois espelhar tais dados na tecnologia BIM, que consiste em um modelo digital de construção que auxilia em aspectos como planejamento e quantitativo de materiais, mantendo tais registros seguros e atualizados dinamicamente por essas duas tecnologias, garantindo assim a qualidade do material para o reuso. Desse modo, o autor sugere a possibilidade de uma busca virtual do aço a ser reutilizado com base nos critérios estabelecidos pela empresa, considerando aspectos como logística, custos e meio-ambiente, e, pós-transação física, leitores dessas etiquetas gravariam a nova localização do material.

Por conseguinte, a solução dada pelo autor otimizaria o processo de logística reversa do aço, diminuindo distâncias a serem percorridas, diminuindo custos e aumentando a quantidade de reutilização de aço por facilitar o processo, ao mesmo tempo em que garante o seu desempenho estrutural. Dessa forma, o processo de logística reversa se tornaria mais inteligente ao utilizar dados em tempo real disponibilizado por sensores, sendo uma solução para problemas gerados pelo descarte irregular desses resíduos, que será atenuado devido a sua reutilização.

- Reciclagem de resíduos sólidos para geração de energia elétrica

Demirel (2023) apresenta algumas aplicações de cidades inteligentes no mundo e, nesse caso, o autor apenas cita a reciclagem de resíduos sólidos para geração de energia da cidade de Istanbul em seu artigo, sem trazer detalhes. Apesar de não ser uma aplicação que auxilia ao longo do processo, é um incentivo para que haja a logística reversa, visto que para se ter a reciclagem, é necessário um canal reverso eficiente. Além disso, esse tipo de aplicação serve como alternativa para materiais que ainda não possuem tecnologias suficientes para sua reciclagem ou para os casos em que o custo-benefício de reciclar não seja vantajoso, ambos acontecem no setor da construção civil, aspecto corroborado por Lima *et al.* (2024). Entretanto, é importante que haja mais estudos sobre essa aplicação para sua ampliação em outras cidades inteligentes.

Outra pesquisa que cita esse tipo de aplicação é a de Szpilko *et al.* (2023), porém os autores não citam a geração de energia especificamente através da reciclagem, mas através de resíduos em geral, ressaltando os benefícios

ambientais e financeiros, reduzindo a necessidade de aterros e promovendo uma gestão de resíduos mais sustentável.

- Queima do gás gerado nos aterros para produção de energia

Assim como a aplicação anterior, Demirel (2023) apenas cita sem dar detalhes. Esta também é uma aplicação de Istanbul e incentiva a logística reversa, visto que a destinação correta dos resíduos pode ajudar na produção de energia na cidade, tanto com a reciclagem como com a destinação em aterros adequados. No entanto, também são necessários mais detalhes e estudos sobre essa aplicação, especialmente com a utilização de resíduos de construção.

Desse modo, essas aplicações podem ser adaptadas ao setor de construção civil. As caçambas, por exemplo, podem ser inteligentes, possuindo monitoramento para evitar que elas transbordem e para programar coletas, reduzindo a quantidade de veículos e o tempo gasto com a coleta. Além disso, os sensores de IoT também podem ser utilizados em aterros, de forma a monitorar o nível de resíduos e contaminação do solo, auxiliando na escolha da destinação adequada, ideia corroborada por Salman e Hasar (2023), visto que, segundo o autor, tais sensores podem auxiliar a controlar problemas causados pelos aterros em cidades inteligentes.

Ademais, outra aplicação imprescindível para o setor é a gestão inteligente do transporte, visto que a construção transporta uma grande quantidade de resíduos, e além de ser uma das etapas com maiores custos, é uma das partes da logística reversa que mais impacta o meio ambiente, através da emissão de gases poluentes, e o social, com congestionamentos, poluição sonora e do ar. Portanto, a gestão inteligente do transporte promove a transparência, sustentabilidade e um controle maior das autoridades, através de uma gestão baseada em tecnologias que permitam esse controle em tempo real.

Por fim, destaca-se também a importância do uso de tecnologia na segregação de resíduos, visto que muitas vezes o setor possui caçambas com diversos tipos de resíduos misturados que necessitam ser separados para posterior reutilização, reciclagem ou descarte adequado, e tais tecnologias tornariam o processo mais eficiente.

4. CONCLUSÃO

A literatura apresenta algumas aplicações de logística reversa em cidades inteligentes que ressaltam sua importância e como a união dos dois conceitos otimizaria o processo de retorno dos resíduos de forma sustentável. Em especial, destaca-se a adoção de lixeiras inteligentes citada por alguns autores, que poderia ter um impacto positivo nas etapas subsequentes e se relaciona diretamente com a gestão inteligente do transporte. Esse último também se destaca, visto que o transporte gera grandes custos e grandes impactos ambientais e sociais, portanto seu monitoramento por sensores auxiliaria no seu custo e controle, otimizando rotas e garantindo a destinação correta dos resíduos. Entretanto, a maioria desses estudos são baseados no campo conceitual, sem aplicações práticas. Dessa forma, existe a necessidade de aplicar esses conceitos para se ter real noção de sua aplicabilidade e para que tais aplicações sejam disseminadas para diversas cidades do mundo.

O presente artigo possui limitações por ser um estudo conceitual, sem aplicações práticas. Além disso, existem limitações na escolha dos artigos, como a língua limitada a inglês ou português, e no fato de muitos desses artigos serem focados em resíduos em geral ou em resíduos urbanos, sendo necessária uma análise mais profunda de sua aplicação em resíduos de construção. Por isso, como sugestão de pesquisas futuras temos a revisão bibliográfica abrangendo mais pesquisas, e estudos de caso mais detalhados de tais aplicações já existentes ou aplicando na prática, especialmente no setor de construção, algumas ideias propostas neste artigo que ainda estão no campo conceitual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abideen, A. Z.; Pyeman, J.; Sundram, V. P. K.; Tseng, M. L.; Sorooshian, S. (2021) Leveraging Capabilities of Technology into a Circular Supply Chain to Build Circular Business Models: A State-of-the-Art Systematic Review. *Sustainability*, v. 13, n. 16, p. 8997. DOI: 10.3390/su13168997.

ABNT (2004) Norma ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABREMA (2024) Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama (acesso em 25/06/2025).

Allahar, H. (2020) What are the Challenges of Building a Smart City? *Technology Innovation Management Review*, v. 10, n. 9, p. 38-48. DOI: 10.22215/timreview/138

Bekrar, A.; Ait El Cadi, A.; Todosijevic, R.; Sarkis, J. (2021) Digitalizing the Closing-of-the-Loop for Supply Chains: A

Transportation and Blockchain Perspective. *Sustainability*, v. 13, n. 5, p. 2895. DOI: 10.3390/su13052895

Brasil (2002) Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002 – Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente.

Cengiz, B.; Adam, I. Y. Ozdem, M.; Das, R. (2025) A survey on data fusion approaches in IoT-based smart cities: Smart applications, taxonomies, challenges, and future research directions. *Information Fusion*, v. 121. DOI: 10.1016/j.inffus.2025.103102.

Council of Supply Chain Management Professionals – CSCMP (s.d.) Supply Chain Management Terms and Glossary. Disponível em: https://cscmp.org/CSCMP/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx (acesso em 05/05/2025).

Da Silva, B. S.; Borba, J.L.G., Vargas, D.B., Rodriguez, C.M.T. (2023) Green Logistics, Reverse Logistics, Sustainable Logistics, and Eco-efficiency in the Construction Industry. In International Joint conference on Industrial Engineering and Operations Management. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 51-60.

Demirel, D. (2023) The Impact of Managing Diversity on Building the Smart City A Comparison of Smart City Strategies: Cases From Europe, America, and Asia. *SAGE Open*, v. 13, n. 3. DOI: 10.1177/21582440231184971

Elghaish, F.; Matarneh, S. T.; Edwards, D. J.; Rahimian, F. P.; El-Gohary, H.; Ejohwomu, O. (2022) Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework. *Construction Innovation*, v. 22, n. 3, p. 647-670. DOI: 10.1108/CI-03-2022-0062.

Gaur, T. S.; Yadav, V.; Prakash, S.; Panwar, A. (2025) Integration of industry 4.0 and circular economy for sustainable E-waste management. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, v. 36, i. 5. DOI: 10.1108/MEQ-07-2024-0277

Giel, R.; Dabrowska, A. (2024) A digital twin framework for cyber-physical waste stream control systems: towards reverse logistics 4.0. *Logforum*, v. 20, n. 3. DOI: 10.17270/J.LOG.001054

Lima, A. T.; Kirkelund, G. M.; Lu, Z.; Mao, R.; Kunther, W.; Rode, C.; Slabik, S.; Hafner, A.; Sameer, H.; Dürr, H. H.; Flörke, M.; Lowe, B. H.; Aloini, D.; Zerbino, P.; Simoes, S. G. (2024) Mapping circular economy practices for steel, cement, glass, brick, insulation, and wood – A review for climate mitigation modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 202. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114697

Nações Unidas Brasil (s.d.) Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs (acesso em 25/06/2025).

Ness, D.; Swift, J.; Ranasinghe, D. C.; Xing, K.; Soebarto, V. (2015) Smart steel: new paradigms for the reuse of steel enabled by digital tracking and modelling. *Journal of Cleaner Production*, v. 98, p. 292-303. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.055

Pezua, O. R.; Christofle, S. (2025) Future research opportunities on sustainable smart cities: bibliometric analysis and network visualization. *Discover Sustainability*, v. 6, n. 187. DOI: 10.1007/s43621-025-00983-7

Salman, M.Y.; Hasar, H. (2023) Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques. *Sustainable Cities and Society*, v. 94. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104567

Silva, B. N.; Khan, M.; Han, K. (2018) Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 38, p. 697-713. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.053

Silva, W. D. A., Seleme, R., Zattar, I. C., Marques, M. A. M., Drozda, F. O.; Kleina, M. (2021) Barreiras à sustentabilidade ambiental na logística da construção civil habitacional em Curitiba/PR. *Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade (GeAS)*, v. 10, p. 16148. DOI: 10.5585/geas.v10i1.16148

Sun, X.; Yu, H.; Solvang, W. D. (2023) A Digital Reverse Logistics Twin for Improving Sustainability in Industry 5.0. In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 273-286.

Szpilko, D.; Gallegos, A. T.; Naharro, F. J.; Rzepka, A.; Remiszewska, A. (2023) Waste Management in the Smart City: Current Practices and Future Directions. *Resources*, v. 12, n. 10, p. 115. DOI: 10.3390/resources12100115

Wohlin, C. (2014) Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering. In Proceedings of the 18th international conference on evaluation and assessment in software engineering, p. 1-10.

Alice Maria Costa Silva (alice.costa@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Lino Guimarães Marujo (lino.marujo@coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

LOGÍSTICA REVERSA E ASPECTOS SUSTENTÁVEIS NA GESTÃO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE: OTIMIZAÇÃO DE ROTAS E CARBONO EVITADO

Samuel Placidio Galdino da Silva, Fábbio Henrique Machado Ribeiro da Silva, Renato da Silva Lima, José Arnaldo Barra Montevechi
Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
Este estudo teve como objetivo desenvolver e aplicar um modelo de otimização para frotas em Logística Reversa de resíduos de serviço de saúde, focando na redução de custos e de emissões de carbono. Foram considerados dados operacionais reais de uma empresa de Itajubá-MG, para otimizar a seleção de veículos e suas rotas. As emissões de carbono foram calculadas com base na quilometragem percorrida e em fatores de conversão específicos para cada veículo. Os resultados indicam potencial de redução de 33% nos custos de transporte e de 34% nas emissões, considerando uma redução de 19% na quilometragem total e 100% da demanda de coleta atendida. Tais resultados demonstram que a otimização logística gera ganho financeiro substancial e contribui de maneira decisiva para a sustentabilidade da operação.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor de transportes destaca-se como um dos principais contribuintes para o aquecimento global, com o consumo de combustíveis fósseis atingindo níveis recordes e gerando uma parcela significativa das emissões totais. Para enfrentar a complexidade da destinação correta de materiais, a Logística Reversa surge como uma estratégia fundamental. Segundo Novaes (2007) o objetivo principal da Logística Reversa é administrar o retorno de materiais dos pontos de consumo aos pontos de origem, seja para recaptura de valor, seja para a disposição final. Ela tem se consolidado como uma fonte de vantagem competitiva para as empresas, impulsionada pela intensificação da concorrência, pela redução do ciclo de vida dos produtos, pelas exigências legais e pelo aumento da conscientização ambiental. Outro conceito relevante no contexto da Logística Reversa é o *Triple Bottom Line* (TBL), que propõe um equilíbrio entre os pilares econômico, ambiental e social, promovendo a responsabilidade social corporativa sem perder de vista a viabilidade econômica. O Decreto nº 10.936/2022 que regulamenta a Lei nº 12.305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, exigindo das empresas a implementação de sistemas de Logística Reversa para garantir sua destinação correta. Para alcançar a máxima eficiência e sustentabilidade na Logística Reversa, a redução de custos de transporte e a otimização de rotas são imperativas. Conforme Laporte *et al.* (2000), o problema de roteirização de veículos busca estabelecer rotas que minimizem o custo total da operação. A roteirização de frotas e o planejamento de coletas são decisivos não apenas para a viabilidade econômica, mas também para o desempenho ambiental da atividade, já que uma parcela significativa das emissões totais dos Gases de Efeito Estufa (GEE) acontecem nessa etapa.

O dióxido de carbono (CO_2) é o GEE mais significativo, mas outros gases como o metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), CFC-12 e HCFC-22 também contribuem para este efeito (Babarinde e Adio, 2020). Dada a sua predominância como GEE, o impacto do CO_2 vai além do efeito climático, representando uma séria ameaça à saúde humana. Para quantificar essa relação, estudos mais recentes demonstram que um aumento de 1% nas emissões de CO_2 está diretamente ligado a um crescimento de 0,72% nos atendimentos ambulatoriais e de 0,82% nas internações hospitalares (Tan *et al*., 2022). Embora parte das emissões de GEE tenha origem natural, a grande preocupação se concentra nas fontes antropogênicas, provenientes de setores chave da economia: geração de energia, construção civil, indústria e transportes. Este último, aliás, ilustra a gravidade do cenário: segundo o Sistema de Estimativas de Emissões (SEEG), 2023 marcou um recorde no consumo de combustíveis fósseis, resultando em emissões de 223,8 milhões de toneladas de CO_2e (dióxido de carbono equivalente), o que representa 44% de todos os gases emitidos conjuntamente pelos setores de Energia e de Processos Industriais e Uso de Produtos (PIUP) (SEEG, 2024).

Nesse contexto, esse trabalho aborda o problema das emissões no transporte aplicado à gestão de resíduos e Logística Reversa. O objetivo é propor um modelo de otimização para a gestão de frota na Logística Reversa de resíduos de serviço de saúde, com o propósito de minimizar os custos operacionais e o impacto ambiental associado às emissões de carbono. Ao otimizar a seleção e o roteiro da frota de uma empresa especializada na coleta de resíduos perigosos, o trabalho busca demonstrar o potencial de redução dos custos e o carbono evitado em uma operação real de Logística Reversa de Resíduos de Serviços de Saúde.

2. METODOLOGIA

Esse trabalho propõe a otimização da frota de veículos e das rotas para as operações de Logística Reversa de Resíduos de Serviço de Saúde e o cálculo da emissão de carbono. Para tanto, empregou-se uma abordagem de modelagem quantitativa empírica normativa fundamentada em dados operacionais reais (Bertrand e Fransoo, 2002). A operação desta empresa consiste na coleta dos resíduos em seus clientes, localizados em Minas Gerais e São Paulo, e transporte até seu depósito e centro de tratamento, localizado em Itajubá, MG, Brasil.

A base de dados utilizada refere-se ao detalhamento das operações de coleta de resíduos realizadas pela empresa em janeiro de 2025, especificamente na região do Vale do Paraíba e seu entorno. Os dados foram coletados a partir do sistema interno da empresa e abrangem variáveis para a análise logística: rotas percorridas, endereço, data e horário de cada coleta, massa (em quilogramas) e tipo específico de resíduo coletado (permitindo a distinção entre classificação de periculosidade e manuseio), nome(s) do(s) operador(es) responsável(is), placa de identificação do veículo utilizado e o número do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), documento essencial para o controle e rastreabilidade desses resíduos. A frota de veículos da empresa, objeto central desta otimização, é composta por um total de 11 veículos distintos (Tabela 1). Cada um possui características operacionais consideradas no modelo, como capacidade máxima de carga, custo fixo diário (englobando despesas como depreciação, seguros, licenciamentos e parte dos custos de mão de obra) e custo variável por quilômetro rodado (associado ao consumo de combustível, desgaste de pneus e manutenção proporcional à distância percorrida).

Tabela 1: Composição da frota

ID veíc	Modelo	Tipo de Veículo	Capac. de carga (kg)	Custo fixo diário (R$)	Custo variável (R$/km)	Tipo carregamento
0	VW SPACEFOX	Carro de Passeio	440	255,16	0,55	Manual
1	GM/MONTANA LS2	Picape Leve	600	255,16	0,55	Manual
2	GM/MONTANA LS2	Picape Leve	600	255,16	0,55	Manual
3	IVECO/DAILY 35-150CS	Caminhão Leve	1.545	550,52	1,46	C. paletizada
4	IVECO/DAILY 45S17CS	Caminhão Leve	2.380	550,52	1,46	C. paletizada
5	M.BENZ/ACCELO 815	Caminhão Leve	5.390	639,84	2,06	C. paletizada
6	VW/9.170 DRC 4X2	Caminhão Leve	5.495	639,84	2,06	C. paletizada
7	M.BENZ/915C	Caminhão Leve	5.570	639,84	2,06	C. paletizada
8	M.BENZ/ACCELO 1016 CE	Caminhão Médio	6.310	639,84	2,06	C. paletizada
9	M.BENZ/ATEGO 2433CE	Caminhão Semipesado	16.710	786,10	2,32	C. paletizada
10	M.BENZ/ATEGO 2433CE	Caminhão Semipesado	16.710	786,10	2,32	C. paletizada

Fonte: Elaborado pelos autores

O desenvolvimento e a aplicação do modelo seguiram uma estrutura metodológica, resumida nas seguintes etapas: variáveis de decisão, função objetivo, restrições e restrições adicionais.

Variáveis de decisão: foram definidas variáveis binárias e/ou contínuas que representam as escolhas a serem feitas pelo modelo para minimizar os custos. Essas variáveis incluem a seleção de qual veículo (ou veículos) da frota será utilizado para atender a um cliente ou rota específica.

Função objetivo: minimização do custo total de transporte da empresa. Este custo foi calculado como a soma dos custos fixos diários associados à utilização de cada veículo (considerando os dias de operação) e os custos variáveis por quilômetro rodado, multiplicados pela distância percorrida para cada coleta ou rota. A otimização buscou a combinação de veículos e rotas que resultasse no menor valor para essa função.

Restrições: para garantir a aplicabilidade e a viabilidade das soluções, o modelo incorporou um conjunto de restrições essenciais que refletem as limitações do mundo real:

- Atendimento ao cliente: Cada cliente com demanda deve ser atendido exatamente uma vez por um único veículo;
- Conservação de fluxo: se um veículo entra em um nó de cliente, ele deve necessariamente sair do mesmo nó, garantindo a continuidade da rota;
- Início e fim no depósito: toda rota deve começar e terminar no depósito onde é realizado a separação e tratamento dos resíduos localizado em Itajubá;

- Capacidade dos veículos: a soma das demandas dos clientes em uma rota não pode exceder a capacidade máxima do veículo. Além disso, apenas veículos fisicamente disponíveis na frota podem ser utilizados;
- Eliminação de sub-rotas: restrição implícita no solver de VRP (Vehicle Routing Problem, ou Problema de Roteamento de Veículos), garante que não existam rotas desconectadas do depósito (ex.: ciclos entre clientes sem retorno ao depósito);
- Distância máxima por rota: a distância total percorrida por um veículo não pode ultrapassar 640 km. Limite definido com base naa velocidade média de 80 km/h e uma jornada de 8 horas de condução;
- Duração máxima por rota: o tempo total de uma rota, incluindo deslocamentos e serviços, não pode exceder 600 minutos (10 horas de trabalho diário).

Restrição adicional: integralidade do número de veículos, garantindo que a solução proposta utilize apenas um número inteiro de veículos, sem fracionamentos (ou seja, não é possível utilizar "meio" veículo), assegurando que o resultado seja prático e diretamente aplicável à realidade da frota da empresa.

Formulação matemática: o problema utiliza a Programação Linear Inteira (PLI) apresentado na função objetivo Eq. (1), onde as regras de escolha de veículos foram elaboradas a fim de minimizar o custo total.

$$Minimizar\ Z = \sum_{k \in V} F_k \times y_k + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} (d_{ij} \times CV_k) \times x_{ijk} \quad (1)$$

F_k: custo fixo de utilização do veículo k; k: identificação do veículo; V: conjunto dos veículos disponíveis; y_k: variável binária que assume o valor 1 se o veículo k é utilizado em alguma rota, e 0 caso contrário; d_{ij}: distância em quilômetros do nó i ao nó j; i: nó de origem; j: nó de destino; CVk: custo variável (R$/km) do veículo k; x_{ijk}: variável binária que assume o valor 1 se o veículo k viaja diretamente do nó i para o nó j, e 0 caso contrário.

Para a modelagem do problema, optou-se pela linguagem Python com a biblioteca Google OR-Tools, devido à sua alta complexidade. O desafio logístico envolve 30 localidades (um depósito e 29 cidades) e uma frota heterogênea de 11 veículos com capacidades e custos distintos, sendo que o ponto de estacionamento dos veículos é o mesmo da base de operação onde os resíduos são destinados. A formulação do problema resulta em 9.900 variáveis de decisão (30 origens × 30 destinos × 11 veículos). Além da escala, a ferramenta oferece a flexibilidade necessária para modelar com precisão as particularidades operacionais, como os diferentes custos fixos e variáveis por veículo, o que permite a implementação de regras e restrições complexas.

O tempo de carregamento varia conforme o peso do resíduo a ser coletado, definindo assim a duração de cada coleta (Tabela 2). O carbono emitido foi estimado utilizando fatores de emissão obtidos do Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) do Governo do Reino Unido para o ano de 2025. As emissões de carbono são diretamente proporcionais à distância percorrida por cada tipo de veículo (Tabela 3).

Tabela 2: Tempo de carregamento, conforme o peso a ser coletado

Peso	De	Até	Tipo	Tempo (min)
Até 100kg	0	100	Carregamento manual	10
De 100kg a 1.000kg	100	1.000	Carga paletizada	20
De 1.000kg a 5.000kg	1000	5.000	Carga paletizada	30
De 5.000kg a 10.000kg	5000	10.000	Carga paletizada	45
Acima de 10.000kg	10000	50.000	Carga paletizada	60

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 3: Fatores de conversão

Tipo de veículo	Diesel (kg CO_2e/km)	Gasolina (kg CO_2e/km)
Classe I (até 1,305 toneladas)	0,15738	0,20188
Classe II (1,305 a 1,74 toneladas)	0,1926	0,20874
Classe III (1,74 a 3,5 toneladas)	0,27878	0,33845
Rígido I (3,5 a 7,5 toneladas)	0,49458*	-
Rígido II (7,5 a 17 toneladas)	0,60501*	-
Rígido III (acima de 17 toneladas)	0,99156*	-

*Carregamento médio

Fonte: Government Greenhouse Gas Conversion Factors for Company Reporting (DESNZ), 2025.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a otimização, foi possível realizar um comparativo entre a operação de fato realizada e a operação otimizada, obtendo os resultados de potencial de redução de 33% no custo total e 19% na quantidade total de quilômetros percorridos (Tabela 4). É importante ressaltar que o modelo atendeu integralmente à demanda dos clientes, garantindo que todo o resíduo requerido seja coletado, sem perdas ou atrasos.

Tabela 4: Comparativo entre as rotas originais e otimizadas

	Original	Otimização	Diferença	Diferença %
Custos totais	R$ 72.041,00	R$ 48.514,00	- R$ 23.527,00	33%
Quilometragem percorrida	24.577 km	19.937 km	- 4.640 km	19%

Fonte: Elaborado pelos autores

Essa redução impacta diretamente os custos operacionais relacionados ao consumo de combustível e ao desgaste dos pneus. Adicionalmente, essa redução implica em menos estresse mecânico nos veículos, o que pode diminuir a frequência de paradas para manutenção e prolongar a vida útil da frota. O cálculo da emissão de carbono foi realizado multiplicando-se a quilometragem percorrida por cada veículo pelo seu respectivo fator de emissão, determinado conforme sua classificação (Tabela 5). A otimização da rota resultou em um potencial de redução de 34% nas emissões de carbono, que diminuíram de 13,1 toneladas de CO_2 para 8,7 toneladas. Adicionalmente, a rota otimizada demonstrou que nem todos os veículos são necessários, o que justifica uma reavaliação da frota.

Tabela 5: Comparativo entre a emissão de carbono das rotas originais e otimizadas

ID do veículo	FC (kg CO2e/km)	Original CO2 (kg)	Otimizado CO2 (kg)	Diferença CO2 (kg)
0	0,1926	178	758	581
1	0,1926	28	710	682
2	0,1926	1.019	177	-842
3	0,49458	464	1.606	1.142
4	0,49458	2.742	1.014	-1.727
5	0,60501	224	1.524	1.300
6	0,60501	2.323	336	-1.986
7	0,60501	350	330	-21
8	0,60501	1.726	348	-1.378
9	0,99156	1.885	1.883	-2
10	0,99156	2.173	0	-2.173
Total		**13.112**	**8.688**	**-4.424**
Otimizado x Original			**- 34%**	

Fonte: Elaborado pelos autores

Neste trabalho, foram utilizados fatores de conversão médios por tipo de veículo, conforme DESNZ (2025). Essa abordagem assume que o fator de emissão é constante ao longo de toda a rota. No entanto, sabe-se que a emissão de CO_2 varia com o peso da carga transportada. Os veículos percorrem o trecho inicial (depósito-primeiro cliente) vazio e sua carga aumenta progressivamente a cada coleta. Essa variação de peso ao longo do percurso não foi incorporada no cálculo, o que constitui uma limitação do modelo. Uma estimativa mais precisa exigiria um cálculo dinâmico, que ajustasse o fator de emissão para cada segmento da viagem com base na carga transportada, embora a abordagem atual forneça uma aproximação robusta.

Os resultados demonstram o potencial de otimização para a operação no Vale do Paraíba. O modelo foi executado sob a premissa de que toda a frota de 11 veículos estaria disponível para atender exclusivamente a essa região. Na prática, a empresa atende simultaneamente a outras localidades, o que implica que parte da frota pode estar alocada em outras operações em um determinado dia. Dessa forma, a redução de 33% nos custos, de 19% na quilometragem percorrida e de 34% nas emissões de carbono representa um cenário otimizado ideal. A aplicabilidade direta desses resultados no dia a dia dependeria da disponibilidade do veículo específico que o modelo selecionou como o mais eficiente para cada rota. Caso o veículo ideal não esteja disponível, uma nova otimização com a frota remanescente seria necessária, o que poderia levar a resultados diferentes. Portanto, os ganhos quantificados servem como um importante balizador do potencial de economia e sustentabilidade que um planejamento logístico dinâmico e adaptado à disponibilidade real da frota pode oferecer.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a aplicabilidade da otimização de rotas e seu impacto na redução da emissão de gases de efeito estufa na Logística Reversa de resíduos de saúde. A formulação de um modelo possibilitou a obtenção de significativos ganhos operacionais, financeiros e de sustentabilidade. Os resultados validam a capacidade do modelo em manter a integralidade do serviço de coleta, assegurando o pleno atendimento da demanda dos clientes. A otimização contribui para uma operação sustentável, alinhando objetivos econômicos à responsabilidade ambiental pela redução das emissões. Em termos de eficiência, constatou-se potencial de redução nos custos operacionais e na quilometragem percorrida, resultados que embasam a proposta de implementação a ser apresentada à empresa.

Em suma, o trabalho propõe uma solução a um problema logístico real, evidenciando o potencial da rota otimizada para reduzir a emissão de carbono. Para trabalhos futuros, sugere-se: avaliar um sistema de otimização dinâmico para alocação da frota, refinar o cálculo de emissões considerando os diferentes níveis de carga do veículo e avaliar a instalação de pontos de transbordo para consolidar cargas (seguindo as recomendações da Resolução CONAMA nº 358/2005), o que poderia reduzir ainda mais a quilometragem percorrida e as emissões, dada a localização do depósito em Itajubá, distante de vários clientes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BABARINDE, F.; ADIO, M. A. (2020). Review of Carbon Capture and Sequestration Technology. *Journal of Energy Technology and Environment*, v. 2, p. 1-11. DOI:10.37933/nipes.e/2.2020.1

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. (2002). Operations Management Research Methodologies Using Quantitative Modeling. Journal of Operations and Production Management, v. 2, p 241-264. DOI: 10.1108/01443570210414338

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos de serviços de saúde e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 04 maio 2005. Seção 1, p. 63-65.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Presidência da República, [2022]. Disponível em: http: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 09 set. 2025.

DESNZ (2025). 2025 Government Gas Conversion Factors for company reporting: Methodology paper for conversion factors final report. London: Department for Energy Security and Net Zero, 2025. 157 p. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6846b0870392ed9b784c0187/2025-GHG-CF-methodology-paper.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, v. 7, p.285-300. DOI: 10.1016/S0969-6016(00)00003-4

NOVAES, A. G. (2007). *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição* (3ª. Ed.). Rio de Janeiro: Elsevier

SEEG (2024). Análise das Emissões de 1970-2023 Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações Para as Metas Climáticas do Brasil 1970-2023. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 49 p.

TAN, X.; LIU, Y.; DONG, H.; XIAO, Y. e ZHAO, Z. (2022). The health consequences of greenhouse gas emissions: a potential pathway. *Environ Geochem Health*, v. 44, p. 2955–2974. DOI: 10.1007/s10653-021-01142-3

Samuel Placidio Galdino da Silva (samuelplacidio17@gmail.com), Fábbio Henrique Machado Ribeiro da Silva (fabbao.henrique@gmail.com), Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br), José Arnaldo Barra Montevechi (montevechi@unifei.edu.br)

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)/ Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG). Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, Brasil, 37500-903

O PROBLEMA DOS CARTEIROS GÊMEOS: RESULTADO DA APLICAÇÃO NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DE ANDRADINA E JALES

Marcos Negreiros[1,5], Claudio B Cunha[2], Nelson Maculan[3], Eduardo Reis[4], Augusto Palhano[5], Tiago Machado Gomes[5], Gerson de Castro[5] , Ivo Albuquerque[5]
[1]Universidade Estadual do Ceará, [2]USP-Escola Politécnica, [3]UFRJ-COPPE Sistemas,
[4]Reis Consultoria, [5]Graphvs Consultoria Ltda,

RESUMO
O problema dos carteiros gêmeos é aqui investigado em uma aplicação relacionada ao problema da coleta de resíduos sólidos domiciliares em duas cidades a oeste do estado de São Paulo, Andradina e Jales. O problema busca minimizar o custo da cobertura de coleta de resíduos feita por dois atores, veículo e coletor, em um conjunto de segmentos de rua tais que cobrem toda a área de coleta domiciliar de uma rede viária, em que o veículo não passa pelos trechos de via cobertas pelo coletor. São detalhadas a concepção, adequação à realidade em estudo, a aplicação e execução da solução em campo. Identificam-se nos resultados práticos de implantação da solução, economias de 23% nas distâncias percorridas pelos veículos e até 45% nos tempos de coleta manual em Andradina. Esta nova abordagem revela possíveis benefícios às municipalidades brasileiras pela redução significativa e sustentável nos custos com veículos e pessoal, e alto impacto na redução da emissão de CO_2 nas cidades, produzidos pela coleta domiciliar de RSU.

1. INTRODUÇÃO

O problema dos carteiros gêmeos (ou *the twin rural postman problem* - TRPP) é um problema de roteamento em arcos Hess et al (2024), que foi inicialmente proposto por Negreiros et al (2024). No TRPP é considerada uma rede viária em que parte dela é formada por ligações (segmentos de logradouros) e vértices (pontos especiais) ditos requeridos, de tal modo que, de um vértice origem, um veículo parte e retorna após cobrir uma parcela destes elementos, enquanto um coletor realiza manualmente a coleta em outro percurso que passa pelo complemento destes elementos nesta mesma rede, sem que o veículo passe por quaisquer das ligações e/ou vértices cobertos pelo coletor. Ao final, ambos, coletor e veículo, devem cobrir todas as ligações e vértices requeridos da área de serviço com o menor custo global (relativo à distância ou tempo).

Tal problema, surgiu a partir de uma situação detectada como "falha em cobertura" da coleta domiciliar nas cidades de Andradina/SP e Jales/SP (Negreiros et al, 2023b). Uma análise minuciosa indicou que quando havia três ou mesmo quatro coletores em operação na coleta, dois/três ficavam junto ao caminhão coletando o resíduo sólido urbano (RSU) domiciliar, enquanto um coletor percorria ruas transversais às trafegadas pelo caminhão, deixando nos cruzamentos o RSU coletado (denominado *serviço de amontoar* RSU).

O processo de compreensão-atuação e resolução do problema seguiu a metodologia de pesquisa-ação concomitante à pesquisa científica básica, respectivamente (Tripp, 2005). Pela dificuldade dos atores (supervisor, motoristas e coletores) em entender e operacionalizar corretamente o próprio trabalho em campo, necessitou-se trabalhar as seguintes dificuldades na pesquisa-ação (i-iii, v-vi) e na pesquisa básica (iii e iv): (i) divergência no tamanho da equipe de coletores, ora com 3 ora com 4; (ii) rodízio entre coletores para realizar a tarefa de acumulação; (iii) sincronismo entre as velocidades do veículo e da coleta manual do coletor; (iv) dificuldade de elaboração de trajetos econômicos e exequíveis para o coletor em relação ao trajeto do veículo; (v) controlar o ponto do coletor da operação manual quando iniciar a operação antes do veículo; (vi) se a coleta manual fosse concluída antes do tempo, o coletor deveria embarcar no veículo?

O sincronismo entre o trajeto do veículo e dos coletores em acumulação e em livramento (seguindo o trajeto do veículo à frente) revelou-se grande problema. A necessidade de conhecimento do trajeto do veículo pelo coletor era grande, por isso ele partia antes do veículo para que houvesse tempo de realizar a coleta sem que o veículo passasse onde a acumulação não houvesse sido feita. Qualquer divergência neste sincronismo significaria atraso ou incompletude da coleta.

Por fim, os trajetos eram executados à luz do conhecimento local do motorista: o motorista sempre escolhia o trajeto que buscava uma forma de percurso "logicamente favorável", e que não dava certo nas regiões de centro (muitas ruas de mão única) e de periferia, cuja topologia da rede diferia a de uma grade.

Considerando todas essas situações, o problema dos carteiros gêmeos foi proposto. Dois processos resolutivos - automático e semiautomático - para o ambiente **SisRot®LIX** foram propostos pela equipe do projeto, (Negreiros et al, 2025a-c). Com o método semiautomático, a partir do conhecimento do formato das soluções deste problema, foram geradas e avaliadas tais soluções, as quais foram implantadas em campo com grande sucesso. As soluções seguiram as preocupações dos coletores e dos motoristas mencionadas, porém o modelo

investigado resolveu por si só a maioria das dificuldades, ficando a decisão para a empresa do que fazer com o coletor após término antecipado do trabalho, pois não dizia respeito à equipe do projeto.

Neste trabalho, a seção 2 apresenta uma visão metodológica do nosso processo de organização do problema, junto a uma parte da pesquisa de levantamento em campo. Na seção 3, são mostradas as ferramentas computacionais e auxiliares desenvolvidas para obtenção de boas soluções viáveis e seus resultados em campo.

2. APLICAÇÃO METODOLÓGICA

Este minucioso levantamento envidou numa proposta de solução baseada em um modelo de programação matemática multiobjetivo (Negreiros et al 2024), pois é claro que o esforço do coletor no trabalho manual teria que ser considerado numa função objetivo que contempla, pelo lado da empresa, o ganho com redução de custo pelo uso e desgaste de equipamento motor e pelo lado do coletor, com a possibilidade de coletar RSU de forma que não impactasse em sua saúde e em quantidade possível de remoção manual no trajeto.

Foram identificadas duas formas de trabalhar: Através de um processo de solução semiautomático e através de resolução direta usando modelagem por programação matemática. Na resolução semiautomática, elaboramos um conjunto de ferramentas para o editor de grafos do **SisRot®LIX**, que permite editar (inserir, alterar, excluir, mostrar) ligações requeridas que pertencem ao veículo e ao coletor separadamente, e gerar rotas apenas sobre as ligações e vértices requeridos para os veículos e para os coletores. Aplicando-se às rotas (do veículo e do coletor), os métodos de roteamento em arcos (GRPP) usados no **SisRot®LIX**, (Negreiros et al 2025c).

Testes de percursos usando a ferramenta semiautomática foram realizados pelo pesquisador-engenheiro e o pesquisador-coordenador, apontando claramente a dificuldade conceptiva da resolução do problema, principalmente nas áreas ao redor do centro e na periferia das duas cidades. Além disto, o tempo de elaboração das rotas e setores foi um fator importante no processo. Cada processo de construção manual de cobertura alternada de um setor poderia levar de 3-4h, apesar das ferramentas de edição disponíveis; porém atendiam perfeitamente às condições do problema, e foram ajustadas inclusive novas condições, como locais onde a coleta teria que ser obrigatoriamente manual ou somente do veículo e locais sem necessidade de coleta manual.

As soluções avaliadas consideraram prioritariamente reduzir o tempo de trabalho do coletor em amontoamento. Deste modo, foram considerados todos os setores de Jales e Andradina/SP. Numa primeira avaliação, os resultados foram muito expressivos em ambas as cidades, como mostram as Figuras 1 a 3. No setor 02 de Andradina, o coletor andou nos dois dias avaliados 45,83Km em 14,95h, enquanto na Figura 3, o projeto com solução semiautomática indica que ele faria o mesmo percurso nos dois dias em pelo menos 29,14Km e 10,41h, resultando uma economia de 36,42% em distância e 30,36% em tempo. Comparando as soluções executadas e planejadas para o veículo, haveria uma redução de distância no percurso de 13,25% para todos os setores de Andradina/SP às segundas e terças, e de 14,75% para todos os setores de Jales/SP nos mesmos dias.

DATA	Setor	TIPO	KM	Tempo (HH:MM)	Obs
28/06/23 (Qua)	2	VEICULO	75,7	08:50	
		Coletor 1	19,55	06:22	
		Coletor 2	-	-	Não avaliado
18/10/2023 (Qua)	2	VEICULO	67.11	11:52	2 Vg completas
		COLETOR	26.28	08:35	Completa



Figura 1: Executado em campo pelo veículo e coletor em amontoamento, Setor 02, Andradina/SP (18/10/23 - Quarta-feira)

DATA	Setor	TIPO	KM	Tempo (HH:MM)	Obs
05/10/23 (Qui)	2	VEICULO	43.73	04:07	2 Vg completas
		COLETOR 1	15.22	02:02	Completa
		COLETOR 2	11.49	01:31	Completa
28/04/23 (Sex)	3	VEICULO	38.97	04:00	2Vg completas
		COLETOR	11.95	03:46	Completa
04/10/23 (Qua)	7	VEICULO	47.62	05:23	1Vg Completa
		COLETOR 1	1.46	00:15	Incompleta
		COLETOR 2	15.55	04:46	Completa
06/11/23 (Ter)	8	VEICULO	37.52	05:54	1Vg Completa
		COLETOR 1	13.52	05:50	Completa
		COLETOR 2	19.85	05:39	Completa



Figura 2: Executado em campo pelo veículo e 2 coletores em livramento e amontoamento, Setor 08, Jales/SP 06/11/23 - Quarta-feira)

A confecção dos roteiros de coleta manual em amontoamento seguiu os modelos de coleta para a varrição, a partir de percursos abertos mais curtos do carteiro rural (Negreiros et al, 2023a). A solução deste problema em si não é diretamente aplicável ao TRPP, pois esse percurso independe do local de início do percurso do veículo. Assim, a reconstrução do percurso é necessária, priorizando a execução coordenada na ordem de cobertura das

ligações mais próxima da ordem de cobertura das ligações do veículo. Seguindo esta premissa, desenha-se o percurso do coletor tendo como referência a menor rota aberta gerada.

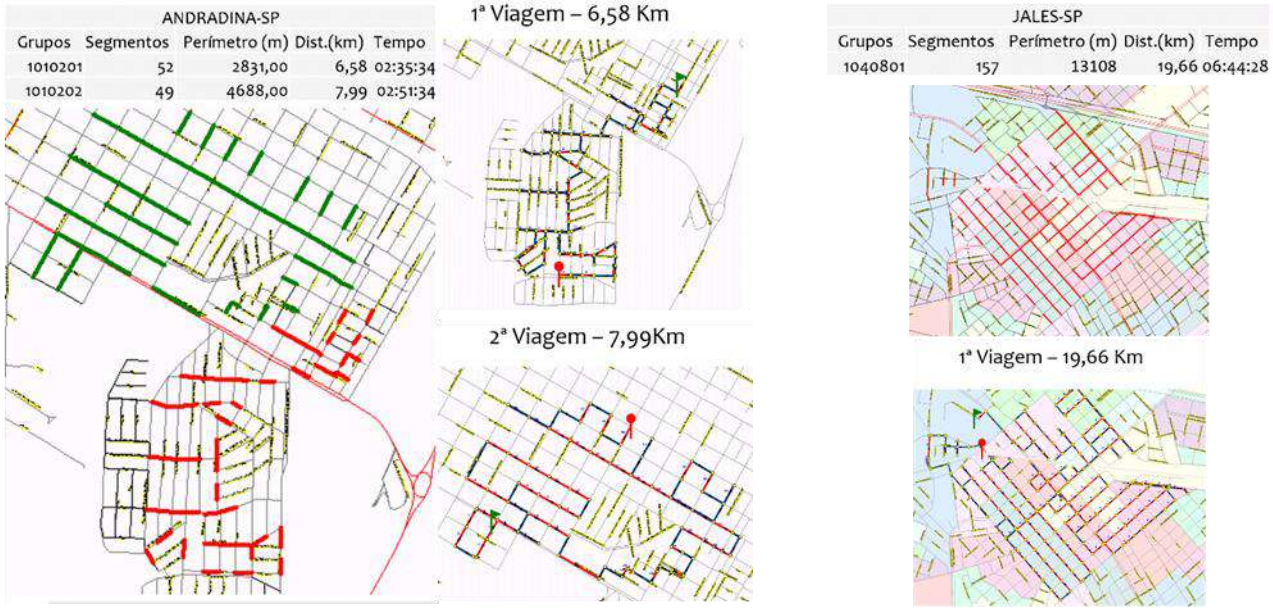


Figura 3: Rotas de amontoar planejadas através do método semiautomático do **SisRot®LIX** para os Setores 02-Andradina e 08-Jales

Importante foi avaliar a melhor representação para indicar ao coletor a resolução precisa do seu movimento em relação ao veículo, bem como a ordem de visitação de cada via de sua cobertura. Elaboramos dois modelos: o Modelo 1, em tons cinza, e o Modelo 2, colorido, conforme Figura 4.

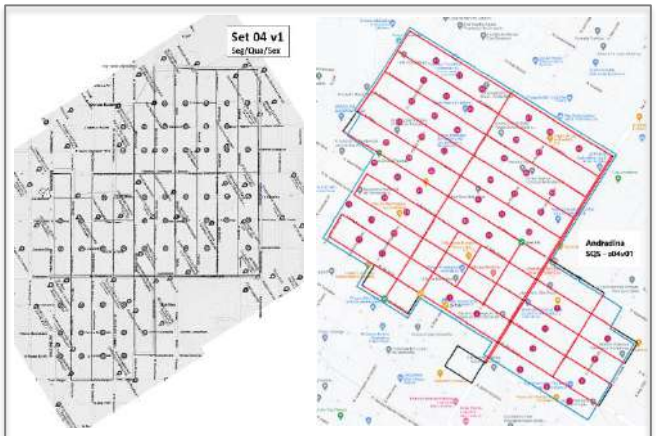


Figura 4: Modelos 1 e 2 de mapas para guiar o coletor no trabalho da coleta em amontoamento.

O Modelo 1 aparece o nome das principais ruas, as linhas pretas contínuas indicam as vias onde o veículo vai passar, e os círculos com números indicam os locais e a ordem em que deverá ser feita a coleta manual. No Modelo 2, optamos por uma versão colorida, onde em linhas contínuas vermelhas temos os locais onde os veículos passam e nos círculos vermelhos com números são os locais onde os coletores farão a coleta manual sempre colocando o lixo na esquina entre dois círculos de ordens subsequentes. O Modelo 1 indica melhor o nome das ruas e foi impresso em papel numa impressora a laser da empresa. O Modelo 2 indica melhor os pontos de referência da região de coleta e foi exportado para um celular, que operava também o aplicativo CherryTrack®LIX (versão Motorista). O Modelo 2 foi mais bem compreendido pelos coletores que realizaram o trabalho de campo.

Simultaneamente à avaliação do método semiautomático, realizamos a construção do modelo e dos métodos de otimização para a resolução do TRPP, (Negreiros et al 2025b). Nesta etapa, verificamos a dificuldade de resolver o problema nos tamanhos de instâncias reais. As formas com que as soluções nas instâncias menores saiam nos foi motivo de atenção, para seguir o mesmo raciocínio na proposição de alternativas de configuração topológica das ligações requeridas para veículos e coletores nas redes para as instâncias reais. Foi-se, além, desenvolvendo métodos alternativos para resolução de instâncias de grande porte usando metaheurísticas GRASP, (Negreiros et al 2025a). Com essas ferramentas, realizamos o nosso plano para obter uma solução específica que pudesse ser aplicada e verificada em campo convenientemente.

3. APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO

Selecionamos os setores de coleta diária noturna de Andradina (04 e 08), que operavam com 3 coletores, sendo um em amontoamento. A equipe era formada em sua maioria por pessoas com deficiência intelectual, porém muito bem coordenados e eficientes no serviço, assim como muito receptivos. Tentamos algumas vezes (4x)

com esta equipe nos dias de menor volume de RSU (Qua a Sáb), onde obtivemos pleno sucesso por três vezes seguidas, e em uma (primeira) falhamos por dificuldades com o motorista, que impôs seguir seu próprio percurso na segunda viagem, nos impedindo a avaliação completa dos percursos dos dois atores.

Com apoio da empresa, nos preparamos para uma avaliação presencial em dois dias seguidos. O coletor recebeu em campo as instruções de realização do trabalho. Levou consigo, em sua mochila, um celular com o mapa (Modelo 2), possibilitando a ele visualizar sua sequência de operação e seu movimento sobre o mapa e ao projeto registrar os seus movimentos. Realizou o serviço completo com perfeição, enquanto acompanhávamos também dentro de um veículo de apoio.

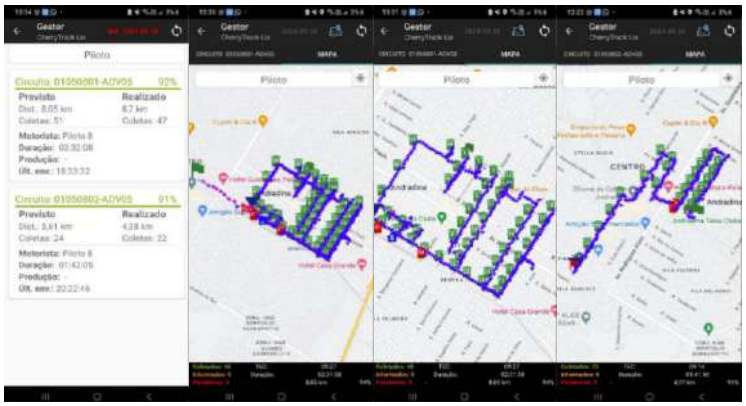


Figura 5: Resultado dia 26/09/24 (QUI), com cobertura total do coletor nas duas viagens, usando CherryTrack®LIX.

A Figura 5 mostra os movimentos do coletor através do CherryTrack®LIX no primeiro dia. Um dia de baixo volume de RSU, mas que representou uma cobertura de 12,66Km. O trajeto foi todo feito em 4:15 com 15min de descanso, sem qualquer intercorrência, ou mesmo falta de sincronismo entre os dois percursos (coletor e veículo). O mais importante, o coletor terminou o seu trajeto tranquilo, sem estar visivelmente cansado, e antes de 20:23.

Já a Figura 6 mostra os movimentos do coletor na sexta-feira 27/09/24, segundo dia, onde veículo e coletor foram acompanhados de perto do mesmo modo que no dia anterior. Um dia de "baixo volume de RSU", um trajeto diferente do dia anterior (em novo setor) e que representou um percurso de 16Km. O trajeto foi todo feito em 5:17 com um breve descanso de 20min, não havendo qualquer intercorrência, ou mesmo falta de sincronismo entre os dois percursos (coletor e veículo). O coletor terminou as suas duas viagens visivelmente cansado, mas bem mais cedo do horário habitual (antes das 21:30) e bem antes do veículo (5h à frente). O veículo concluiu seu serviço às 02:30 do dia seguinte (conforme o BDO de 27/09/24). Tanto o veículo quanto o coletor concluíram o trajeto bem mais rápido. As diferenças entre o planejado e o executado foram relacionadas à completude de algumas ruas pelo coletor, pois muitas vias não tinham RSU a coletar, e ele não precisou entrar nestes trechos.

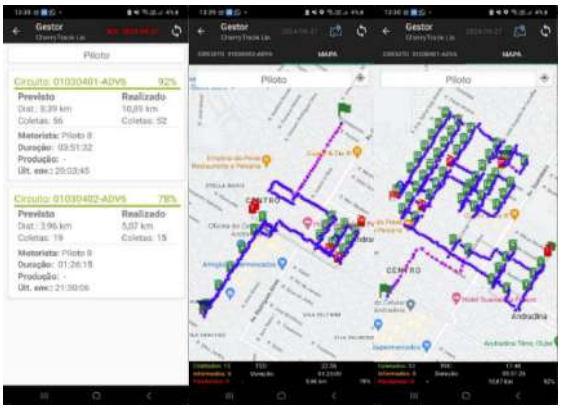


Figura 6: Resultado dia 27/09/24 (SEX), com cobertura total do coletor Milton Matias nas duas viagens.

Os novos planos foram analisados em campo e comparados às execuções monitoradas ao longo de 2024. Haja vista a dispersão da coleta de Andradina e a dificuldade de cumprimento do serviço devido aos problemas com os veículos entre os meses de Jul-Set/2024, consideramos somente os setores cumpridos integralmente pelo mesmo veículo a cada dia da semana ao longo de 2024. Assim, tomando-se os trajetos médios de cada setor por dia da semana, durante a semana, a economia global prevista nas distâncias dos percursos foi de 23,01%.

A economia na coleta manual foi também auferida em campo de acordo com as distâncias e os tempos de coleta manual percorridas anteriormente. Obteve-se redução de 40-45,8% frente ao praticado, repetindo-se este resultado por três vezes. Isto significa que o serviço de coleta manual foi reduzido entre 3-4,5h no dia de trabalho do coletor, com redução nas distâncias percorridas por ele em mais de 40%. Este resultado causou grande satisfação para os coletores que realizaram as verificações em campo dos planos, tendo cumprido suas tarefas bem menos desgastados e andando bem menos do que o habitual.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentamos a execução de um projeto científico e de pesquisa-ação, realizado em uma concessionária de limpeza urbana que operava nas cidades de Andradina/SP e Jales/SP, onde os serviços de coleta domiciliar eram realizados de forma distinta ao que se preconiza no PNRS nacional, (PLANARES,

2022). Tal abordagem limita o uso de soluções automática ou semiautomática no planejamento e resolução dos serviços de coleta domiciliar, haja vista a complexidade inerente ao problema de planejamento e otimização subtendido.

Avaliou-se a proposta resolutiva de um novo problema de roteamento em arcos denominado "o problema dos carteiros gêmeos" ou *twin rural postman problem* (TRPP), que busca coordenar a cobertura de uma área de coleta domiciliar a ser cumprida integralmente por um veículo e um coletor, em que o veículo não trafega sobre as ruas do coletor. Esta abordagem revela-se muito desafiadora haja vista a condição e esforço muitas vezes sobre-humano dos coletores que atualmente realizam este trabalho em campo nas cidades pesquisadas.

A proposta do problema, a metodologia e o processo de solução revelaram-se positivos na verificação do trabalho de campo, que foi finalizado com economias superiores a 23% nas distâncias totais percorridas pelos veículos e superiores a 45% nas economias no trajeto nos setores dos coletores pesquisados. Isto impactou na emissão de CO_2 na atmosfera de Andradina na mesma proporção do coletor, devido a coleta de RSU domiciliar.

Esses experimentos nos levam a crer que esta abordagem poderá trazer grandes benefícios à economia das cidades brasileiras, haja vista as altas reduções obtidas com o planejamento desta forma de coleta, assim como a garantia de que se trata de uma abordagem sustentável e ambientalmente favorável pela redução proporcional de emissões de carbono na atmosfera pela queima de diesel e componentes da matriz energética deste setor.

Agradecimentos
Este projeto de CT&I Transportes tem o apoio do CNPq – processo 407652/2022-1. Agradecemos à CONSERVITA, na pessoa do seu diretor-executivo Márcio Rossi; ao supervisor geral Sr Arenaldo; à motorista Cibele Alda; aos motoristas Ronaldo da Silva, Osmar Silva e José Aldo, e aos coletores Milton Matias, Everton Cavassani, Leonardo Lima e Felipe da Silva. Ao time de bolsistas da Graphvs por seu apoio a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

C. Hess, A. Dragomir, K. Doerner, D. Vigo (2024), Waste collection routing: a survey on problems and methods. Central Eur. J. Oper. Res. vol 32, pages 399–434. https://doi.org/10.1007/s10100-023-00892-y

Negreiros, M.J.; A. W. Palhano e E.C.R. Reis, (2023a) Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil. *Waste Management & Research*, vol 41(1) pgs 214-221, DOI: 10.1177/073424X221104366

Negreiros, M.J.; C. B. Cunha; E. Reis e A. Reis, A. (2023b) Uma proposta de solução para o problema de cobertura da coleta domiciliar. In Anais do XXXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Santos, SP). Rio de Janeiro: ANPET, p. –.

Negreiros, M.J.; A. Palhano; N. Maculan e C. B. Cunha (2024) The Twin Rural Postman Problem. In Anais do LVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (Fortaleza, CE). Rio de Janeiro: SOBRAPO, p. –.

Negreiros, M.J.; A. Palhano; N. Maculan. e C. B. Cunha (2025a) A Metaheuristic to the Twin Rural Postman Problem: Asynchronous case. In Annals of 50º EURO (LEEDS, EN). Leeds: EURO.

Negreiros, M.J.; A. Palhano; N. Maculan; C. B. Cunhae E. Reis (2025b) The Twin Rural Postman Problem: Basics, Methods and Application Results. In Annals of 5th International Workshop in Arc Routing Problems (Vienna, AU). Vienna: WARP5. Pg 15.

Negreiros, M.J.; N. Maculan; C. B. Cunha; F. H. Viana e F. Melo (2025c) Waste collection: sectoring, routing and scheduling for challenging services. Handbook of Artificial Intelligence and Data Sciences for Routing Problems, Oliveira, C.A. and Pardallos, P. Ed., Springer Optimization and its application v 219, Chapter 11 pgs 203-257. DOI: 10.1007/978-3-031-78262-6_11

PLANARES (2022) "Plano Nacional de Resíduos Sólidos", Ministério do Meio-Ambiente Decreto Nº 11.043, de 13 de abril de 2022

Tripp, D. (2005) "Action research: a methodological introduction", *Educação e Pesquisa*, São Paulo, v. 31(3), pgs. 443-466, set./dez. 2005

Marcos José Negreiros Gomes (marcos.negreiros@uece.br)
Universidade Estadual do Ceará, Centro de Tecnologia, Laboratório de Computação Científica, Av Silas Munguba, 1740 CEP: 60.714-903, Fortaleza/CE, Brasil
Claudio Barbieri da Cunha (cbcunha@usp.br)
Universidade de São Paulo, Departamento de Eng de Transportes-Escola Politécnica, Ed Paula Souza (Prédio da Eng Civil) Cidade Universitária, São Paulo, Brasil
Nelson Maculan (maculan@cos.ufrj.br)
PESC-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Sala H-322B, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, CEP: 21.941-972
Eduardo Reis (eduasp@gmail.com)
Augusto Wagner de Castro Palhano (augustopalhano@gmail.com)
Tiago Machado Gomes (tiagomachado@graphvs.com.br)
Gerson Alves de Castro (gersonac@gmail.com)
Ivo Coelho Albuquerque (ivocoelho.com@gmail.com)
Graphvs Consultoria Ltda, R. Vicente Linhares, 521 sl 913 Aldeota – CEP: 60135-270 Fortaleza/CE, Brasil

Avaliação Econômica, Regulação e Financiamento de Transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

A INFLUÊNCIA DA DENSIDADE RODOVIÁRIA NA COMPLETUDE DAS CADEIAS DE SOJA E MILHO E NO DESEMPENHO ECONÔMICO MUNICIPAL

Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato[1], **Yaeko Yamashita**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
A infraestrutura de transportes conecta municípios produtores a centros consumidores, mas sua distribuição esparsa em áreas agrícolas pode dificultar o desenvolvimento da região. Nesse contexto, este artigo analisa a relação entre a densidade de infraestrutura do sistema rodoviário pavimentado com a completude da cadeia de negócios de soja e milho nos municípios do agronegócio brasileiro. Pode-se argumentar que há uma tendência de cadeias produtivas coesas e diversificadas em localidades com maior densidade de pavimentação rodoviária. O estudo utilizou dados secundários e análise espacial com o objetivo de tipificar municípios de acordo com a infraestrutura viária. Os resultados mostram que, em geral, municípios com maior densidade rodoviária tendem a apresentar cadeias mais integradas, com exceções como Tapurah (MT), indicando que a infraestrutura, isoladamente, não garante dinamismo econômico. Conclui-se que a infraestrutura de transportes é importante, mas precisa de ações articuladas para impulsionar o desenvolvimento local.

1. INTRODUÇÃO

O recente aumento na demanda internacional e nos preços das commodities agrícolas, que vem ocorrendo desde 2003, levou a mudanças no território brasileiro, particularmente nas regiões de fronteira agrícola, cujas culturas de soja e milho têm sido centrais para as economias, bem como na configuração espacial (Vieira Filho, 2016). Esses produtos, além de sua participação no comércio mundial, trouxeram mudanças nos arranjos de produção e na demanda por infraestrutura para capaz de atender as atividades das cadeias.

Em termos de fatores de produção, a infraestrutura de transporte é um elemento básico para movimentar a produção, transferir insumos e conectar os agentes econômicos envolvidos nas várias etapas das cadeias produtivas nas comunidades agrícolas (Castro, 2017). Em um país continental e desafiado por problemas logísticos, a organização e a densidade da infraestrutura no momento das diferentes atividades econômicas são cruciais para as possibilidades de como elas serão ajustadas para se adequarem umas às outras. Embora a relação entre infraestrutura e logística tenha sido bastante debatida, a maior parte da pesquisa está em contextos regionais e nacionais, focando nos fluxos de logística em grande escala e corredores de exportação (Ogita, Resende, Assis, 2019). No nível municipal, a relação entre a densidade de rodovias pavimentadas e a estruturação das cadeias de negócios agropecuárias ainda é uma questão que pode ser investigada mais a fundo, incluindo trabalhos descritivos e comparativos.

Em diferentes municípios agrícolas, observa-se que as cadeias produtivas podem apresentar distintos níveis de integração. Em alguns casos, a produção permanece concentrada na atividade primária, com baixa diversificação e forte dependência de estruturas logísticas externas. Em outros, há presença de atividades econômicas conectadas a diferentes etapas da cadeia, o que pode indicar maior articulação produtiva no território (Lopes, 2023). Enquanto a literatura existente frequentemente analisa a relação entre infraestrutura e desenvolvimento em escalas regionais e nacionais, com foco em corredores logísticos, há uma lacuna na compreensão de como a densidade da infraestrutura rodoviária pavimentada se associa à estruturação econômica em nível municipal. Este estudo busca contribuir ao investigar a relação entre a densidade rodoviária e a completude da cadeia de negócios de soja e milho, um indicador da diversificação e articulação produtiva local. Ao fazê-lo, a pesquisa avança no debate ao oferecer uma análise granular que conecta um ativo físico (rodovias) à complexidade do tecido econômico local em territórios da fronteira agrícola brasileira.

2. METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa e exploratória, utilizando dados secundários de fontes oficiais brasileiras. A unidade de análise foi o município.

Coleta de Dados

Os seguintes dados foram utilizados:

- Cadeia de negócios de soja e milho: O modelo hipotético da cadeia de agronegócio de Lopes (2023) foi adaptado para o caso da soja e do milho, explicado pelas subclasses da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE);

- Empreendimentos: Todas os empreendimentos com status de registro ativo em cada município foram coletados no Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ) da Receita Federal do Brasil de 2025;
- Base Geográfica: Para o cálculo das áreas geográficas, foram utilizadas como base cartográfica a malha municipal do IBGE de 2023 e a infraestrutura rodoviária do Sistema Nacional de Transportes do DNIT de 2025.

Procedimento de Cálculo de Indicadores

- Integralidade da cadeia de negócios de soja e milho: A integralidade foi construída com base na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), considerando a presença ou ausência, nos municípios, de atividades econômicas que compõem os elos da cadeia de negócios. A metodologia, adaptada de Lopes (2023), avalia a existência de empreendimentos relacionados aos segmentos a montante, jusante e de suporte à atividade âncora (soja ou milho). Dessa forma, a integralidade reflete o grau de diversificação e estruturação local da cadeia produtiva, a partir da articulação entre os diferentes elos econômicos.
- Densidade de rodovias pavimentadas: Foi aplicado o indicador de Proporção de Cobertura (PA) proposto por Ferreira (2006) para medi-la, que considera o espaço ocupado pela área de influência da rodovia em relação ao espaço total do território explorado. Na visão do autor, quanto mais próximo o indicador estiver de 0 (zero), pior será a cobertura dos serviços de transporte em uma área. Pelo contrário, valores mais próximos de 1 (um) representarão uma maior presença e cobertura do serviço no espaço treinado.

$$PA = \frac{AI}{AT} \quad (1)$$

Onde:
PA = Proporção de Abrangência
AI = Área de Influência da Rodovia
AT = Área Total do Território

A área de influência da rodovia foi definida com um raio de 10 km a partir do eixo da rodovia, de acordo com a "Análise dos Impactos Sociais e Ambientais - Programa de Pavimentação e Manutenção de Estradas Pré-Colheita II AISA" (Superintendência de Infraestrutura de Transportes do Estado da Bahia, 2015), cuja delimitação ocorreu por meio de ferramentas de geoprocessamento no software QGIS, permitindo calcular a proporção do território municipal abrangida diretamente pelas rodovias pavimentadas.

Análise dos Resultados

A análise dos dados foi realizada de forma descritiva e comparativa. Os municípios foram classificados em três grupos, conforme a proporção de área de abrangência das rodovias pavimentadas: baixa abrangência (menos de 50%), média abrangência (entre 50% e 70%) e alta abrangência (acima de 70%). Na etapa seguinte, foi realizada a identificação e quantificação dos elos da cadeia de negócios de soja e milho presentes em cada grupo de municípios. A identificação foi baseada na presença de atividades econômicas classificadas pela CNAE, considerando os segmentos à montante, a atividade âncora e os segmentos à jusante. O procedimento buscou mensurar o grau de integração das atividades econômicas em cada município. Além da análise comparativa, foi aplicada a correlação de Pearson para mensurar o grau de associação entre as variáveis densidade rodoviária pavimentada, completude da cadeia de negócios de soja e milho e PIB municipal. A correlação foi interpretada com base nos critérios propostos por Dancey e Reidy (2006), que classificam valores de “r” superiores a 0,70 como indicativos de correlação forte. Essa abordagem permitiu não apenas explorar padrões descritivos, mas também verificar, estatisticamente, o nível de associação entre as variáveis analisadas, conferindo maior robustez à análise dos resultados.

3. CADEIA DE NEGÓCIOS

A cadeia de negócios (Yamashita et al 2024) é uma estrutura que conecta diferentes empreendimentos, por meio de CNAEs, vinculadas a uma atividade econômica específica, configurando um arranjo que articula e interliga segmentos produtivos. Diferente da concepção tradicional da cadeia de valor apresentada por Porter e Millar (1985), centrada nas atividades internas de uma empresa, a cadeia de negócios amplia a análise ao incluir as interações entre organizações independentes. Essa abordagem compreende as atividades de fornecedores (montante), as atividades centrais (atividade âncora), os consumidores e processadores (jusante),

além das atividades de apoio que viabilizam o funcionamento das demais etapas. A cadeia de negócios pode ser utilizada como instrumento para analisar dinâmicas produtivas, identificar lacunas e orientar políticas de desenvolvimento local e regional por meio de atração de investimentos.

A formação e a organização da cadeia de negócios baseiam-se em três elementos principais: as conexões entre os elos, a classificação das atividades econômicas e a definição da atividade âncora. As conexões representam os pontos onde ocorrem transações e parcerias entre os agentes produtivos, assegurando o fluxo de bens e serviços. A Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) permite a padronização e a identificação das atividades presentes no território, possibilitando o mapeamento e a análise das cadeias produtivas. A atividade âncora corresponde ao segmento que organiza os fluxos produtivos e gera demanda para os fornecedores. A articulação desses elementos contribui para a integração produtiva, a eficiência econômica e o fortalecimento das relações entre os agentes envolvidos. Assim, quanto mais completa a cadeia de negócio, mais eficiente será a sua produção, apresentando uma maior completude da sua cadeia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seleção dos municípios analisados se deu em função de estarem situados em áreas de fronteira agrícola, regiões reconhecidas pelo recente processo de expansão da produção de soja e milho no Brasil e por já terem sido objeto de pesquisas anteriores, o que facilitou o acesso a dados secundários e possibilitou a comparação com estudos prévios. Os resultados (Tabela 1) indicam que há ligações claras entre a densidade da infraestrutura viária e a finalização das cadeias de negócios de soja e milho. Essas cadeias com um componente de negócios evidenciam maior diversificação da economia, maior retenção de valor no território e possibilidades para o desenvolvimento local. Verificou-se que municípios com maior proporção de área de abrangência rodoviária apresentaram cadeias mais completas, com a participação de atividades à montante, âncora e à jusante. Essas cadeias integradas indicam uma maior diversificação econômica, maior retenção de valor no território e potencial de desenvolvimento local.

Tabela 1: Relação da Proporção de Abrangência e a Completude da Cadeia de Negócios de Soja e Milho

Município	Área do Munícipio (km²)	Área total de Abrangência Total (km²)	Proporção de Abrangência Total	Completude da Cadeia de Negócios	PIB Municipal (x1000)
Baixa Abrangência					
Baianópolis (BA)	3.320,723	374,577	0,1128	22%	R$ 263.822,50
Correntina (BA)	11.504,314	5.295,733	0,4603	39%	R$ 3.280.078,79
Nova Ubiratã (MT)	12.460,736	2.922,719	0,2345	33%	R$ 3.270.200,82
São Desidério (BA)	15.156,712	5.812,011	0,3834	37%	R$ 5.845.432,47
Média Abrangência					
Barreiras (BA)	8.051,274	4.062,628	0,5046	74%	R$ 7.006.120,69
Luís Eduardo Magalhães (BA)	4.036,094	2.417,388	0,5989	69%	R$ 8.820.648,15
Lucas do Rio Verde (MT)	3.674,596	1.913,224	0,5210	65%	R$ 6.891.564,31
Tapurah (MT)	4.492,539	2.583,525	0,5751	41%	R$ 2.007.700,25
Sorriso (MT)	9.293,629	5.894,082	0,6342	70%	R$ 12.522.632,98
Alta Abrangência					
Sinop (MT)	3.990,87	2.814,333	0,7052	77%	9.623.876,67

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise de correlação de Pearson confirmou estatisticamente essa associação, evidenciando uma correlação positiva forte (r = 0,8355) entre a densidade rodoviária pavimentada e a completude das cadeias de soja e milho. Além disso, foi observada uma correlação muito forte (r = 0,8660) entre a completude das cadeias e o PIB municipal, indicando que cadeias mais integradas tendem a estar associadas a economias locais mais robustas. A correlação entre densidade rodoviária e PIB municipal, por sua vez, foi de r = 0,7467, sugerindo que a infraestrutura influencia o desempenho econômico local, ainda que seu impacto seja potencializado quando combinado a cadeias produtivas bem estruturadas.

O município de Sinop (MT) destaca-se por possuir a maior proporção de abrangência rodoviária entre os casos

analisados (70,52%), a maior completude da cadeia de negócios (77%) e um PIB elevado. Esse resultado reflete a capacidade de Sinop de estruturar uma rede logística eficiente, consolidando-se como um importante polo agroindustrial no estado do Mato Grosso. Municípios como Sorriso (MT), Lucas do Rio Verde (MT) e Luís Eduardo Magalhães (BA) também apresentaram cadeias integradas, fortalecidas pela infraestrutura disponível e por um ambiente produtivo especializado. Em contraste, municípios como Baianópolis (BA), Nova Ubiratã (MT), Correntina (BA) e São Desidério (BA), que possuem baixa cobertura rodoviária (inferior a 50%), apresentaram cadeias fragmentadas, predominantemente focadas na produção primária, com pouca diversificação e limitada capacidade de agregar valor localmente. Nesses territórios, a ausência de atividades de transformação e serviços de apoio tende a restringir os benefícios econômicos advindos da cadeia de soja e milho, bem como as oportunidades de emprego e a circulação de riqueza no município. O PIB desses municípios também é inferior, com destaque para Baianópolis, que apresenta o menor PIB da amostra.

A análise dos municípios com cobertura rodoviária intermediária (50% a 70%) traz informações importantes. O caso de Barreiras (BA) é especialmente relevante, pois apesar de apresentar uma proporção de abrangência de 50,46%, próxima ao limite inferior da faixa intermediária, o município alcançou uma completude de 74%. Este resultado sugere que fatores como localização estratégica, capacidade institucional e políticas públicas de incentivo podem potencializar a integração produtiva mesmo quando a densidade rodoviária não é a mais elevada entre os municípios analisados, configurando Barreiras como um possível polo logístico regional. O município de Tapurah (MT) ilustra uma situação inversa, onde, apesar da alta cobertura rodoviária (57,51%), a completude da cadeia de negócios é de apenas 41%. Esse cenário sugere que a infraestrutura, isoladamente, não garante o dinamismo econômico, podendo ser influenciada pela proximidade de polos mais consolidados, como Sinop e Sorriso, que concentram os investimentos regionais. O caso demonstra que a integração produtiva depende da interação complexa entre o transporte e outras condições territoriais, como políticas de incentivo e acesso a diferentes tipos de logística.

Os resultados reforçam que a infraestrutura rodoviária pavimentada é um elemento facilitador, mas não determinante. O desenvolvimento de cadeias produtivas completas depende de um conjunto mais amplo de condições territoriais, que envolvem qualidade da infraestrutura, ambiente institucional favorável, políticas públicas de incentivo, rede de fornecedores e acesso a serviços logísticos especializados. Além disso, a presença de hubs logísticos e a integração regional podem favorecer a formação de cadeias completas, como observado na interação entre Barreiras e Luís Eduardo Magalhães. O fortalecimento das cadeias de negócios requer, portanto, uma abordagem sistêmica e coordenada entre os diferentes agentes econômicos do território.

5. CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa evidenciam que a densidade da infraestrutura rodoviária pavimentada exerce influência significativa sobre a estruturação e a completude das cadeias de negócios de soja e milho nos municípios analisados, contribuindo para o estado da arte com três pontos principais: primeiro, confirma em escala municipal a relação positiva entre infraestrutura e complexidade econômica, já consolidada em estudos regionais; segundo, introduz o conceito de 'completude da cadeia de negócios' como uma métrica eficaz para avaliar a diversificação produtiva local; e terceiro, demonstra, por meio de casos empíricos como Tapurah (MT), que a infraestrutura é uma condição necessária, mas não suficiente, matizando a visão determinística sobre seu impacto.

No entanto, a análise também revelou que a infraestrutura rodoviária, embora fundamental, não é o único elemento determinante para a completude das cadeias de negócios. Casos como o de Tapurah, que possui cobertura rodoviária expressiva, mas baixa integração produtiva, apontam a necessidade de considerar outros fatores, como políticas públicas locais, atratividade econômica, qualidade da infraestrutura e capacidade institucional para fomentar o desenvolvimento das atividades econômicas à montante e à jusante da cadeia. Assim, conclui-se que a expansão da malha rodoviária pavimentada contribui para a formação de cadeias de negócios mais completas, mas os resultados reforçam que a infraestrutura precisa ser acompanhada de estratégias articuladas de desenvolvimento territorial, investimentos públicos e privados, e incentivos à diversificação econômica para que os municípios possam capturar e reter valor localmente.

Por fim, sugere-se que futuras pesquisas aprofundem esta relação. A abordagem descritiva e correlacional adotada neste trabalho poderia ser expandida com o uso de modelos de regressão multivariada, permitindo

controlar simultaneamente múltiplos fatores (institucionais, logísticos, socioeconômicos) e isolar o efeito da densidade rodoviária. Adicionalmente, a aplicação de análises de cluster poderia identificar diferentes tipologias de municípios com base em suas características de infraestrutura e estrutura produtiva. Tais abordagens, combinadas à incorporação de variáveis qualitativas, podem fornecer uma compreensão ainda mais abrangente sobre os determinantes da integração das cadeias de negócios no território.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro, que viabilizou o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro, C. N. (2017) *O Agronegócio e os Desafios da Infraestrutura de Transporte na Região Centro-Oeste*. Ipea. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9031/1/O%20Agroneg%C3%B3cio%20e%20os%20desafios.pdf (acesso em 03/07/2025).

Dancey, C. P. e J. Reidy. (2007) *Statistics without Maths for Psychology.* 7. ed. Harlow: Pearson Education Limited. Disponível em: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/28005/1/Christine%20P.%20Dancey_2017.pdf (acesso em 05/07/2025).

DNIT. (2025) *Sistema Nacional de Viação.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv (acesso em 01/07/2025).

Ferreira, E. O. (2006) *Desenvolvimento de Sistema de Indicadores de Avaliação da Infra-Estrutura Rodoviária no Contexto do Desenvolvimento Regional.* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Brasília (UnB). Disponível em: http://repositorio2.unb.br/handle/10482/3604 (acesso em 01/07/2025).

IBGE. (2025) *Cidades@ [site].* Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. (acesso em: 01/07/2025)

IBGE. (2023) *Malha Municipal.* Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads (acesso em 02/07/2025).

Lopes, E. P. (2023) *Efeitos da Completude da Cadeia de Valor da Soja e do Milho nos Municípios de Produção Agropecuária* (Tese de Doutorado). Universidade de Brasília (UnB).

Ogita, S. Resende, L.F. e T. F. Assis. (2019) *Estudo dos Corredores Logísticos do Arco Norte - Diagnostico Preliminar.* Banco Mundial. Disponível em: https://documents1.worldbank.org/curated/en/324071566827058837/pdf/Estudo-Dos-Corredores-Log%C3%ADsticos-do-Arco-Norte-Diagnostico-Preliminar.pdf (acesso em 03/07/2025).

Porter, M.E. e V.E. Millar. (1985) How Information Gives You Competitive Advantage. *Harvard Business Review*, 63, 149-160. Disponível em: https://palfreymanventures.net/porter-and-millar-1985.pdf (acesso em 01/07/2025).

RFB. (2025) *Base de dados do Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ).* Receita Federal do Brasil. Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/cadastro-nacional-da-pessoa-juridica---cnpj (acesso em 01/07/2025).

Superintendência de Infraestrutura de Transportes da Bahia. (2015) *Avaliação de Impacto Socioambiental - AISA Programa de Recuperação e Manutenção de Rodovias Premar II.* Salvador. Disponível em: https://www.eib.org/attachments/registers/64420137.pdf (acesso em 01/07/2025).

Vieira Filho, J. E. R. (2016) *A Fronteira Agropecuária Brasileira: Redistribuição Produtiva, Efeito Poupa-Terra e Desafios Estruturais Logísticos*. Ipea. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9239/1/A%20Fronteira%20agropecu%C3%A1ria.pdf (acesso em 01/07/2025).

Yamashita, Y.; Aragão, J. J. G; Jesus, P. P. e E. L. PEREIRA. (2024) *Estruturação de Cadeias de Negócio para a dinamização econômica de municípios de agronegócio: esboço de uma metodologia.* DOI:10.13140. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377529877_Estruturacao_de_Cadeias_de_Negocio_para_a_dinamizacao_economica_de_municipios_de_agronegocio_esboco_de_uma_metodologia (acesso em 01/07/2025).

Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato (marcosp.arch@gmail.com)
Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Yaeko Yamashita (yaekoyamashita@gmail.com)
Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS CONTRATUAIS NA GESTÃO DE RODOVIAS FEDERAIS BRASILEIRAS

Luísa Muglia Souza[1], **Victor Hugo Trindade da Silva** [1,2], **Sandra Oda** [1], **Romulo Dante Orrico Filho** [1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
[2] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

RESUMO
A coexistência de diferentes modelos contratuais na manutenção da malha rodoviária federal brasileira levanta questionamentos sobre suas implicações para a eficiência e o controle da infraestrutura pública. Este artigo comparou os contratos de gestão rodoviária firmados pelo DNIT e o contrato de concessão da Rota Verde Goiás, que abrange os trechos das rodovias BR-060 e BR-452 em Goiás. A partir de uma abordagem qualitativa e documental, a análise identificou diferenças na definição de obrigações, nos mecanismos de fiscalização e na forma de remuneração. Os resultados evidenciam que o contrato de concessão apresenta maior detalhamento, metas de desempenho e penalidades mais rígidas, enquanto os contratos do DNIT adotam lógica operacional mais flexível, com pagamentos por medição e menor complexidade regulatória.

1. INTRODUÇÃO

Em 2023, o Ministério dos Transportes instituiu a nova Política Nacional de Outorgas Rodoviárias, com o objetivo de padronizar os contratos de concessão e promover coerência regulatória. Após quase três décadas de experiências diversas, a iniciativa busca reduzir a heterogeneidade de cláusulas, escopos e obrigações (Brasil, 2023). Dentre as novidades desta política, podem ser mencionadas a possibilidade de aportes públicos em projetos complexos, a introdução de parcerias público-privadas, o foco em infraestrutura resiliente e a alocação mais equilibrada de riscos entre os agentes contratantes.

A malha rodoviária federal ultrapassa 74 mil km, dos quais mais de 14 mil km estão sob concessão regulada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), e o restante sob gestão do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (Brasil, 2025). Entre as concessões mais recentes, está a Rota Verde Goiás, cuja formalização ocorreu em março de 2025 e que abrange 426,2 km das rodovias BR-060 e BR-452, no estado de Goiás, conforme ilustrado na Figura 1. Essas rodovias formam um importante corredor logístico para o escoamento da produção agroindustrial do Centro-Oeste.



Figura 1: Mapa dos trechos concedidos da BR-060/452/GO sob operação da Rota Verde Goiás

A substituição do modelo de gestão pública pelo DNIT por um contrato de concessão regulado pela ANTT possibilita analisar como diferentes modelos contratuais moldariam a governança da infraestrutura rodoviária nacional. Este artigo compara esses dois modelos contratuais — associados à gestão pública direta e à concessão — para compreender de que forma as cláusulas contratuais influenciam obrigações, fiscalização e incentivos de desempenho. Embora a literatura sobre concessões tenha avançado em temas como riscos, custos e desempenho físico, ainda são escassos os estudos focados no conteúdo dos contratos, especialmente em concessões recém-assumidas. Mesmo análises jurídicas, como a de Gasiola e Marrara (2015), apontam a lentidão na evolução contratual, mas não exploram comparações entre diferentes arranjos institucionais de gestão.

Este artigo tem como objetivo analisar comparativamente os contratos firmados pelo DNIT e o de concessão da Rota Verde Goiás para os trechos da BR-060/452/GO para compreender como diferentes modelos contratuais moldam a gestão da infraestrutura rodoviária federal. A investigação enfoca o conteúdo dos instrumentos contratuais, considerando seus efeitos sobre obrigações técnicas, mecanismos de fiscalização e incentivos à performance.

2. METODOLOGIA

O trabalho adota uma abordagem qualitativa, com método comparativo e foco em análise documental sistemática. A análise toma como base empírica os contratos firmados para os trechos das rodovias BR-060 e BR-452 em Goiás, selecionados por representarem uma concessão recentemente assumida pela iniciativa privada e precedida por contratos atualizados do DNIT, com ampla disponibilidade de documentos.

Foram examinados dois conjuntos principais de documentos. O primeiro, da concessão regulada pela ANTT, inclui o Edital de Licitação, o contrato com a operadora da Rota Verde Goiás e seus anexos, especialmente o Programa de Exploração da Rodovia (PER), que consolida as obrigações técnicas da concessionária ao longo da vigência contratual (ANTT, 2024, 2025). Nesse modelo, a remuneração da concessionária ocorre predominantemente por meio da arrecadação tarifária, sendo diretamente influenciada pelo volume de tráfego, ou seja, quanto maior a demanda, maior a receita gerada.

O segundo conjunto de documentos refere-se à gestão pública, com base nos contratos firmados pelo DNIT para os serviços de manutenção nos trechos selecionados. Esses contratos incluem editais, termos de referência, projetos básicos e, em especial, os instrumentos constituintes do Programa Anual de Trabalho e Orçamento (PATO) (DNIT, 2021, 2022a, 2022b, 2023a, 2023b). Nessa modalidade, a remuneração do contratado está vinculada à execução de serviços previamente definidos, pagos conforme medições mensais, independentemente do volume de tráfego. Os contratos PATO correspondem à forma mais comum de atuação do DNIT na manutenção da malha federal, abrangendo ações rotineiras, periódicas, emergenciais e demais intervenções voltadas à preservação das condições técnicas e operacionais da via e de sua faixa de domínio. De acordo com o DNIT (2023c), esse tipo de contrato também contempla respostas a ocorrências de caráter urgente, buscando manter os padrões de serviço estabelecidos.

A análise foi orientada por três eixos de comparação. O primeiro, técnico-contratual, examina a definição dos serviços de manutenção, os padrões técnicos exigidos, a frequência de execução e o escopo dos contratos. O segundo, regulatório e governança, considera os mecanismos de fiscalização, as penalidades por descumprimento, os indicadores de desempenho e eventuais bonificações. O terceiro eixo, econômico-operacional, avalia a duração dos contratos, os modelos de remuneração e a alocação de riscos.

A partir desse recorte, foi elaborada uma matriz comparativa com os principais elementos estruturais de cada contrato. As cláusulas foram organizadas por tema, classificadas segundo os eixos definidos e interpretadas à luz de princípios de regulação contratual e eficiência institucional. Para apoiar a análise, utilizou-se a ferramenta de inteligência artificial (IA) *Sider*, aplicada à leitura e codificação textual dos contratos e documentos normativos. A IA contribuiu para identificar trechos relevantes e sugerir agrupamentos temáticos, otimizando o processo de codificação. Todas as constatações foram revisadas e validadas por leitura crítica humana, garantindo a consistência e o rigor analítico da interpretação. Essa estratégia permitiu identificar convergências e divergências entre os modelos, considerando estrutura normativa e lógica de funcionamento.

3. RESULTADOS

Os resultados da análise documental estão sintetizados na Tabela 1, que apresenta a comparação entre os contratos firmados pelo DNIT para os trechos estudados e o contrato de concessão da Rota Verde Goiás.

Tabela 1: Comparação entre contratos antes e após a concessão da rodovia BR-060/452/GO.

		Gestão do DNIT	Gestão da Rota Verde Goiás SPE S.A
Eixo Técnico-Contratual	Documento Técnico de Embasamento	PATO	PER
	Escopo dos Serviços	Conservação rotineira, preventiva periódica, emergencial e eventualmente demais serviços de manutenção.	Recuperação, manutenção, monitoração, conservação, implantação de melhorias, ampliação de capacidade e manutenção do nível de serviço do Sistema Rodoviário.
	Frequência dos Serviços Prestados	Contínua durante a vigência contratual, sem metas específicas definidas.	Prevista no PER com metas periódicas detalhadas.
	Indicadores ou Parâmetros de Desempenho	Presentes na forma de "Padrões de Desempenho". Aplicam-se a Roçada da Faixa de Domínio; Sistema de Drenagem e OACs; Remoção de Lixo, Árvores ou Animais e Limpeza.	Presentes na forma de "Parâmetros de Desempenho". Aplicam-se a diversos critérios, incluindo Pavimento, Sinalização, OAEs, Sistema de Drenagem e OACs, Terraplenos e Contenções, Faixa de Domínio, Recuperação de Edificações, Sistemas Elétricos e de Iluminação.
Eixo Regulatório e Governança	Mecanismos de Controle e Fiscalização	Fiscalização interna pelo DNIT e por empresa supervisora contratada, com relatórios técnicos, visitas *in loco* e controle orçamentário.	Relatórios periódicos, supervisão, inspeção e auditoria do Contrato a qualquer tempo pela ANTT.
	Penalidades por Descumprimento	Advertência, multa, suspensão temporária da participação em licitação, impedimento de contratar ou declaração de inidoneidade para licitar ou contratar, com a Administração Pública.	Advertência, multa e suspensão do direito de participar de licitações e de contratar com a Administração Pública.
	Incentivos por Desempenho ou Eficiência	Inexistentes ou implícitos, como a não aplicação de glosas ou a continuidade contratual.	Fatores de bonificação.
	Reequilíbrio Econômico-Financeiro e Alocação de Riscos	Admitido em casos restritos, mediante reconhecimento formal do DNIT. Riscos majoritariamente alocados ao contratado. (Lei nº 8.666/93)	Previsto em cláusulas contratuais. O reequilíbrio é possível por fatos do poder concedente ou exógenos, com riscos distribuídos entre as partes conforme a responsabilidade por cada tipo de evento.
	Sustentabilidade / ESG	Tratado de forma pontual, com exigência de termo de compromisso ambiental (PROFAS) e código de ética. ESG ainda incipiente.	Incorpora práticas de sustentabilidade e modelo ESG no formato “pratique-ou-explique”.
Eixo Econômico-Operacional	Duração do Contrato	Prazo Inicial: 2 anos Prorrogável até 5 anos – Lei nº 8.666/93	Prazo Inicial: 30 anos Prorrogável até 35 anos - Lei nº 8.987/95
	Estrutura de Remuneração e Financiamento	Recursos públicos via dotação orçamentária anual. Financiamento exclusivamente público.	Receitas de tarifa de pedágio e extraordinárias, sob responsabilidade da Concessionária a obtenção de receitas.
	Metas Vinculadas ao Desempenho	Parcialmente. Acompanhamento por metas físicas, mas sem vínculo direto a bonificação.	Sim, metas com impacto direto na remuneração. Exemplo: tarifa de pedágio só poderá ser cobrada após conclusão dos trabalhos iniciais.
	Garantias	Conta garantia, caução, fiança bancária ou seguro-garantia.	Caução, fiança bancária ou seguro-garantia.
	Modelo de Contratação	Licitação por Pregão Eletrônico. Regime de Empreitada por preço unitário	Leilão estruturado via BNDES/Infra S.A., realizado na B3. Contrato com Sociedade de Propósito Específico (SPE).

No eixo técnico-contratual, observou-se que o contrato de concessão impõe condicionantes ausentes nos contratos PATO do DNIT para esses trechos, especialmente em relação à pavimentação. O PER estabelece, por exemplo, que defeitos como buracos, panelas, juntas sem selagem, ondulações, escorregamentos e exsudação devem ser corrigidos em até 24 horas (buracos e panelas) ou 72 horas (demais). Também prevê ações normalmente não contempladas nos contratos do DNIT, como implantação e recuperação de edificações

operacionais e conservação de sistemas elétricos e de iluminação.

Ademais, verificou-se que o contrato de concessão prevê penalidades mais severas, incluindo multas diárias em caso de descumprimento, ainda que com teto máximo de valor. Nos contratos PATO do DNIT, a sanção para falhas em serviços como roçada ou controle de vegetação, por exemplo, se dá por meio de glosas, com aplicação de fator redutor sobre a parcela de desempenho da medição, variando de 0% a 100%, não representando penalidade com maior poder coercitivo para a boa performance da contratada.

No eixo regulatório e de governança, identificaram-se diferenças nos instrumentos de fiscalização, controle e responsabilização. Nos contratos de PATO celebrados pelo DNIT, a fiscalização é feita diretamente pelo órgão contratante, com base em relatórios e vistorias de seu corpo técnico e de empresa supervisora contratada. Já no modelo de concessão, há previsão de atuação de empresa supervisora independente, além de inspeções periódicas e auditorias externas. O contrato inclui ainda bonificações atreladas ao desempenho. Ambos os modelos preveem sanções administrativas, com formas de aplicação e gradações distintas.

No eixo econômico-operacional, constatou-se que os contratos adotam regimes distintos de remuneração, financiamento e alocação de riscos. O modelo do DNIT baseia-se em pagamentos públicos via orçamento anual, com prazos mais curtos e menor exposição ao risco pela contratada, limitada a atrasos e contingenciamentos que afetam o limite de empenho do órgão. Já o contrato de concessão prevê receitas operacionais diretas da concessionária, garantias financeiras e cláusulas de reequilíbrio econômico-financeiro vinculadas a eventos definidos em contrato.

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da análise contratual evidenciam as diferenças na forma como o DNIT e a ANTT estruturam juridicamente a gestão da infraestrutura rodoviária. Ainda assim, os contratos compartilham fundamentos comuns. Ambos preveem obrigações mínimas relacionadas à conservação da infraestrutura, exigência de garantias de execução e aplicação de sanções em caso de descumprimento. Essas convergências indicam que, embora estruturados sob lógicas distintas, os modelos operam dentro de um mesmo marco normativo, regido pelos princípios da contratação pública federal.

Apesar dessas semelhanças, a análise sugere que cada modelo contratual parte de premissas diferentes sobre a estruturação das atividades necessárias de conservação e como garantir a entrega destes serviços: ora por meio de controles diretos, ora por sistemas de desempenho e fiscalização. A comparação evidencia que a concessão introduz controles mais complexos, como penalidades diárias e indicadores vinculados a resultados, ao passo que a gestão pública direta mantém maior simplicidade contratual e flexibilidade administrativa.

Outra diferença está na forma como os contratos estruturam a execução e o acompanhamento dos serviços, destacando-se a incorporação tecnológica no contrato de concessão, com uso de equipamentos como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e o *Grip Tester* (GN). Os contratos de PATO do DNIT fixam obrigações técnicas por meio de metas físicas e parâmetros operacionais menos objetivos na pavimentação, enquanto o contrato de concessão detalha essas exigências no PER, na Frente de Serviços Estruturais. Há também distinções na fiscalização. No modelo do DNIT, o controle é feito diretamente pela Administração, com apoio de empresas supervisoras; já na concessão, atuam estruturas paralelas, com empresas supervisoras independentes e auditorias externas.

A remuneração também segue lógicas distintas. No DNIT, os pagamentos são feitos por medição dos serviços, vinculados à dotação orçamentária anual, sujeita a contingenciamentos. Na concessão, a operadora é paga principalmente por tarifas dos usuários, assumindo riscos de receita e tendo a rentabilidade atrelada à entrega dos resultados pactuados. Esse modelo altera a escala contratual, redistribui riscos e reforça incentivos econômicos, mas também impõe limites, já que, ao vincular a remuneração a serviços previamente definidos,

a capacidade adaptativa da concessionária pode reduzir frente a mudanças de prioridade.

Os contratos de concessão atuais superam obstáculos da gestão direta, como descontinuidade, imprevisibilidade orçamentária e falta de incentivos ao desempenho, mas trazem novos desafios, como rigidez e complexidade regulatória. A experiência do DNIT mostra que a simplicidade contratual e a flexibilidade na execução são vantajosas em contextos de baixa previsibilidade e alta variabilidade de demandas. Há espaço para aprendizados mútuos. O DNIT pode aprimorar seus instrumentos com base nas lógicas de desempenho e controle da concessão, enquanto a ANTT pode buscar formas de incorporar maior margem de adaptação, reduzindo o risco de engessamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo comparou os contratos do DNIT e o de concessão da Rota Verde Goiás, referentes à BR-060/452/GO. A análise evidenciou que a transição entre modelos de gestão não é neutra, pois ao delegar à concessionária, o Estado transfere riscos contratuais sem eliminar todas as fragilidades. Em 2025, duas caducidades em concessões rodoviárias revelaram os limites da eficiência contratual diante de cenários adversos. Contratos mais detalhados podem ampliar previsibilidade e controle, mas exigem maior capacidade institucional dos órgãos fiscalizadores. Assim, a governança da infraestrutura depende tanto do conteúdo contratual quanto da flexibilidade para lidar com incertezas e ajustar obrigações. O desafio não está em escolher entre concessão ou gestão direta, mas em fortalecer a racionalidade contratual em qualquer modelo.

Os resultados da avaliação documental, centrada nos contratos e anexos técnicos, indicam a recomendação de incorporar informações práticas, como observações de campo, dados operacionais e entrevistas com técnicos e gestores. Ainda nessa agenda, sugerem-se estudos futuros focados no monitoramento *ex post* do desempenho da concessão e em comparações quantitativas de indicadores técnicos e financeiros, para ampliar a compreensão dos efeitos dos diferentes modelos na qualidade da infraestrutura rodoviária.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsas de estudos que viabilizaram o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT (2024) Edital de Concessão nº 4/2024. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres.

ANTT (2025) Contrato de Concessão nº 4/2024. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres.

Brasil (2023) Portaria nº 995, de 17 de outubro de 2023. Institui a Política Nacional de Outorgas Rodoviárias no âmbito do Ministério dos Transportes e de suas entidades vinculadas. *Diário Oficial da União*, seção 1, n. 199, p. 101, 18 out. 2023.

Brasil (2025) Dados de Transportes – BIT: Banco de Informações de Transportes. Painel Rodoviário. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/paineis-bi. Acesso em: 8 jan. 2025.

DNIT (2021) Ed. Pregão Eletrônico *nº 0232/2021-12.* Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2022a) Ed. Pregão Eletrônico *nº 0059/2022-12.* Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2022b) Ed. Pregão Eletrônico *nº 0549/2022-12.* Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2023a) Ed. Pregão Eletrônico *nº 0154/2023-12.* Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2023b) Ed. Pregão Eletrônico *nº 0164/2023-12.* Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2023c) Resolução nº 8, de 6/11/2023. Estabelece a rotina de procedimentos relativos à elaboração do Plano Anual de Trabalho e Orçamento – PATO e à execução, medição, fiscalização, prorrogação e adequação de contratos de PATO. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Gasiola, D. e T. Marrara (2015) Concessão de rodovia: análise crítica da modelagem institucional do programa de concessões rodoviárias federais. Revista Brasileira de Infraestrutura, v. 1, n. 2, p. 85–108.

Luísa Muglia Souza (luisa.muglia@pet.coppe.ufrj.br)

Victor Hugo Trindade da Silva (victor.hugo@pet.coppe.ufrj.br; victor.trindade@dnit.gov.br)

Sandra Oda (sandraoda@pet.coppe.ufrj.br)

Romulo Dante Orrico Filho (romulo@pet.coppe.ufrj.br)

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Avenida Athos da Silveira Ramos, nº 149, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ANÁLISE DO IMPACTO DOS INCENTIVOS MUNICIPAIS FINANCEIROS NA DEMANDA POR TRANSPORTE COLETIVO EM FLORIANÓPOLIS/SC

Mylena Maria Salgueiro de Lima, Fernando Seabra, Arnoldo Debatin Neto
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
Diante do desafio do financiamento do transporte público, este artigo quantifica o impacto dos subsídios na demanda de passageiros de ônibus em Florianópolis/SC. Por meio de uma regressão linear múltipla (MQO) com dados mensais de 2016 a 2024, foram analisados os efeitos dos subsídios, da tarifa, da atividade econômica (IBC-SC) e da pandemia. Os resultados demonstram que, enquanto a tarifa e a atividade econômica são determinantes preponderantes, os subsídios apresentam um impacto positivo significativo, mas de menor magnitude sobre a demanda. A análise sugere que a política de subsídios tem servido mais à sustentação financeira do sistema do que como um instrumento eficaz para o fomento da demanda.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é um elemento fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e a qualidade de vida da população, sendo o transporte público um componente crucial para a sua eficiência (Ferraz e Torres, 2004). Nesse âmbito, os subsídios tarifários emergem como um instrumento de política pública destinado a ampliar o acesso ao transporte coletivo, especialmente para populações de baixa renda, e a mitigar externalidades negativas como congestionamentos e poluição ambiental (Guzman e Hessel, 2022). A relevância de tais incentivos intensificou-se no cenário pós-pandêmico brasileiro, onde se observa um esforço governamental para recuperar a demanda de passageiros, que em 2024 ainda se encontrava 13,9% abaixo dos níveis de 2019 (NTU, 2024).

A literatura internacional corrobora a relação positiva entre subsídios e o aumento do número de usuários do transporte público em cidades como Londres e Estocolmo (Parry e Small, 2009; Börjesson et al., 2020). No entanto, a eficácia e os impactos redistributivos desses incentivos variam conforme o contexto local, justificando análises aprofundadas em nível municipal.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é analisar o impacto dos incentivos financeiros municipais na demanda de passageiros do sistema de transporte coletivo por ônibus em Florianópolis-SC, durante o período de 2016 a 2024. A análise quantitativa utilizará a demanda de passageiros como variável dependente. As variáveis independentes incluem o montante dos subsídios, o valor da tarifa, o Índice de Atividade Econômica de Santa Catarina (IBC-SC) e uma variável *dummy* para mensurar os efeitos da pandemia de Covid-19.

A escolha de Florianópolis como objeto de estudo justifica-se por suas particularidades geoespaciais, que impõem desafios complexos à mobilidade (Cocco, 2019), e pela existência de um contrato de concessão (Lei nº 9.593/2014) que prevê a aplicação de subsídios. Entre 2016 e 2024, o montante subsidiado pela prefeitura ultrapassou R$ 678 milhões, tornando a análise de seu impacto sobre a demanda um tema de elevada pertinência para a gestão de políticas públicas de transporte urbano.

2. METODOLOGIA

2.1. Coleta de dados

Os dados referentes ao IBC de Santa Catarina foram obtidos por meio do site do Banco Central do Brasil (2024). Já os valores subsidiados pelo município de Florianópolis ao setor de transporte público por ônibus foram consultados no Portal da Transparência da Prefeitura Municipal de Florianópolis (2025).

Com relação ao valor nominal da passagem, os valores adotados no período estudado foram mapeados a partir de uma consulta a artigos jornalísticos publicados em anos anteriores (G1, 2016; G1, 2017; G1, 2018; G1, 2020; G1, 2022). Os valores reais da tarifa do transporte público e do valor subsidiado foram calculados a partir da Equação (1):

$$Valor\ Real = Valor\ Nominal \times \left(\frac{IPCA\ out_2024}{IPCA\ Passado}\right) \quad (1)$$

Os números-índice do IPCA foram obtidos através do IBGE (2025) e correspondem aos valores definidos para a região da cidade de Porto Alegre/RS, área com dados disponíveis mais próxima de Florianópolis e com atividade econômica semelhante.

O valor referente aos giros de catraca por mês entre 2014 e 2024 foi solicitado à Secretaria Municipal de Infraestrutura e Manutenção da Cidade - Florianópolis/SC, que o forneceu para o presente estudo.

2.2. Descrição e tratamento de dados

A partir da coleta dos dados, os valores de interesse à pesquisa foram agrupados por mês de cada ano entre 2016 e 2024, de forma que fosse possível executar a regressão linear múltipla. Na Tabela 1 encontram-se informações adicionais e estatísticas descritivas de cada variável.

Tabela 1: Estatísticas descritivas das variáveis analisadas

Variável	Distribuição	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Passageiros	Assimétrica negativa	4.489.942,25	5.004.827,50	1.493.782,76	15.257,00	6.082.033,00
IBC mensal	Aproximadamente Normal	149,48	149,87	11,55	129,49	179,27
Tarifa	Aproximadamente Normal	5,58	5,56	0,42	4,84	6,45
Subsídios	Assimétrica positiva	6.333.303,61	5.000.612,03	4.978.408,69	101.089,12	27.570.207,17

2.3. Regressão linear múltipla

Para a realização da regressão linear múltipla foi utilizado o software EViews 12 – Student Version Lite.
A Equação (2) inserida para análise é:

$$\log(Pax_t) = \beta_0 + \beta_1 \times log(Pax_{t-1}) + \beta_2 \times log(Pax_{t-2}) + \beta_3 \times log(IBC_t) + \beta_4 \times log(tarifa_t) + \beta_5 \times log(subsídios_t) + \beta_6 \times dumPan + \epsilon \quad (2)$$

Sendo:

- Pax: Número total de passageiros por mês;
- IBC: Índice de Atividade Econômica do Banco Central para o estado de Santa Catarina por mês;
- tarifa: Preço real da tarifa de transporte público em Florianópolis por mês;
- subsídios: Valor dos subsídios ao transporte público em Florianópolis por mês;
- dumPan: Variável binária (0 ou 1) usada para capturar o efeito da pandemia entre março de 2020 e dezembro de 2022, que indica se o período foi durante a pandemia (1) ou não (0);
- β0: Intercepto (valor de passageiros quando todas as variáveis independentes são zero);
- β1, β2, β3, β4, β5, β6: Coeficientes que medem o impacto de cada variável independente sobre Pax, calculados por meio do método Mínimos Quadrados Ordinários (MQO);
- ϵ: Termo de erro, que captura variações não explicadas pelo modelo.

Foi usado o logaritmo na equação para transformar relações não lineares em lineares e, também, interpretar os coeficientes como elasticidades, que é uma variação percentual na variável dependente (y) ocasionada por uma variação de 1% na variável independente (x).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados e análises

A análise da demanda de passageiros do transporte coletivo em Florianópolis, entre janeiro de 2016 e outubro de 2024, foi conduzida por meio de uma regressão linear múltipla pelo método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). O modelo econométrico demonstrou um significativo poder explicativo, com um coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) de 0,73. Este valor indica que 73% da variabilidade mensal no número de passageiros é explicada pelas variáveis independentes selecionadas, conferindo robustez estatística ao modelo. Os coeficientes estimados para cada variável, bem como seu nível de significância, estão detalhados na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes resultantes da regressão linear (R^2 ajustado = 0,73)

Variável associada	Coeficiente (β)	Nível de significância (p-valor)
constante	0,12	0,97
log(passageiros(-1))	0,61	0,00
log(passageiros(-2))	-0,33	0,00
log(IBC)	3,75	0,00
log(tarifa)	-5,61	0,00
log(subsídios)	0,13	0,02
dumPan	-1,41	0,00

O Índice de Atividade Econômica (IBC-SC) apresenta o coeficiente positivo mais expressivo do modelo, 3,75. A alta significância estatística (p-valor < 1%) confirma que a conjuntura econômica é um dos principais vetores da demanda por transporte público. Um aquecimento da economia, refletido no aumento do IBC, impulsiona o número de passageiros de forma substancial. Isso ocorre porque a maior atividade econômica está diretamente associada ao aumento do emprego, do consumo e das viagens a trabalho e a lazer, que são os principais motivos de deslocamento urbano.

Conforme esperado, a variável tarifa possui um coeficiente negativo e de alta magnitude, -5,61, significante a 1%. Este é o efeito mais forte do modelo, demonstrando a elevada elasticidade-preço da demanda. Em termos práticos, aumentos na tarifa são o fator com maior poder de retração no número de passageiros, desestimulando o uso do transporte coletivo de forma imediata e acentuada.

Em contrapartida, a variável subsídios apresenta um coeficiente positivo de 0,13, com significância estatística menor que 5%. A direção positiva do coeficiente confirma a premissa teórica do estudo: a injeção de recursos públicos está associada a um aumento na demanda. Este efeito pode decorrer da manutenção de tarifas mais baixas do que seriam sem o auxílio, da viabilização de gratuidades (como passes estudantis e sociais) ou de melhorias na qualidade do serviço (frequência, renovação da frota) que os recursos permitem.

Contudo, deve-se destacar que a elasticidade do subsídio (0,13) é inferior à dos outros determinantes, como o IBC (3,75) e a tarifa (-5,61). Assim, este resultado é central: embora a política de subsídios funcione na direção esperada, seu impacto prático na atração de passageiros é relativamente pequeno quando comparado aos impactos setoriais (tarifa) e macroeconômicos. Neste sentido, pode-se argumentar que o montante dos subsídios aplicados em Florianópolis, apesar de nominalmente elevado, pode ser insuficiente para gerar um impacto transformador na demanda, atuando mais como um mecanismo de manutenção do equilíbrio financeiro do sistema do que como uma ferramenta potente de fomento e atração de novos usuários.

A variável dummy, com coeficiente de -1,41, captura o choque estrutural negativo causado pela pandemia. O valor, significante a 1%, indica a drástica redução no número de passageiros que não é explicada pelas outras variáveis, refletindo os efeitos de lockdowns, da adoção do trabalho remoto e da percepção de risco sanitário. Com relação à análise dos resíduos, o teste de Breusch-Godfrey resultou no p-valor de 0,9802, que indica a ausência de autocorrelação serial dos erros.

A Figura 1 apresenta a comparação entre a variação do número de passageiros no transporte público por ônibus de Florianópolis-SC e do quantitativo subsidiado no mesmo período.

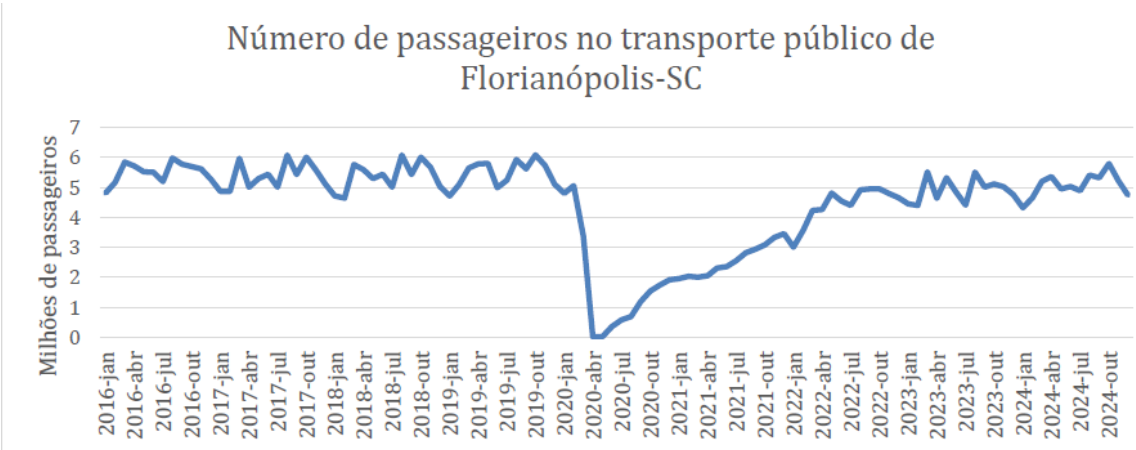


Figura 1: Variação da demanda no transporte público

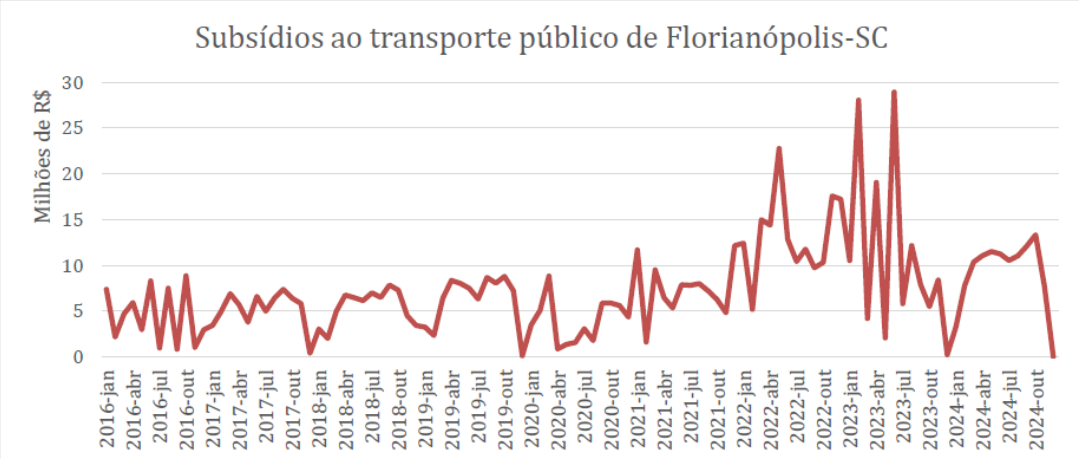


Figura 2: Variação dos subsídios no transporte público

A análise da série histórica da demanda e subsídios revela uma queda abrupta no volume de passageiros do transporte público a partir de abril de 2020, marco inicial da pandemia. Embora os anos seguintes tenham sido de recuperação gradual, os patamares pré-crise ainda não foram restabelecidos. Em uma clara mudança de política para estimular a retomada da demanda, o subsídio ao sistema de ônibus foi consideravelmente ampliado a partir de 2022, período que sucedeu a suspensão das restrições sanitárias. Outro ponto de destaque é a volatilidade do montante subsidiado, que apresenta flutuações mensais.

A partir da observação das Figuras 1 e 2, pode-se argumentar que a relação positiva entre os subsídios e o número de passageiros se deve em grande parte devido à retomada natural das atividades econômicas após a crise sanitária, período no qual houve recuperação parcial da demanda e um aumento de subsídios para manter o equilíbrio financeiro da empresa que fornece o serviço de transporte público. Logo, entende-se que o aumento do valor subsidiado no pós-2020 representou um incentivo ao aumento de oferta do serviço de transporte público (compatível com retomada da demanda pós-pandemia), mas não necessariamente significou melhoria de serviço ou diminuição de tarifa para o usuário.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se propôs a analisar os determinantes da demanda por transporte público por ônibus em Florianópolis, e os resultados indicam uma dinâmica complexa e multifacetada. A análise econométrica demonstrou que a atividade econômica (mensurada pelo IBC-SC) e o valor da tarifa são os determinantes preponderantes, exercendo, respectivamente, forte influência positiva e negativa sobre o número de passageiros. Este achado reafirma a sensibilidade da demanda tanto ao contexto macroeconômico quanto à sua elasticidade-preço.

O principal insight deste trabalho, contudo, reside na avaliação do impacto dos subsídios municipais. Embora a política de subsídios se mostre estatisticamente significante e com efeito positivo, sua magnitude ($\beta = 0{,}19$) é relativamente pequena quando comparada aos demais vetores. Este resultado indica que, na sua configuração atual, os subsídios em Florianópolis funcionam mais como um mecanismo de sustentação financeira para o equilíbrio do sistema do que como uma ferramenta proativa e eficaz para o fomento da demanda. O baixo impacto pode derivar de um volume de recursos insuficiente para alterar a percepção de custo-benefício dos usuários ou da possibilidade de os recursos serem direcionados primordialmente para cobrir déficits operacionais, sem se traduzirem em melhorias tangíveis na qualidade do serviço, como expansão da frota, no aumento da frequência ou na modernização da infraestrutura.

Diante disso, a implicação para a política pública é clara: para que os subsídios se tornem um vetor de crescimento da demanda, sua aplicação não pode ser isolada. É imperativo que façam parte de uma estratégia integrada que contemple a otimização da gestão dos recursos e sua vinculação a metas de qualidade. Medidas como a racionalização de tarifas, a expansão de linhas para áreas mal atendidas e, principalmente, a melhoria da experiência do usuário são complementos indispensáveis.

Para futuras investigações, recomenda-se a incorporação de variáveis de desempenho e eficiência, como índices de pontualidade, tempo médio de espera, idade da frota e dados de satisfação do usuário. Tal extensão

permitiria testar a hipótese de que os subsídios podem impactar a demanda de forma indireta, por meio da melhoria da qualidade do serviço. Esses estudos adicionais serão cruciais para refinar as políticas públicas e, assim, construir um sistema de transporte coletivo mais resiliente, atrativo e eficaz para Florianópolis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banco Central do Brasil (2024) Índice de Atividade Econômica Regional - Santa Catarina-IBCR-SC. Disponível em: https://dadosabertos.bcb.gov.br/dataset/25402-sgs (acesso em 17/06/2025).

Börjesson, M.; J. Eliasson e I. Rubensson (2020) Distributional effects of public transport subsidies. *Journal of Transport Geography*, v. 84. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102677.

Cocco, R. G. (2019) A reprodução de velhos paradigmas em políticas de transporte e mobilidade: uma análise da região metropolitana de Florianópolis. *Revista Transporte y Territorio*, n. 20. DOI: 10.34096/rtt.i20.6390.

Ferraz, A. C. C. P.; e I. G. E. Torres (2004) *Transporte Público Urbano*. RiMa, São Carlos.

G1 (2016) Tarifa de ônibus de Florianópolis fica mais cara a partir de 8 de janeiro. Disponível em: https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2016/12/tarifa-de-onibus-de-florianopolis-fica-mais-cara-partir-de-8-de-janeiro.html (acesso em 17/06/2025).

G1 (2017) Tarifa de ônibus de Florianópolis será de R$ 3,99 no cartão e R$ 4,20 em dinheiro a partir de segunda. Disponível em: https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/tarifa-de-onibus-de-florianopolis-sera-de-r-399-no-cartao-e-r-420-em-dinheiro-a-partir-de-segunda.ghtml (acesso em 17/06/2025).

G1 (2018) Passagem de ônibus de Florianópolis será de R$ 4,18 no cartão e R$ 4,40 no dinheiro a partir de 1º de janeiro. Disponível em: https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2018/12/28/passagem-de-onibus-de-florianopolis-sera-de-r-418-no-cartao-e-r-440-no-dinheiro-a-partir-de-1o-de-janeiro.ghtml (acesso em 17/06/2025).

G1 (2020) Passagem de ônibus em Florianópolis será de R$ 4,38 no cartão e R$ 4,50 no dinheiro a partir de 1º de janeiro. Disponível em: https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/12/29/passagem-de-onibus-de-florianopolis-sera-de-r-438-no-cartao-e-r-450-no-dinheiro-a-partir-de-1o-de-janeiro.ghtml (acesso em 17/06/2025).

G1 (2022) Florianópolis tem aumento da tarifa de ônibus a partir de 1º de janeiro de 2023. Disponível em: https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2022/12/28/florianopolis-tem-aumento-da-tarifa-de-onibus-a-partir-de-1o-de-janeiro-de-2023.ghtml (acesso em 17/06/2025).

Guzman, L. A.; e P. Hessel (2022) The effects of public transport subsidies for lower-income users on public transport use: A quasi-experimental study. *Transport Policy*, v. 126, p. 1-9. DOI: 10.1016/j.tranpol.2022.07.002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2025) IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html (acesso em 17/06/2025).

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (2024) *Anuário NTU: 2023-2024*. Brasília.

Parry, I. W. H.; e K. A. Small (2009) Should urban transit subsidies Be reduced? *American Economic Review*, v. 99, n. 3, p. 700–724. DOI: 10.1257/aer.99.3.700.

Prefeitura Municipal de Florianópolis (2014) *Contrato de Concessão N° 462/SMMU/2014 - CONTRATO DE CONCESSÃO DA PRESTAÇÃO E EXPLORAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE PASSAGEIROS DO MUNICÍPIO DE FLORIANÓPOLLS/SC, NAS MODALIDADES REGULAR OU CONVENCIONAL E DIFERENCIADO*. Disponível em: https://transparencia.e-publica.net/epublica-portal/#/florianopolis/portal/despesa/avancado/gastosfavorecidoTable?entidade=2002 (acesso em 17/06/2025).

Prefeitura Municipal de Florianópolis (2025) Portal da Transparência. Disponível em: https://transparencia.e-publica.net/epublica-portal/#/florianopolis/portal/despesa/avancado/gastosfavorecidoTable?entidade=2002 (acesso em 17/06/2025).

Mylena Maria Salgueiro de Lima (mylena.salgueiro@posgrad.ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, R. Eng. Agronômico Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, Brasil
Fernando Seabra (f.seabra@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, R. Eng. Agronômico Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, Brasil
Arnoldo Debatin Neto (debatin.neto@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, R. Eng. Agronômico Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, Brasil

A RETOMADA DOS AEROPORTOS NO CONTEXTO PÓS-COVID-19: UMA REVISÃO COM ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Miguel Feuser Capella
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Este estudo tem como objetivo identificar os principais fatores que influenciaram a recuperação dos aeroportos após a pandemia de COVID-19. A metodologia combinou análise bibliométrica e revisão da literatura, com base em publicações recentes extraídas de bases como *Web of Science* e *Scopus*. Os resultados indicam que o ritmo de recuperação foi desigual entre regiões e aeroportos, sendo fortemente condicionado por fatores como tipo de operação (doméstica ou internacional), perfil da demanda (lazer ou negócios), conectividade e movimentação de carga. De forma geral, aeroportos com maior participação de voos domésticos e voltados ao turismo apresentaram retomada mais rápida, enquanto aqueles com forte dependência de viagens corporativas enfrentaram recuperação mais lenta. Além disso, observam-se mudanças na estrutura da demanda e na configuração da rede aérea, o que sugere impactos duradouros no setor e a necessidade de adaptação frente a novas realidades de mercado.

1. INTRODUÇÃO

A pandemia de COVID-19 teve um impacto significativo na demanda por transporte aéreo, representando o choque mais severo na aviação comercial desde a Segunda Guerra Mundial (IATA, 2020). As restrições impostas pelos governos em 2020 reduziram drasticamente o tráfego de passageiros, afetando a eficiência operacional e financeira dos aeroportos (Liou et al., 2024), além da conectividade, devido ao remanejamento das rotas.

Ainda que a demanda venha se recuperando desde o auge da crise, em abril de 2020, esse processo tem ocorrido de forma desigual entre segmentos e aeroportos, tanto no Brasil quanto em outros países. Mesmo após o fim da Emergência de Saúde Pública anunciado pela OMS em maio de 2023, o setor aeroportuário ainda não retornou ao patamar anterior à crise. Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Brasil movimentou 215 milhões de passageiros em 2024, número ainda inferior aos 218 milhões registrados em 2019. A Figura 1 revela que o ritmo de recuperação da demanda variou entre os segmentos, sendo a retomada do transporte internacional mais lenta, porém caracterizada por um crescimento contínuo e estável ao longo do tempo.

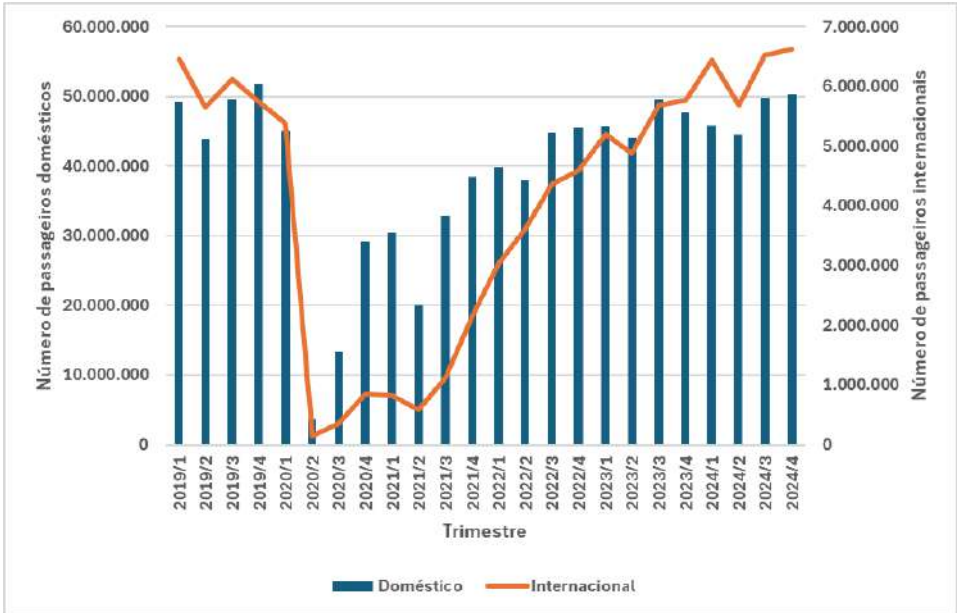


Figura 1: Movimentação trimestral de passageiros em aeroportos brasileiros
Fonte: Adaptado de ANAC

Esse efeito não é exclusivo do Brasil, mas também se verifica em outros mercados. Estudos como o de Baran e Gomes (2022) mostram que a recomposição da malha aérea não seguiu um padrão linear, pois a pandemia

reconfigurou os padrões de atratividade das rotas, favorecendo algumas e tornando outras menos viáveis. Essa evidência sugere que fatores estruturais, econômicos, geográficos e operacionais podem influenciar de forma significativa a velocidade de recuperação da eficiência no setor.

Este estudo tem como objetivo identificar os principais fatores que influenciaram o ritmo e os padrões de recuperação dos aeroportos no período pós-pandemia, além de avaliar em que medida essas transformações apontam para mudanças estruturais e duradouras no setor. Os resultados obtidos podem contribuir com gestores públicos e privados no enfrentamento de efeitos ainda persistentes da crise e na preparação para eventos futuros de natureza semelhante.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se inicialmente em uma análise bibliométrica preliminar, com o objetivo de mapear o cenário atual da produção científica sobre o tema. Essa etapa foi realizada a partir de buscas na base de dados *Web of Science*, reconhecida internacionalmente por seu amplo escopo e qualidade.

Na etapa seguinte, foi conduzida uma revisão da literatura a partir das bases *Web of Science, Scopus* e Google Acadêmico, utilizando diversas combinações de palavras-chave, incluindo aquelas apresentadas na seção 3. Para incluir publicações nacionais, também foram feitas buscas em português nas bases citadas e na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD).

A seleção das publicações baseou-se na leitura de títulos e resumos, priorizando estudos alinhados ao tema e veiculados em periódicos de maior relevância. Focou-se especialmente em trabalhos que analisam o processo de recuperação do transporte aéreo, evitando aqueles que se limitaram aos impactos iniciais da pandemia ou que apresentaram apenas projeções. Adicionalmente, referências complementares foram incorporadas ao longo da redação por meio da estratégia de busca bola de neve, de modo a enriquecer a discussão sobre tópicos específicos sempre que necessário.

3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A primeira análise feita é do número de publicações por ano, de modo a avaliar a tendência atual do interesse sobre o tema da relação entre pandemia e transporte aéreo (A pesquisa no *Web of Science* utilizou os termos TS = (('*aviation*' OR *'air transport'* OR '*airport*') AND ('*pandemic*' OR '*covid-19*')). Também foi analisada a evolução do número de publicações que aborda o tema do mercado de aviação no pós-pandemia (A pesquisa no *Web of Science* utilizou os termos TS = (('*aviation*' OR *'air transport'* OR '*airport*') AND ('*postpandemic*' OR '*post pandemic'* OR '*post covid*' OR '*post-covid*'))).

A Figura 2 ilustra a explosão de publicações sobre estes temas a partir do ano de 2020 na base de dados *Web of Science*. O tema da pandemia e transporte aéreo teve um ápice no ano de 2021 com 789 publicações, já o interesse pelo pós-pandemia atingiu um ponto máximo em 2023, com 71 estudos.

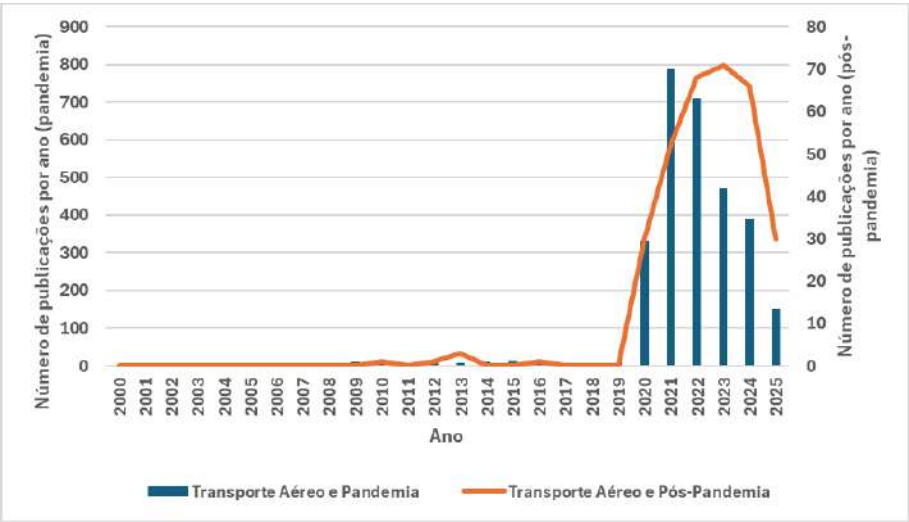


Figura 2: Distribuição de estudos por ano de publicação no *Web of Science*

Com a recuperação acelerada da movimentação nos aeroportos, é possível observar uma queda no número de estudos sobre transporte aéreo e pandemia a partir de 2021. Por outro lado, fica claro a partir da Figura 2 que há preocupação com a situação do mercado de aviação após o fim da pandemia e que assuntos sobre este tema estão com tendência de crescimento.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde 2020, inúmeros estudos analisaram o impacto da COVID-19 no transporte aéreo. Inicialmente, as pesquisas concentraram-se na disseminação do vírus, na previsão de demanda e nas mudanças operacionais nos aeroportos (Sun et al., 2021). Posteriormente, a atenção voltou-se para os impactos de longo prazo, especialmente para as disparidades regionais na recuperação e para o declínio das viagens a negócios (Sun et al., 2022).

Um foco comum entre esses estudos é a identificação das variáveis que influenciaram o ritmo de recuperação. Sun et al. (2022) destacam a importância de examinar os efeitos duradouros no mercado, incluindo as diferenças nas taxas de recuperação entre as regiões. Em 2022, enquanto alguns mercados já haviam superado os níveis anteriores à pandemia, outros ainda enfrentavam baixa demanda.

4.1. Fatores Determinantes do Ritmo de Recuperação dos Aeroportos

Nos Estados Unidos, Gao (2022) constatou que a localização geográfica desempenhou um papel crucial na recuperação, sendo que os aeroportos tradicionalmente dependentes de viagens a negócios se recuperaram mais lentamente. Na China, Chen et al. (2024) analisaram como a infraestrutura, as condições socioeconômicas e as políticas governamentais influenciaram a recuperação dos aeroportos, identificando variações regionais significativas. O estudo também concluiu que os *hubs* chineses foram mais vulneráveis e apresentaram uma recuperação mais lenta. Um padrão semelhante foi observado nos Estados Unidos, onde aeroportos com alta participação de voos intercontinentais antes da pandemia tiveram uma recuperação mais lenta do que aqueles voltados ao tráfego doméstico (Gao, 2022).

Na Europa, Su et al. (2023) analisaram aeroportos e companhias aéreas durante a pandemia e identificaram o número de voos como um indicador-chave de resiliência. O estudo constatou que aeroportos com maior concentração de mercado — onde operam menos companhias aéreas — foram mais resilientes. Os aeroportos regionais, com menos companhias aéreas e tráfego predominantemente doméstico, apresentaram melhor recuperação, já que as companhias tinham maior flexibilidade para ajustar a capacidade conforme a demanda. Em contraste, nos aeroportos mais competitivos, as restrições de slots limitaram a capacidade das companhias aéreas de se adaptarem rapidamente.

4.2. Impactos da Pandemia na Eficiência Operacional dos Aeroportos

O impacto da pandemia no desempenho dos aeroportos também foi abordado em diversos estudos, embora poucos tenham explorado os fatores determinantes que influenciaram a produtividade aeroportuária durante esse período (Güner e Codal, 2024). Por exemplo, Shamohammadi et al. (2022) analisaram dados de eficiência de um aeroporto coreano entre 2001 e 2021 e constataram que, embora a eficiência tenha sido ligeiramente afetada pela pandemia, o impacto negativo da queda no volume de passageiros foi parcialmente compensado pelo crescimento nas operações de carga. Essa diversificação ajudou a manter o desempenho geral, apesar da crise.

Güner e Codal (2024) também relacionaram a produtividade dos aeroportos às características da rede aérea, investigando se a conectividade aeroportuária e a centralidade na rede influenciaram o desempenho. Seus achados indicam que, durante a pandemia, a conectividade internacional perdeu relevância como vantagem competitiva, enquanto as redes domésticas se tornaram mais importantes. Como resposta, os autores recomendam que os gestores aeroportuários fortaleçam as rotas domésticas para aumentar a resiliência diante de interrupções extremas.

No Brasil, Falcão et al. (2022) aplicaram a Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliar a eficiência dos aeroportos brasileiros entre 2010 e 2020. De forma semelhante ao caso coreano, os resultados mostraram uma queda na eficiência relacionada à movimentação de passageiros durante a pandemia, mas uma melhora no

desempenho ligado à carga. De Oliveira et al. (2024) analisaram 23 aeroportos internacionais brasileiros entre 2010 e 2021 e observaram que os índices de eficiência atingiram seus níveis mais baixos em 2020 e 2021. Essa queda foi amplamente atribuída à forte redução no tráfego de passageiros, enquanto os níveis de insumos — como infraestrutura e pessoal — permaneceram inalterados.

4.3. Tendências Estruturais e Perspectivas para o Setor no Pós-Pandemia

Uma das principais tendências que emergiram desse período foi a recuperação mais rápida do segmento de viagens a lazer em comparação às viagens a negócios. Czerny et al. (2021) apontam que o crescimento do teletrabalho e das reuniões virtuais tende a persistir e até se expandir nos próximos anos, resultando em um declínio estrutural nas viagens corporativas. Essa tendência já é confirmada por dados de sistemas de reservas de companhias aéreas e operadoras de turismo da América do Norte (Baran e Gomes, 2022). De forma semelhante, Bouwer et al. (2021) argumentam que dados históricos de crises anteriores — como o 11 de setembro e a crise financeira de 2008 — também mostram uma recuperação muito mais rápida das viagens a lazer.

No Brasil, Pedreira Junior et al. (2022) estudaram a redução nas viagens oficiais realizadas por servidores públicos federais e identificaram uma queda sem precedentes no número de deslocamentos a trabalho. A recuperação tem sido lenta, o que sugere que novos hábitos de trabalho podem ter se tornado permanentes. As projeções do estudo indicam que os volumes de viagens dificilmente retornarão aos níveis de 2019.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise bibliométrica e a revisão da literatura revelaram lacunas relevantes no entendimento dos efeitos da pandemia sobre o transporte aéreo, especialmente no que diz respeito aos estágios posteriores de recuperação. Por exemplo, embora 62% dos estudos tenham sido publicados entre 2020 e 2022 (Figura 2), muitos deles utilizam apenas dados dos primeiros anos da pandemia, quando os impactos ainda eram imediatos e a recuperação estava em curso.

Por exemplo, o estudo de Shamohammadi et al. (2022) utiliza apenas dados até o ano de 2021, mas afirma que o período analisado deve ser expandido em estudos futuros visando explorar melhor o fenômeno. De modo similar, Chen et al. (2024) aponta que uma análise mais abrangente deveria incorporar dados de um período mais longo, examinando ciclos pandêmicos completos. Isso é essencial para avaliar a eficiência dos aeroportos em todas as fases: pré-pandemia, pico, recuperação e pós-pandemia.

A revisão da literatura permitiu identificar um conjunto consistente de variáveis que influenciaram o ritmo de recuperação da eficiência aeroportuária no período pós-pandemia. Em diferentes regiões do mundo, observou-se que os aeroportos com maior dependência de voos internacionais, especialmente os hubs com alta centralidade na rede, apresentaram ritmo de recuperação mais lento. Em contrapartida, aeroportos regionais e com foco em voos domésticos se recuperaram mais rapidamente, beneficiando-se de uma maior flexibilidade operacional e da reconfiguração da malha aérea, com realocação da capacidade para destinos com demanda mais resiliente. Além disso, fatores como o nível de concentração de mercado (número reduzido de companhias aéreas operando), a localização geográfica, a conectividade doméstica e o volume de movimentação de carga também se destacaram como determinantes importantes da resiliência aeroportuária. Esses achados reforçam a natureza multifatorial da recuperação e sugerem que aeroportos com perfis operacionais mais diversificados e menos expostos à volatilidade do tráfego internacional tendem a apresentar maior robustez frente a choques disruptivos.

6. CONCLUSÃO

Este estudo conduziu uma revisão da literatura, acompanhada de análise bibliométrica, para identificar os principais fatores que influenciaram o processo de recuperação da eficiência dos aeroportos no contexto pós-pandemia. De modo geral, os achados enfatizam que a recuperação da aviação tem sido desigual. A análise revelou que variáveis como tipo de operação (doméstica ou internacional), conectividade, perfil predominante da demanda (lazer ou negócios) e movimentação de carga tiveram influência decisiva na velocidade e no padrão de recuperação entre os aeroportos. No caso específico da eficiência, observou-se que a pandemia afetou principalmente a movimentação de passageiros, ao passo que o crescimento relativo da carga contribuiu para atenuar as perdas em alguns aeroportos. Além disso, observou-se que a pandemia provocou mudanças

estruturais na demanda e na operação aeroportuária, indicando a necessidade de adaptações permanentes no setor.

Por fim, considerando o interesse crescente no tema do pós-pandemia (Figura 2), é fundamental que os aeroportos incorporem os aprendizados recentes, adotando medidas que fortaleçam sua capacidade de resposta a contextos de crise. Isso inclui não apenas a mitigação de impactos imediatos, mas também a preparação para cenários futuros por meio de estratégias de reorganização e adaptação contínua. Nesse sentido, futuras pesquisas devem aprofundar a compreensão sobre os mecanismos que contribuem para a resiliência aeroportuária, oferecendo subsídios para o desenvolvimento de soluções mais robustas frente às incertezas do setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baran, R.; Gomes, S. B. V. Desdobramentos da crise da pandemia no transporte aéreo dos eua: o papel dos jatos regionais apurado no período 2020-2021. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2022.

Bouwer, J.; Wittkamp, N.; Saxon, S. Back to the Future?: Airline Sector Poised for Change Post-COVID19. [S.l.]: McKinsey, 2021. v. 2.

Chen, Y. et al. An analysis of the context factors influencing the diverse response of airports to covid-19 using panel and group regression. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, v. 179, p. 103925, 2024.

Czerny, A. I. et al. Post pandemic aviation market recovery: Experience and lessons from china. Journal of Air Transport Management, Elsevier, v. 90, p. 101971, 2021.

Falcão, V. A. et al. Impacto da pandemia da covid-19 na eficiência dos aeroportos brasileiros: aplicação de análise envoltória de dados e regressão tobit. Revista Transporte y Territorio, n. 27, 2022.

Gao, Y. Benchmarking the recovery of air travel demands for US airports during the covid-19 pandemic. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Elsevier, v. 13, p. 100570, 2022.

Güner, S.; Codal, K. S. Airport productivity and network centrality in the pandemic outbreak: Lessons from the turkish airports. Journal of Air Transport Management, Elsevier, v. 115, p. 102552, 2024.

IATA. Iata annual review 2020. Recuperado de https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2020.pdf, 2020.

Pedreira Junior, J. U. et al. The panorama of public officials' meeting trips after the covid-19 pandemic: Impact level, recovery, and prospects. Frontiers in Future Transportation, Frontiers Media SA, v. 3, 2022.

Liou, J. J. et al. Exploring the impact of pandemic measures on airport performance. Aerospace, MDPI, v. 11, n. 5, p. 373, 2024.

de Oliveira, M.S. et al. An integrated data envelopment analysis framework for operational efficiency assessment in brazilian international airports. Decision Analytics Journal, v. 12, p. 100493, 2024.

Shamohammadi, M. et al. Exploring the performance of international airports in the pre-and post-covid19 era: Evidence from incheon international airport. Sustainability, MDPI, v. 14, n. 7, p. 4222, 2022.

Su, J. et al. Aviation resilience during the covid-19 pandemic: A case study of the european aviation market. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, v. 177, p. 103835, 2023.

Sun, X.; Wandelt, S.; Zhang, A. Covid-19 pandemic and air transportation: Summary of recent research, policy consideration and future research directions. Transportation research interdisciplinary perspectives, Elsevier, v. 16, p. 100718, 2022.

Sun, X. et al. Covid-19 pandemic and air transportation: Successfully navigating the paper hurricane. Journal of Air Transport Management, Elsevier, v. 94, p. 102062, 2021.

Miguel Feuser Capella (Miguel.capella@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE PROJETO NA ACCV DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DA REABILITAÇÃO POR SELAGEM DE TRINCAS

Vanessa Ferreira de Vasconcelos, Ana Noemy Fernandes Moreira, Flávio Santos Sousa Costa, Iuri Sidney Bessa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
A escolha entre métodos de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico pode impactar significativamente a durabilidade, o desempenho e os custos ao longo do ciclo de vida dos pavimentos. A Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV), introduzida no Brasil na década de 1950, consolidou-se como ferramenta essencial para embasar decisões técnicas e econômicas, especialmente em intervenções de manutenção e reabilitação. Este estudo avalia o impacto de diferentes configurações de projeto no ACCV de pavimentos asfálticos, por meio do software MeDiNa, adotando a evolução da área trincada (AT%) como critério de desempenho. Foram simulados dois níveis de tráfego (médio e pesado) e duas espessuras de revestimento (5,1 cm e 15 cm), considerando exclusivamente a selagem de trincas como estratégia de manutenção. Os resultados indicam que a espessura de 15 cm apresenta melhor desempenho estrutural sob tráfego pesado, enquanto a solução de 5,1 cm é mais vantajosa economicamente para tráfego médio, destacando a relevância da ACCV na gestão eficiente de pavimentos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pavimentação asfáltica representa um dos principais elementos da infraestrutura viária, sendo essencial para garantir a mobilidade urbana, a integração regional e a eficiência logística. O revestimento asfáltico, um dos quatro elementos da pavimentação, é definido no Livro Pavimentação Asfáltica (2022) como " é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança)". A qualidade dessa estrutura está diretamente relacionada à durabilidade do pavimento: dados da CNT(2024) indicam que 31,2% da malha rodoviária brasileira apresenta condições ótimas de tráfego Contudo, falhas no dimensionamento estrutural ou a execução de intervenções pouco eficazes podem comprometer a vida útil da pavimentação, resultando em elevados custos de manutenção e frequentes interrupções no tráfego.

Introduzida inicialmente como Análise de Custo-Benefício na década de 1950 (Babashamsi *et al.*, 2016), a Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) tem ganhado destaque na engenharia de transportes, principalmente no contexto atual que demanda soluções economicamente viáveis, tecnicamente eficientes e ambientalmente sustentáveis. Ao considerar fatores como intensidade de tráfego, espessura das camadas e frequência das intervenções, a ACCV proporciona uma base racional para a escolha de alternativas construtivas e estratégias de conservação.

Com o avanço das tecnologias e da modelagem computacional, os métodos de dimensionamento de pavimentos têm evoluído significativamente, migrando de abordagens puramente empíricas para modelos mecanísticos-empíricos, os quais possibilitam análises mais robustas e realistas do desempenho estrutural das camadas ao longo do tempo (Lacerda *et al.*, 2024; Rodrigues, 2024). Neste cenário, a ACCV emerge como uma ferramenta estratégica para o planejamento e a gestão da infraestrutura viária, permitindo uma avaliação abrangente dos custos envolvidos desde a construção até as etapas de manutenção e reabilitação, ao longo da vida útil projetada (Teles *et al.*, 2023).

Pesquisas recentes como as de Krishna e Kumar (2020) e Kumari *et al.* (2022) têm demonstrado o potencial da ACCV ao conceber um quadro econômico comparativo entre diferentes soluções de pavimentação, incorporando também variáveis ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e de carbono equivalente. Dentre os diversos componentes estruturais, a camada de revestimento asfáltico assume papel central, por ser a mais exposta às ações do tráfego e às intempéries, além de concentrar parcela significativa dos custos de reabilitação ao longo do tempo.

Diante disso, o presente estudo propõe a aplicação da ACCV focada na camada de revestimento asfáltico de pavimentos, componente fundamental na proteção estrutural e no desempenho funcional da via. A análise foi realizada por meio de simulações no software do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), ferramenta oficial do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que

incorpora critérios mecanísticos-empíricos e permite a modelagem de cenários realistas de tráfego, características dos materiais adotados e espessuras das camadas da estrutura. Foram avaliadas diferentes configurações de projeto, variando-se parâmetros como volume de tráfego e espessura da camada de revestimento. Desse modo, a questão que norteia o estudo é: selagem de trincas pode ser considerada uma alternativa economicamente viável em diferentes condições de tráfego e espessura do revestimento?

2. METODOLOGIA

Diante do problema apresentado, a estrutura da pesquisa foi organizada em três etapas principais, ilustradas na Figura 1, de modo a permitir a avaliação do impacto da espessura do revestimento e das condições de tráfego no desempenho e no custo do ciclo de vida dos pavimentos. As etapas foram : (i) coleta dos dados de espessura e tráfego apresentados por Santiago(2017), que trouxe dados consolidados em estudo prévio e representando condições típicas do contexto brasileiro; (ii) simulações no software MeDiNa, considerando como parâmetros a evolução da área trincada(AT%) e do afundamento de trilha de roda(ATR); e (iii) aplicação da Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) para avaliar as alternativas de reabilitação por selagem de trincas, técnica eficaz de avaliação de alternativas de projeto que atende a um mesmo critério de desempenho (Teles et al.,2023).

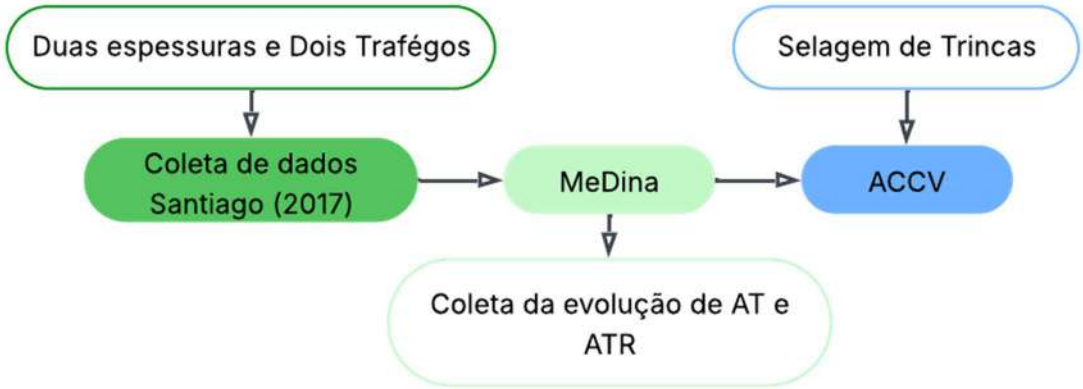


Figura 1: Fluxo metodológico da pesquisa

Essa abordagem possibilitou avaliar, sob condições de tráfego, o impacto da espessura do revestimento asfáltico no desempenho estrutural e no custo total acumulado ao longo do ciclo de vida do pavimento.

3. RESULTADOS

As simulações baseiam-se na proposta de Santiago (2017), apresentada na Figura 2. Para o presente estudo, foram selecionadas duas espessuras de revestimento asfáltico: 5,1 cm e 15 cm para a análise da evolução de área trincada. As estruturas adotadas são decorrentes do processo de desenvolvimento de uma função de transferência para previsão de AT%, fator de ajuste obtido por meio de correlação de dados obtidos em laboratório e em condições de campo (Fritzen, 2016).

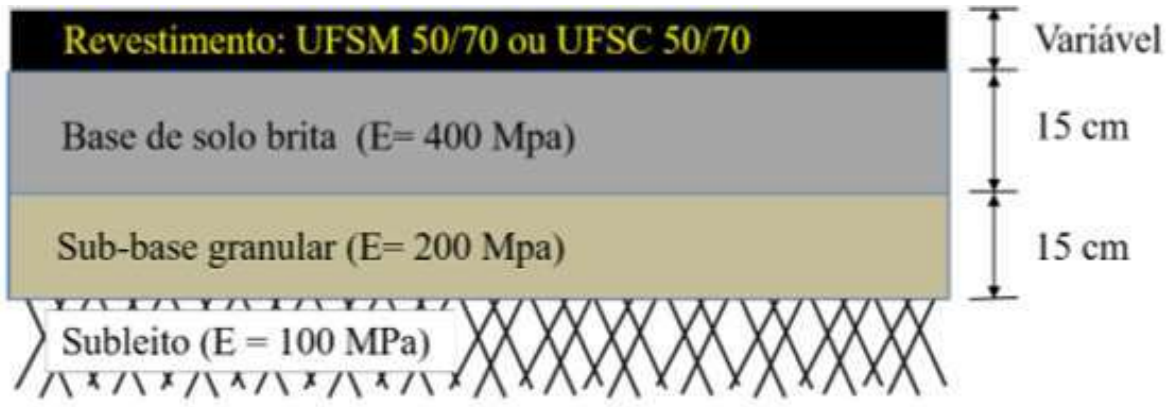


Figura 2: Estrutura do pavimento proposta por Santiago (2017)

De acordo com a ANTT (2014), os contratos de concessão utilizam 20% de AT como referência para intervenção, enquanto o DNIT (IPR-720, 2006) considera 30% como limite para classificar o pavimento como severamente danificado, ainda que trafegável. Neste estudo, adotou-se o critério de 30% como parâmetro de comparação, permitindo identificar em que momento as estruturas simuladas atingem condições críticas de desempenho.

Os resultados do MeDiNa mostram que, em tráfego médio, o revestimento de 5,1 cm atingiu 30% de AT% após cerca de 108 meses (9 anos), exigindo duas manutenções, enquanto a estrutura de 15 cm manteve-se abaixo desse limite até o final do ciclo de 10 anos, necessitando apenas uma intervenção. Já em tráfego pesado, a solução de 5,1 cm ultrapassou 30% em apenas 18 meses, inviabilizando sua adoção, como pode ser observado na Figura 3. A estrutura de 15 cm apresentou maior resistência, mas ainda assim demandou até cinco intervenções ao longo do período de análise, como demonstrado na Figura 4.

Quanto ao critério de afundamento de trilha de roda (ATR), o limite máximo de 10 mm definido pelo MeDiNa foi utilizado como referência de desempenho. Observou-se que todos os cenários simulados permaneceram abaixo desse valor ao longo da vida útil projetada, indicando que a fissuração por fadiga (AT%) constitui o parâmetro mais crítico para a definição de intervenções.

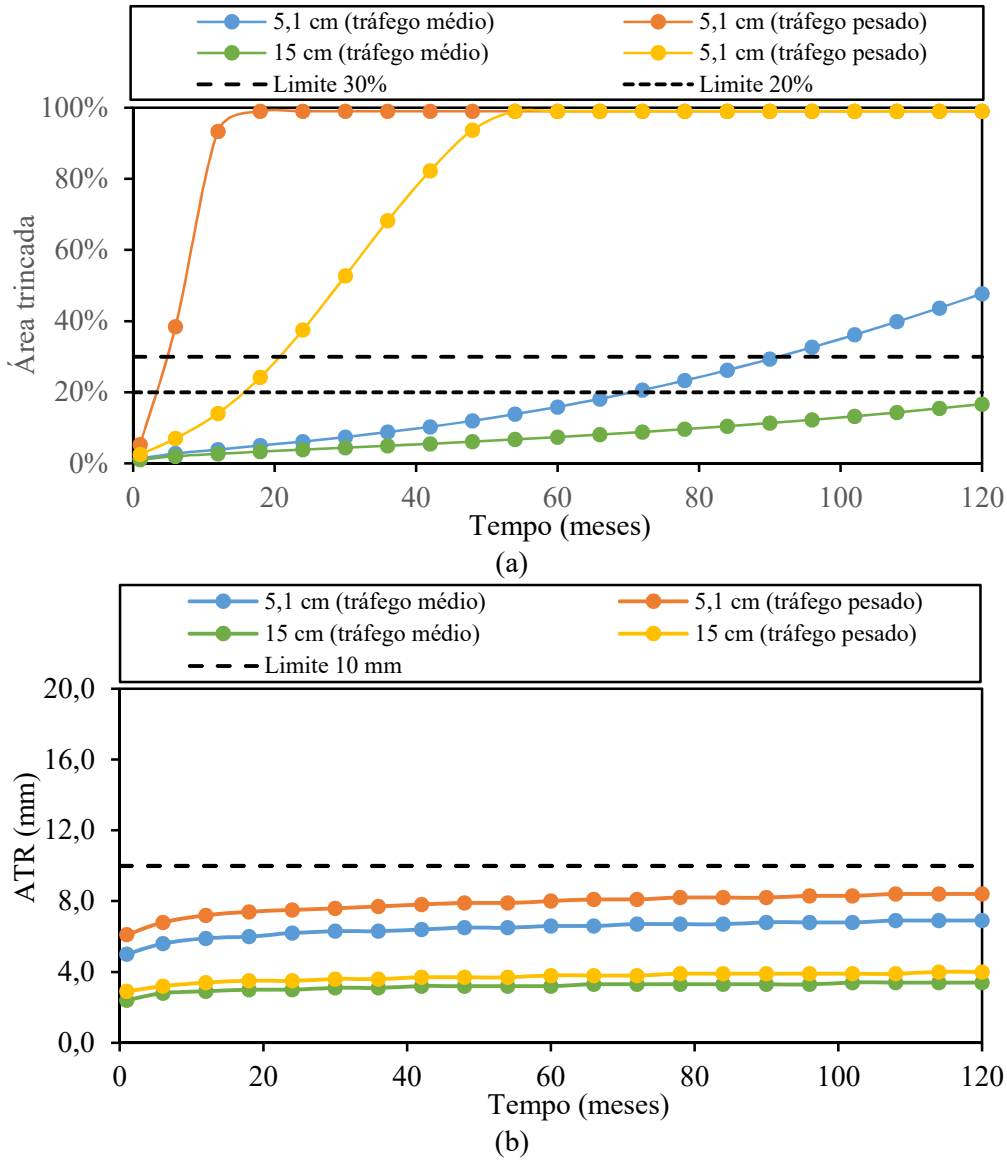


Figura 3: Evolução da previsão de defeitos ao longo do tempo: (a) área trincada e (b) afundamento de trilha de roda

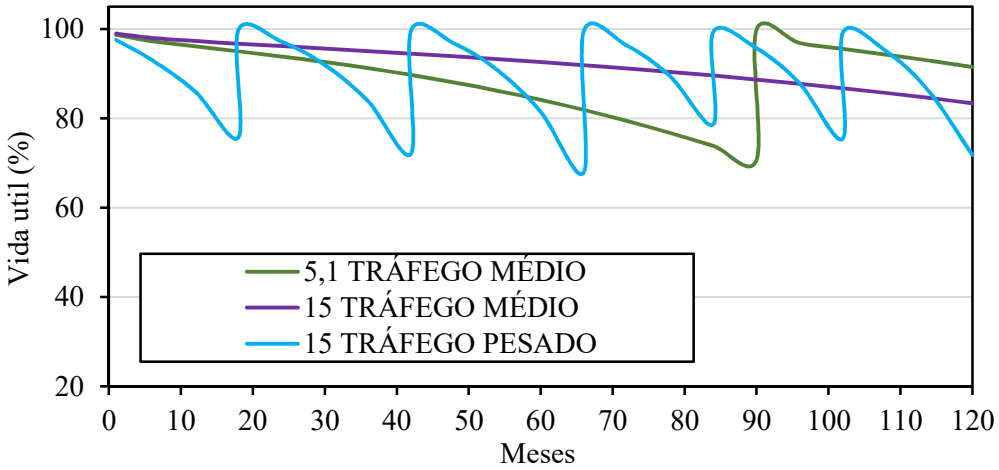


Figura 4: Análise de ciclos de intervenções ao longo da vida útil

A análise econômica conforme observado na Tabela 1 utilizando os valores do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO, 2025) confirma essa tendência: em tráfego médio, a estrutura de 5,1 cm foi a alternativa mais vantajosa, com custo total de R$ 815 mil, aproximadamente 40% inferior à solução de 15 cm. Em contrapartida, no tráfego pesado, apenas a estrutura de 15 cm apresentou desempenho aceitável, ainda que a um custo significativamente mais elevado (R$ 1,46 milhão).

Tabela 1: Análise de custo do ciclo de vida (ACCV)

Tipo da estrutura	Implantação (R$)	Manutenção (R$)	Custo Total em 10 anos (R$)
5,1 cm / tráfego médio	795.559,41	19.449,10	815.008,51
15,0 cm / tráfego médio	1.368.940,83	-	1.368.940,83
15,0 cm / tráfego pesado	1.368.940,83	97.245,50	1.466.186,33

De forma sintética, os resultados indicam que:

- O tempo até intervenção variou de 108 meses (5,1 cm – tráfego médio) a 18 meses (5,1 cm – tráfego pesado);
- O número de manutenções oscilou entre 1 e 5, aumentando com o tráfego e reduzindo com maiores espessuras;
- O custo total acumulado reforça a eficiência da selagem de trincas em tráfego médio, mas aponta limitações claras em cenários de tráfego intenso.

Essas constatações evidenciam que a selagem de trincas constitui uma alternativa de reabilitação eficiente em contextos específicos, mas insuficiente para tráfego pesado, onde soluções estruturais mais robustas se tornam indispensáveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam a importância da Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) para a avaliação técnico-econômica de projetos de pavimentação asfáltica, destacando o impacto da espessura de revestimento e das condições de tráfego no desempenho estrutural e nos custos acumulados ao longo do tempo.

As simulações realizadas no MeDiNa indicaram que , em cenários de tráfego médio, revestimentos mais delgados, como a de 5,1 cm, podem se manter de forma economicamente viáveis com a aplicação da selagem de trincas, apesar da necessidade de intervenções periódicas. Por outro lado, sob tráfego pesado, essa configuração mostrou-se inviável, sendo necessário a adoção de estruturas mais robustas para assegurar o desempenho satisfatório durante a vida útil projetada

Conclui-se, portanto, que a selagem de trincas constitui uma alternativa de reabilitação eficiente e economicamente vantajosa em contextos específicos, não substituindo, mas complementando outras formas de intervenção. Destaca-se que os resultados obtidos estão condicionados às hipóteses do modelo e ao banco

de dados utilizado, recomendando a realização de estudos futuros em diferentes condições de tráfego, clima e materiais. A utilização da ACCV em conjunto com metodologias mecanístico-empíricas mostra-se estratégica para subsidiar decisões mais eficazes na gestão da infraestrutura viária, conciliando aspectos técnicos e econômicos em diferentes cenários de projeto.

Agradecimentos
Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pela concessão de bolsa de pesquisa aos autores e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT. Programa de Exploração da Rodovia – PER: Anexo 2. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2014. Disponível em: https://portal.antt.gov.br. Acesso em: 5 jul. 2025.

Babashamsi, P.; N. I. Yusuff; H. Ceylan; N. G. M. Nor e H. S. Jenataadi (2016) Evaluation of pavement life cycle cost analysis: review and analysis, *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 9, n. 4, p. 241–54. DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.08.004

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Pesquisa CNT de Rodovias 2024 aponta a necessidade de reforço contínuo da infraestrutura rodoviária brasileira*. 2024. Disponível em: https://cnt.org.br/agencia-cnt/pesquisa-cnt-de-rodovias-2024-aponta-a-necessidade-de-reforco-continuo-da-infraestrutura-rodoviaria-brasileira. Acesso em: 30 set. 2025.

DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, 2006.(Publicação IPR-720)

DNIT (2017) *SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obras: Região Nordeste*. Brasília, DF: DNIT, 27 abr. 2017. Atualizado em: 25 mar. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/nordeste/nordeste. Acesso em: 10 jul. 2025.

Fritzen, M. A. (2016) Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. Tese (doutorado). Instituto Alberto Luiz Coimbra De Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Krishna, U. S. R. e Ch. N. S. Kumar (2025) A case study on maintenance of bituminous concrete pavement considering life cycle cost analysis and carbon footprint estimation. *International Journal of Construction Management*, v. 22, p. 1–9. DOI: 10.1080/15623599.2020.1742629

Kumari, M.; P. Gupta e S. S. Deshwal (2022) Integrated life cycle cost comparison and environment impact analysis of the concrete and asphalt roads. *Materials Today: Proceedings*, v. 60, n. 1, p. 345 –350. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.240

Lacerda, J. P. F.; Y. V. V. Dias; F. S. S. Costa; N. M. S. Batista e A. J. A. Ribeiro (2024) Concepção e validação de um modelo de regressão do módulo de resiliência de solos aplicado no dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 29, n. 3. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0220

Rodrigues, A. (2024) Uso do MeDiNa em soluções básicas de pavimentos asfálticos no Distrito Federal. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

Santiago, L. S. (2017) Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Teles, A. A.; L.; L. M. Prates Beltrão; A. T. Paiva; S. P. E. Fernandez e M. T. M. Carvalho (2023) Avaliação de ciclo de vida (ACV) e avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV) entre pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland por meio da quantificação do consumo energético e emissão de CO2. In Anais da 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) (Foz do Iguaçu, PR).

Vanessa Ferreira de Vasconcelos (vanessa.ferreiraeng@alu.ufc.br)
Ana Noemy Fernandes Moreira (noemyfernandes12@alu.ufc.br)
Flávio Santos Sousa Costa (flavio.santos@det.ufc.br)
Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DO TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS NOS MÉTODOS ANTP, GEIPOT E NEC

Isabela Wendpap de Carvalho, Murilo Colin da Silveira, Marcos Vinicius da Silva Gusmão, Tiago Camilo, Lara Reis Rodrigues, Antônio Clóvis Pinto "Coca" Ferraz
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO
O objetivo desse artigo é realizar uma análise comparativa dos custos operacionais do transporte público coletivo urbano por ônibus, utilizando os métodos ANTP, GEIPOT e NEC, aplicados a diferentes tipologias de veículos, considerando múltiplos cenários operacionais, visando contribuir para uma definição tarifária mais precisa e embasada tecnicamente. Foram analisados três tipos de ônibus (micro-ônibus, básico e articulado) e dois cenários de operação (baixa e alta quilometragem), além de diferentes taxas de remuneração do capital (10% e 20% ao ano). As planilhas de cálculo seguiram os parâmetros de cada método, respeitando seus conceitos e adaptações. Os resultados mostraram proximidade entre GEIPOT e NEC na maioria dos cenários, enquanto o método ANTP apresentou custos maiores, principalmente para quilometragens baixas e remuneração em torno de 10%. Assim, ao comparar os três métodos, que impactam o custo tarifário, a pesquisa oferece subsídios consideráveis para a gestão pública, corroborando com a hipótese de pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

Pesquisas evidenciam que a definição da tarifa envolve múltiplas variáveis econômicas e sociais, buscando equilibrar a viabilidade financeira do serviço e a acessibilidade econômica para os usuários (Asplund; Pydokke, 2019; Barabino *et al*., 2023; Xiong *et al*., 2025). Neste trabalho é apresentada uma comparação dos valores dos custos do transporte coletivo urbano por ônibus resultantes da aplicação dos métodos GEIPOT, ANTP e NEC, para distintos tipos de ônibus e diferentes cenários.

Em 1982, foi publicada a primeira edição do Método GEIPOT (sigla da empresa do Ministério dos Transportes onde ele foi desenvolvido) intitulada: "Instruções Práticas para Cálculo de Tarifas de Ônibus Urbanos". Em 1994, foi publicada uma versão atualizada da edição de 1982 denominada: "Cálculo de Tarifas de Ônibus Urbanos – Instruções Práticas Atualizadas" (GEIPOT, 1982); uma segunda edição desse documento foi publicada em 1996. Esse método, com eventuais adaptações, ainda é o mais utilizado no país, adotando uma estrutura tradicional, com base em custos médios fixos e variáveis, e considerando parâmetros padronizados e pouco sensíveis a variações operacionais (GEIPOT, 1982).

Em 2017, a Associação Nacional de Transporte Público (ANTP, 2017), publicou um novo método atualizado e detalhado para o cálculo dos custos e da tarifa do transporte público urbano, elaborado por equipe técnica especializada. O desenvolvimento desse método contou com o apoio da Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU). O método ANTP atualiza parâmetros operacionais e inclui a remuneração pela prestação do serviço, contemplando faixas de risco que impactam o resultado tarifário (ANTP, 2017).

Por sua vez, em 2022, o Núcleo de Estudos das Cidades (NEC), grupo de estudos que reúne professores da USP-São Carlos, da UFSCAR-São Carlos e da FATEC-Jaú, publicou uma primeira versão do Método denominado NEC (Ferraz *et al*., 2025). Agora, em 2025, foi lançada uma nova edição desse método revisto e aprimorado. O método NEC propõe uma abordagem ajustada à realidade operacional contemporânea, utilizando parâmetros proporcionais à quilometragem percorrida e contemplando custos atualizados, como bilhetagem eletrônica, GPS e sustentabilidade ambiental (Ferraz *et al*., 2025).

A partir dessa perspectiva, sabe-se que os métodos ANTP, GEIPOT e NEC representam diferentes técnicas de mensuração dos custos operacionais e definição da tarifa. Todavia, apesar da existência de trabalhos que realizam uma análise dos métodos da ANTP ou GEIPOT, verifica-se uma lacuna na literatura sobre estudos que comparem sistematicamente a eficácia de cada método e que sirvam de parâmetro para gestores públicos. Embora existam pesquisas que analisam tarifas considerando aspectos que poderiam ser incluídos no cálculo, tais como demanda, oferta, externalidades urbanas e variações regionais (Vigren; Ljungberg, 2018; Pyddoke; Swärdh, 2017; Basso; Silva, 2014; Tirachini *et al*., 2014), porém sem efetivar comparações entre os diferentes métodos existentes, no contexto nacional ou internacional.

Nesse contexto, o presente estudo parte da hipótese de que a análise comparativa das metodologias ANTP, GEIPOT e NEC gera resultados consideravelmente distintos no cálculo dos custos operacionais do transporte

coletivo urbano por ônibus, afetando diretamente a definição tarifária e o equilíbrio financeiro do sistema. O objetivo desse artigo é realizar uma análise comparativa dos custos operacionais do transporte público coletivo urbano por ônibus, utilizando os métodos ANTP, GEIPOT e NEC, aplicados a diferentes tipologias de veículos, considerando múltiplos cenários operacionais, visando contribuir para uma definição tarifária mais precisa e embasada tecnicamente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo, foram analisados três tipos de ônibus com tamanhos diferentes: micro-ônibus, ônibus básico e ônibus articulado. Todos os ônibus foram admitidos ter idade de 4 anos e a frota suposta constituída de 100 ônibus, sendo 90 em operação e 10 de reserva. Foram considerados os seguintes dois cenários no tocante à quilometragem percorrida: baixa quilometragem (3.000 km/mês/ônibus– 300.000 km/ mês considerando frota total) e alta quilometragem (6.000 km/mês/ônibus – 600.000 km/mês considerando frota total). Valores na faixa de 3.000 km/mês/ônibus são atualmente observados em diversas cidades; valores na faixa de 6.000 km/mês/ônibus são mais comuns. Também foram analisados dois valores distintos no que diz respeito à taxa de remuneração do capital: 10% ano e 20% ao ano. Dessa forma, para cada tipo de ônibus foram geradas 12 planilhas – 36 planilhas no total.

Em todas as situações foram admitidos os seguintes valores: frota total de 100 ônibus, frota operante de 90 ônibus (10 de reserva), preço do litro de combustível é R$6,00/l, preço do ARLA 32 é R$2,00/l, taxa SELIC média igual a 12% (últimos 24 meses), IPCA médio igual a 5% (últimos 24 meses), salário do motorista e do fiscal igual a R$ 3.000,00/mês, benefício igual a R$ 500,00/mês/funcionário, remuneração da diretoria igual a R$ 1.000,00 R$/mês/ônibus e seguro mais licenciamento igual a R$ 500,00/mês/ônibus. Seguem outros valores adotados no estudo. Na Tabela 1, estão relacionados os custos unitários e outros valores correspondentes a cada um dos tipos de ônibus. Na Tabela 2, valores de diversos parâmetros associados aos diversos cenários.

Tabela 1: Custos unitários associados a cada tipo de ônibus.

Tipo de ônibus	Microônibus	Ônibus básico	Articulado
Custo veículo (R$)	450.000,00	850.000,00	1.350.000,00
Custo pneu (R$)	1.200,00	2.200,00	2.700,00
Custo reforma pneu (R$)	400,00	700,00	900,00
Consumo de combustível (l/km)	0,25	0,40	0,73
Vida útil (anos)	5	8	12
Valor residual (%)	20	15	5

Tabela 2: Valores de diversos parâmetros correspondentes a cada cenário.

Cenário	1	2
Quilometragem mensal (km/mês)	300.000 (baixa)	600.000 (alta)
Fator de utilização motorista (motoristas/veículo no pico)	1,8	2,8
Fator de utilização fiscal (fiscais/veículo no pico)	0,18	0,28
Fator de utilização total (funcionários/veículo no pico)	2,6	4,0

Para os demais parâmetros necessários para o cálculo, foram admitidos os valores médios dos intervalos de variação mencionados em cada um dos métodos.

No caso do Método ANTP, devido às suas características peculiares, foram feitas as seguintes simplificações: no custo denominado Lubrificantes foram adicionados os custos ARLA 32 e Ambiental (ambos têm valores de pequena monta); o custo total de Depreciação foi adotado igual ao custo de depreciação de veículos do método GEIPOT multiplicado por 1,4 (valor médio obtido considerando os exemplos apresentados na publicação do Método ANTP); o custo total de Remuneração foi calculado com a mesma equação utilizada no Método NEC empregando a taxa de juros real (sugerida no Método ANTP igual à taxa SELIC menos a metade do valor médio do IPCA – ambos os valores relativos aos últimos 24 meses).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo dos custos nos três métodos (GEIPOT, NEC e ANTP) foram utilizadas planilhas eletrônicas

disponíveis na Internet. A título de exemplo, na Tabela 3 são apresentados os resultados dos custos desagregados e total dos três métodos para o caso de ônibus tipo básico considerando quilometragem de 300.000 km/mês e taxa de remuneração do capital de 10% ao ano.

Tabela 3: Custos desagregados e total para ônibus básico, quilometragem de 300.000 km/mês e taxa de remuneração do capital de 10% ao ano.

Custos		Método GEIPOT	Método NEC	Método ANTP
Combustível		720.000,00	720.000,00	720.000,00
Lubrificantes		90.000,00	50.400,00	66.154,17*
Rodagem		67.710,00	67.714,29	67.714,29
Peças e Acessórios		443.700,00	229.500,00	637.500,00
Depreciação		667.092,59	674.333,33	684.936,29
Remuneração		328.748,15	323.000,00	306.850,00
Pessoal		1.184.839,84	1.144.627,37	1.205.722,99
Despesas Administrativas		262.500,00	340.000,00	306.000,00
Total 1		3.764.590,58	3.549.574,99	3.994.877,74
Remuneração Serviços Prestados**	Risco baixo	----------	----------	200.542,86
	Risco médio			292.025,56
	Risco alto			479.385,33
Total 2	Risco baixo	----------	----------	4.125.420,60
	Risco médio			4.286.903,30
	Risco alto			4.474.263,07
Tributos	Risco baixo	61.212,86	57.716,67	68.218,22
	Risco médio			69.705,74
	Risco alto			72.752,25
Custo Mensal (R$/mês)	Risco baixo	3.825803,44	3.607291,65	4.263.638,82
	Risco médio			4.356.609,04
	Risco alto			4.547.015,32
Custo por quilômetro (R$/km)	Risco baixo	12,75	12,02	14,21
	Risco médio			14,52
	Risco alto			15,16

*Inclui os custos do Arla-32 e ambientais.
**Acréscimos no custo total: risco baixo = 5,02%, risco médio = 7,31% e risco alto = 12,00%.

Na Tabela 4, estão relacionados os valores obtidos do custo por quilômetro percorrido em todos os casos analisados.

Tabela 4: Custo por quilômetro (R$/km) em todos os casos*.

Método		300.000 km/mês		600.000 km/mês	
		10% aa	20% aa	10% aa	20% aa
GEIPOT		8,42/12,75/17,41	8,74/13,66/19,23	6,21/8,88/12,34	6,37/9,34/13,25
NEC		8,39/12,02/17,26	8,88/13,12/19,29	6,35/8,89/12,94	6,60/9,44/13,96
ANTP (risco)	**Baixo**	10,82/14,21/20,42	10,82/14,21/20,42	7,41/9,80/12,91	6,88/9,80/12,91
	Médio	11,06/14,52/20,86	11,06/14,52/20,86	7,57/10,01/13,20	7,03/10,01/13,20
	Alto	11,54/15,16/21,78	11,54/15,16/21,78	7,90/10,45/13,77	7,33/10,45/13,77
Relação valores ANTP/NEC	**Baixo**	1,29/1,18/1,18	1,22/1,08/1,06	1,17/1,10/1,00	1,04/1,04/0,92
	Médio	1,32/1,21/1,21	1,25/1,11/1,08	1,19/1,13/1,02	1,06/1,06/0,95
	Alto	1,38/1,26/1,26	1,30/1,16/1,13	1,24/1,18/1,05	1,11/1,11/0,99

* Valores apresentados na seguinte sequência: micro-ônibus / ônibus básico / ônibus articulado.

Na Tabela 3 (ônibus básico, 3.000 km/mês/ônibus e remuneração de 10%), observa-se que os custos de maior monta têm valores próximos nos três métodos (pessoal, combustível, depreciação, remuneração), além de rodagem.

Como o custo de Peças e Acessórios é considerado fixo e estimado para quilometragens de 7.500 km/mês/ônibus em relação à frota operante no Método GEIPOT e 6.500 km /mês/ônibus em relação à frota

total no Método ANTP, ele resulta superestimado para quilometragem de 3.000 km/mês/ônibus em relação à frota total; o que não acontece no Método NEC, pois ele é estimado em função da quilometragem percorrida. Outro ponto é que no Método ANTP esse custo é estimado com base no custo do ônibus do tipo Básico, o que leva a valores superdimensionados para Micro-ônibus e subdimensionados para ônibus Articulado.

O custo denominado Despesas Administrativas é maior no Método NEC, uma vez que inclui os custos adicionais da bilhetagem eletrônica, GPS, ar condicionado, câmeras de vigilância, gastos ambientais, etc., que não são considerados no Método GEIPOT (não "existiam" na época em que o Método foi elaborado). No Método ANTP, esses valores se aproximam aos do NEC por também incluírem os custos adicionais mencionados. A principal diferença está no composto ARLA-32: o ANTP considera o valor do litro de óleo como referência, enquanto o NEC o calcula com base na quilometragem percorrida. O custo referido como Lubrificantes é estimado em função do gasto com combustível no NEC e, nos outros dois métodos, apenas em função do custo do litro de óleo diesel – o que resulta na incongruência do custo ser igual para todos os tipos de ônibus; essa forma de cálculo leva a valores superdimensionados do custo desse item, em especial no GEIPOT.

A soma desses três custos com valores "divergentes" para quilometragem de 3.000 km/mês é de: R$796.200,00 no Método GEIPOT, R$ 619.900,00 no Método NEC e R$1.009.504,29 no Método ANTP.
Para quilometragem de 6.000 km/mês/ônibus, a diferença nos valores do custo de Peças e Acessórios passa a ser pequena, pois a quilometragem se aproxima daquelas utilizadas para a estimativa desse custo nos métodos GEIPOT e ANTP. Os valores do custo de Despesas Administrativas permanecem os mesmos, pois são estimados em função do tamanho da frota. O custo de Lubrificantes cresce proporcionalmente a quilometragem, portanto dobra quando a quilometragem passa de 3.000 km/mês/ônibus para 6.000 km/mês/ônibus.

A soma desses três custos com valores "divergentes" para quilometragem de 6.000 km/mês é de: R$ 886.200,00 no Método GEIPOT, R$ 899.000,00 no Método NEC e R$ 1.066.954,17 no Método ANTP.
Como os valores dos custos de maior monta são próximos e a soma dos valores dos custos de Peças e Acessórios, Lubrificantes e Despesas Administrativas resultam não muito diferentes, os valores do custo total por quilômetro em cada caso (tipo de ônibus, quilometragem e taxa de remuneração) são muito próximos nos métodos GEIPOT e NEC, como se pode constatar na Tabela 4. A diferença média é de 2,59% e a máxima de 6,07%.

No Método ANTP, no qual é aplicada a taxa denominada Remuneração pela Prestação dos Serviços sobre o valor total dos custos, a situação varia em cada caso. Na Tabela 4 estão indicadas as relações entre os valores do custo por quilômetro no Método ANTP para cada um dos três cenários (risco baixo, médio e alto) e os valores do método NEC.

De maneira geral, observa-se que os valores do Método ANTP são maiores que no Método NEC no caso da quilometragem de 3.000/km/mês/ônibus em relação à quilometragem de 6.000 km/mês/ônibus. Nas duas situações, constata-se que a relação diminui (os valores do Método ANTP se aproximam dos valores do Método NEC) quando a remuneração passa de 10% para 20%. No cenário com quilometragem de 6.000/km/mês/ônibus e remuneração de 20%, em alguns casos os valores do custo por quilômetro é menor no Método ANTP que no Método NEC.

Ainda que o universo analisado seja bastante restrito, os resultados obtidos sinalizam que os métodos GEIPOT e NEC apresentam resultados próximos em qualquer cenário. O método ANTP apresenta resultados significativamente maiores que os dos outros dois métodos para quilometragens baixas e remuneração em torno de 10% e resultados pouco maiores para quilometragens altas e taxas de remuneração em torno de 20%; nessa última situação, em alguns casos, até mesmo menores.

4. CONCLUSÕES

A pesquisa comparou os métodos GEIPOT, ANTP e NEC para cálculo dos custos operacionais no transporte coletivo urbano por ônibus, considerando diferentes tipos de veículos e cenários operacionais. Os resultados indicam coerência com a hipótese inicial do estudo, demonstrando que a aplicação dessas metodologias gera resultados discrepantes, os quais afetam diretamente a definição tarifária e o equilíbrio financeiro do sistema. Enquanto os métodos GEIPOT e NEC apresentaram resultados similares, o método ANTP se destacou com

diferenças consideráveis, especialmente em cenários de baixa quilometragem e menor taxa de remuneração do capital.

Uma limitação relevante da pesquisa reside em um número restrito de cenários considerados, para a viabilização da execução do trabalho. Ainda assim, o trabalho preenche uma lacuna na literatura ao realizar comparações sistemáticas entre métodos tarifários geralmente aplicados no contexto brasileiro, contribuindo para debates sobre a padronização e aprimoramento dessas abordagens na literatura.

Ademais, os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para gestores públicos e privados do setor de transporte público coletivo urbano por ônibus ao identificar as implicações práticas e financeiras das diferenças metodológicas analisadas. Ao evidenciar claramente como essas variações afetam o custo tarifário, a pesquisa colabora diretamente para tomada de decisão técnica mais embasada, potencializando melhorias na eficiência operacional, sustentabilidade econômica e maior acessibilidade aos usuários desse meio de transporte em questão.

Agradecimentos
Essa pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Processos 88887.154799/2025-00 e 88887.151298/2025-00 – e com o apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processos 130950/2025-4 e 133266/2025-7. O presente trabalho foi também realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil – Processo nº 2024/10673-7.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTP (2017) *Custos e tarifas dos serviços de transporte público urbano: metodologia de cálculo*. São Paulo: Associação Nacional de Transportes Públicos / Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos.

Asplund, D. e R. Pyddoke (2019) Optimal fares and frequencies for bus services in a small city. *Research in Transportation Economics*, v. 76, p. 100796. DOI: 10.1016/j.retrec.2019.100796.

Barabino, B.; M. Di Francesco e R. Ventura (2023) Evaluating fare evasion risk in bus transit networks. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 20, p. 100854. DOI: 10.1016/j.trip.2023.100854.

Basso, L. J.; H. E. Silva (2014) Efficiency and substitutability of transit subsidies and other urban transport policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, v. 6, n. 4, p. 1–33. DOI: 10.1257/pol.6.4.1.

GEIPOT (1994) *Cálculo de tarifas de ônibus urbanos: instruções práticas atualizadas*. 2. ed. Brasília: Ministério dos Transportes, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. Atualização: 1996.

GEIPOT (1982) *Instruções práticas para cálculo de tarifas de ônibus urbanos*. 1. ed. Brasília: Ministério dos Transportes, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes

Ferraz, A. C. P.; F. H. Hirosue; M. N. P. V. Romão; C. Zanella e H. V. Alves (2025) *Método NEC para cálculo dos custos e da tarifa do transporte coletivo urbano por ônibus*. São Carlos, SP: RIMA Editorial. 54 p. ISBN: 978-65-84811-82-9.

Pyddoke, R.; J.-E. Swärdh (2017) *The influence of demand incentives in public transport contracts on demand and costs in medium sized Swedish cities*. K2 Working Paper, n. 2017.

Tirachini, A.; D. A. Hensher; J. M. Rose (2014) Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: The interplay between traffic congestion and bus crowding. *Transportation Research Part B*, v. 61, p. 33–54.

Vigren, A.; A. Ljungberg (2018) Public transport authorities' use of cost-benefit analysis in practice. *Research in Transportation Economics*, v. 69, p. 560–567. DOI: 10.1016/j.retrec.2018.06.001. ISSN 0739-8859.

Xiong, J.; Z. Cheng; S. Yang e B. Ran (2025) Optimal on-demand bus operation with passenger split and time window flexibility under fare incentives. *Expert Systems With Applications*, v. 280, p. 127647. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127647.

Isabela Wendpap de Carvalho (iwcarvalho@usp.br)
Murilo Colin da Silveira (murilocolin@usp.br)
Marcos Vinícius da Silva Gusmão (marcos.gusmao@usp.br)
Tiago Camilo (tiago.camilo@usp.br)
Lara Reis Rodrigues (larareisrodrigues@usp.br)
Antônio Clóvis Pinto "Coca" Ferraz (coca@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, São Carlos, SP, Brasil.

CONCESSÃO E RELICITAÇÃO DE AEROPORTOS BRASILEIROS: UM OLHAR SOBRE NATAL E VIRACOPOS

Daniel Victor Tavares Lopes, Arthur Alves Bastos, Bruno Delfim Carmo Dias, Anna Carolina Corrêa Pereira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

RESUMO
Este artigo aborda os processos de devolução antecipada das concessões dos aeroportos internacionais de Natal e Viracopos, concedidos à iniciativa privada no contexto da política nacional de parcerias público-privadas. A pesquisa fundamenta-se nas manifestações das concessionárias, análise documental de estudos de mercado e relatórios oficiais, com o intuito de compreender os fatores estruturais envolvidos nos pedidos de rescisão contratual. Os resultados indicam que a superestimação da demanda e a discrepância tarifária foram fatores-chave nos pedidos de devolução. No Aeroporto de Natal, a demanda ficou consistentemente abaixo do projetado, e as tarifas de embarque foram as menores entre os aeroportos analisados. Da mesma forma, em Viracopos, a demanda real em 2016 atingiu apenas 60,90% do valor estimado, reforçando a alegação da concessionária sobre a superestimação das projeções iniciais.

1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo é o meio mais eficiente para longas distâncias, sendo essencial para a integração de países de dimensões continentais como o Brasil. Para garantir sua eficiência, é necessária uma infraestrutura robusta, capaz de atender à crescente demanda de passageiros e cargas.

A evolução do setor aeroportuário brasileiro, que teve seu início com o transporte aéreo comercial em 1920, inicialmente dominado por operações militares e posteriormente por empresas estrangeiras, têm se transformado significativamente ao longo das décadas. Atualmente, o modelo de gestão predominante se baseia em concessões à iniciativa privada, refletindo o ideal neoliberal de atuação indireta do Estado na economia. Apesar de essa liberalização ter impulsionado o dinamismo do setor e criado mecanismos de financiamento, ela ainda não resolveu todos os desafios do transporte aeroportuário no país (Oliveira; Bagnoli, 2024).

Nesse contexto, entre 2003 e 2010, a demanda global por transporte aéreo cresceu 40%, enquanto no Brasil o aumento foi de 118% (ANAC, 2011a). Esse cenário de expansão evidenciou a urgência por investimentos na modernização dos aeroportos brasileiros, ainda mais intensificada pela escolha do país como sede da Copa de 2014 e dos Jogos Olímpicos de 2016 (Evina, 2016). Como resposta, o governo federal adotou o modelo de concessões aeroportuárias, delegando à iniciativa privada, por meio de leilões, a operação e desenvolvimento de aeroportos, com a possibilidade de participação da Infraero em até 49% do capital (ANAC, 2011a).

O Aeroporto Internacional de Natal (NAT) foi o primeiro a ser concedido, em 2011, como projeto-piloto para o novo modelo (ANAC, 2011b). O consórcio Inframérica e Engevix venceu a disputa com uma oferta de R$ 170 milhões e ágio de 229% (Longo; Fonseca, 2022; Machado et al., 2019), construindo o NAT para modernizar a infraestrutura e substituir o antigo Aeroporto Augusto Severo (Silva, 2016). Na rodada seguinte, em 2012, o Aeroporto Internacional de Viracopos (VCP) foi concedido ao Consórcio Aeroportos Brasil por R$ 3,82 bilhões, com ágio de 159,7% (Machado et al., 2019). Ambos os aeroportos enfrentaram dificuldades e entraram em processo de relicitação. O NAT foi relicitado em maio de 2023, enquanto o VCP ainda aguarda a conclusão do processo (ANAC, 2020; 2023).

Diante desse contexto, este estudo buscou responder à seguinte pergunta: os processos de devolução das concessões dos aeroportos de Natal e Viracopos apresentam elementos em comum que permitam compreender os fatores estruturais que levaram ao encerramento precoce dos contratos? Assim, analisaram-se os documentos da licitação, os argumentos das concessionárias e as etapas administrativas, visando identificar padrões e estratégias para mitigar o risco de novas devoluções de concessões aeroportuárias.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo; o Capítulo 3 delimita-se à análise dos argumentos apresentados pela concessionária Inframérica e Engevix quanto à devolução do Aeroporto Internacional Governador Aluízio

Alves, em Natal, no Estado do Rio Grande do Norte; o Capítulo 4 descreve as principais características do processo de devolução do Aeroporto de Viracopos, em Campinas, no Estado de São Paulo, bem como suas respectivas análises. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, respondendo de forma objetiva à pergunta norteadora da pesquisa.

2. METODOLOGIA

Para responder à pergunta que orienta esta pesquisa, a coleta de dados baseou-se em documentos referentes às licitações dos aeroportos internacionais de Natal (NAT) e de Campinas (VCP). O estudo teve como ponto de partida a análise de matérias jornalísticas publicadas pelo portal G1 do Rio Grande do Norte (2023) e pela revista Veja (2017), as quais registram pronunciamentos das concessionárias responsáveis pelos aeroportos em questão, explicitando as razões apresentadas para o encerramento antecipado do contrato de concessão.

Após esta primeira análise, foram verificados, para ambos os aeroportos, os documentos e os websites a seguir: (i) *Relatórios 2 e 1 – Estudo de Mercado* (ANAC, 2010; ANAC, 2011c), documento fundamental na etapa de planejamento e modelagem da concessão, cujo objetivo é compreender a demanda atual e futura por serviços aeroportuários. Este relatório fornece as bases para estimar a viabilidade econômica e comercial do aeroporto a ser concedido, além de orientar a elaboração do edital e do contrato de concessão (BRASIL, 2020); (ii) o website Hórus (BRASIL, 2025), desenvolvido pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), como ferramenta de apoio à coleta e análise de dados; e (iii) o website da ANAC onde foram coletados dados tarifários.

Como cada aeroporto passou pelo processo de relicitação em períodos diferentes, o período de coleta de dados para cada um deles foi diferenciado. No caso do Aeroporto Internacional Governador Aluízio Alves (NAT), os dados utilizados para a análise tarifária referem-se aos anos de 2019 e/ou 2020, por estarem próximos à solicitação de devolução antecipada da concessão pela concessionária, conforme apresentado no item 3.1. A análise da demanda de passageiros abrange o período de 2014 a 2019, por dois motivos principais: o início das operações domésticas e internacionais do aeroporto em 2014 (Brasil, 2014) e o fato de 2019 representar o último ano completo de gestão da Inframérica antes da formalização da devolução em 2020 (G1, 2023), conforme exposto no item 3.2.

Quanto ao Aeroporto Internacional de Viracopos (VCP), a análise da demanda de passageiros projetada e real concentrou-se no período de 2013 a 2016, em razão da ausência de projeções detalhadas para os anos posteriores. Ainda assim, a limitação temporal não comprometeu a consistência e a clareza dos resultados, apresentados no item 4.1.

Após a análise dos documentos, este estudo visou verificar a veracidade dos argumentos apresentados pelas concessionárias como justificativa para a devolução antecipada dos aeroportos. Em seguida, buscou-se identificar os pontos em comum entre esses argumentos, para responder à pergunta norteadora do artigo e propor sugestões de melhorias para a mitigação do risco de novas relicitações no setor aeroportuário.

3. AEROPORTO INTERNACIONAL GOVERNADOR ALUÍZIO ALVES

Conforme mencionado, o NAT foi o primeiro terminal aeroportuário brasileiro a ser concedido à iniciativa privada, representando um marco nas concessões aeroportuárias nacionais (ANAC, 2011b). No entanto, após oito anos de operação, iniciando-se em 2012, sob a administração da Inframérica e Engevix, a concessionária solicitou, em 2020, a rescisão antecipada do contrato de concessão (G1, 2023).

Após a análise da reportagem do G1 Rio Grande do Norte (2023), foram identificados dois fatores indicados pela concessionária do NAT como motivadores do pedido de devolução: (i) a defasagem das tarifas de embarque em relação a outros aeroportos concessionados no país e (ii) a demanda de passageiros significativamente inferior à projetada no momento da concessão. Os argumentos e as comparações são apresentados nos itens 3.1 e 3.2.

3.1. Tarifas de embarque

Com o objetivo de avaliar a consistência do argumento apresentado pela Inframérica e Engevix — de que uma das justificativas para a devolução antecipada da concessão estaria relacionada aos valores das tarifas de

embarque doméstico e internacional, supostamente inferiores aos praticados nos demais aeroportos concedidos do país (G1, 2023), foram comparadas as tarifas de embarque doméstico de outros três aeroportos do Brasil com porte semelhante ao do NAT. A escolha para comparação se baseou no critério de classificação de porte da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Conforme a regulamentação RBAC 107 (ANAC, 2025), os aeródromos são segmentados pelo volume de passageiros, justificando a seleção de terminais que se enquadram em uma faixa intermediária de movimento, distinta dos grandes hubs nacionais. Os resultados obtidos encontram-se sistematizados na **Tabela 1**.

Tabela 1: Quadro comparativo das tarifas de embarque doméstico e internacional

Região	Aeroporto	Rodada de concessão	Doméstico (R$)	Internacional (R$)	Data dos dados
Nordeste	Aeroporto Governador Aluízio Alves (NAT)	1ª	23,14	106,76	28/05/2019
Nordeste	Aeroporto Internacional de Salvador – Luís Eduardo Magalhães (SSA)	4ª	32,42	128,44	17/08/2020
Sul	Aeroporto Internacional de Florianópolis – Hercílio Luz (FLN)	4ª	33,37	130,13	17/08/2020
Sul	Aeroporto Internacional de Porto Alegre – Salgado Filho (POA)	4ª	32,95	129,37	17/08/2020

Conforme os dados apresentados, verifica-se que, entre os aeroportos selecionados para a análise, o NAT apresentou os menores valores de tarifas de embarque tanto para voos domésticos quanto internacionais, correspondendo a R$ 23,14 e R$ 106,76, respectivamente. Esses valores representam uma diferença de R$ 9,54 (doméstico) e R$ 22,14 (internacional) em relação à média das tarifas praticadas nos demais aeroportos analisados.

3.2. Demanda de passageiros

Entre os principais argumentos apresentados pela concessionária responsável pela administração do NAT, destacou-se a alegação de que a demanda real de passageiros ficou significativamente abaixo daquela projetada originalmente, o que teria contribuído para a solicitação de devolução antecipada da concessão (G1, 2023). Para verificar a consistência dessa justificativa, foram utilizados os dados de demanda projetada constantes do *Relatório 2 – Estudo de Mercado*. Os dados referentes à demanda real foram obtidos por meio da plataforma Hórus (Brasil, 2025), possibilitando a comparação entre os valores previstos e os efetivamente observados. Os resultados dessa comparação estão sintetizados na **Tabela 2**.

Tabela 2: Demanda de passageiros no Aeroporto de Natal: Planejado x Real (em milhões)

Ano	Planejado	Real	Diferença	Percentual (%)
2014	2,93	1,59	1,35	54,09
2015	3,17	2,58	0,59	81,33
2016	3,44	2,31	1,13	67,18
2017	3,72	2,39	1,33	64,21
2018	4,03	2,42	1,61	60,00
2019	4,37	2,32	2,05	53,05

A análise dos dados revela uma discrepância significativa entre a demanda projetada no leilão de 2011 e a demanda efetivamente observada, indicando uma superestimação nas previsões iniciais. Em 2015, a demanda real foi a que mais se aproximou da projetada, correspondendo a 81,33%. Nos demais anos analisados, no entanto, a demanda permaneceu abaixo de 70% do estimado, com destaque para os anos de 2014 e 2019. Em 2014, o movimento de passageiros foi de 1,59 milhão (54,09% do projetado), justificado pela operação ter iniciado apenas em junho. Já em 2019, a demanda foi de 2,32 milhões (53,05% da projeção), influenciada por fatores macroeconômicos que afetaram o setor aéreo, como a desaceleração econômica, oscilações no câmbio e variações no preço do combustível (ABEAR, 2020). Apesar dessas questões conjunturais, a discrepância entre a demanda projetada e a demanda efetivamente observada ao longo dos anos analisados reforça a alegação da concessionária de que a superestimação da demanda constituiu um dos principais fundamentos para a solicitação de devolução antecipada da concessão.

4. AEROPORTO INTERNACIONAL DE VIRACOPOS

Viracopos se destaca como um *hub* complementar de transporte de passageiros, especialmente relevante para a Região Metropolitana de São Paulo, diante da saturação estrutural do Aeroporto Internacional de Guarulhos e das restrições à sua expansão física (Ministério da Infraestrutura, 2012). Essa condição conferiu ao aeroporto prioridade na política nacional de concessões aeroportuárias.

Em 2012, Viracopos foi incluído na 2ª rodada do Programa de Concessões Aeroportuárias da ANAC, um marco regulatório que visou atrair investimentos privados para modernização e ampliação da infraestrutura, com o aeroporto escolhido por sua elevada demanda de passageiros e cargas, bem como pela necessidade de investimentos em sua estrutura. A concessão foi concedida ao consórcio Aeroportos Brasil Viracopos (ABV) (ANAC, 2011b). Entretanto, em 2020, a concessionária protocolou o pedido de devolução antecipada da concessão do VCP, encerrando prematuramente o contrato originalmente previsto para vigorar por 28 anos. O motivo indicado pela concessionária para esse encerramento prematuro diz respeito à superestimação da demanda de passageiros no momento do leilão de concessão, ponto este de análise deste estudo (Veja, 2017).

4.1 Demanda de passageiros

A concessionária Aeroportos Brasil Viracopos (ABV), solicitou a devolução antecipada da outorga, alegando, entre os principais motivos, que a demanda projetada no leilão realizado em 2012 havia sido superestimada, sendo a demanda real observada substancialmente inferior à prevista (Veja, 2017). Os resultados comparativos estão apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3: Demanda de passageiros no Aeroporto de Viracopos: Planejado x Real (em milhões)

Ano	Planejado	Real	Diferença	Percentual (%)
2013	10,89	9,30	1,59	85,40
2014	12,45	9,85	2,65	78,71
2015	13,83	10,50	3,33	75,92
2016	15,27	9,30	5,97	60,90

A análise dos dados evidencia uma discrepância significativa entre a demanda projetada no leilão de 2012 e a demanda efetivamente observada, indicando uma superestimação nas previsões originais. Um exemplo expressivo dessa divergência é verificado no ano de 2016, quando a projeção indicava um volume de 15,27 milhões de passageiros, enquanto o número real de embarques e desembarques totalizou apenas 10,1 milhões, correspondendo a 60,90% do valor estimado. Esses resultados corroboram a alegação da concessionária Aeroportos Brasil Viracopos (ABV) quanto à superestimação da demanda como um dos fundamentos para a solicitação de devolução antecipada da concessão.

5. CONCLUSÃO

Para concluir este estudo e responder à pergunta norteadora — os processos de devolução das concessões dos aeroportos de Natal (NAT) e Viracopos (VCP) apresentam elementos em comum que permitem compreender os fatores estruturais que levaram ao encerramento precoce dos contratos? Verifica-se que os aeroportos de Natal e Campinas apresentaram similaridades nas justificativas fornecidas pelas concessionárias para a devolução antecipada das concessões. Em ambos os casos, observou-se uma superestimação da demanda, decorrente de projeções inadequadas, reflexo de um extremo otimismo no momento da realização dos leilões e das fragilidades na modelagem das primeiras concessões. Essa situação foi agravada pela crise econômica e política que reduziu o número de passageiros e afetou a capacidade financeira das concessionárias, tornando os altos ágios e investimentos insustentáveis, como evidenciado pelo caso de Viracopos (Machado et al., 2019). Essa situação resultou em uma expressiva discrepância entre os volumes previstos e os efetivamente realizados. Além disso, no caso do NAT, constatou-se que, nos anos de 2019 e 2020, as tarifas de embarque aplicadas estavam abaixo daquelas praticadas nos demais aeroportos já concedidos, o que agravou o desequilíbrio econômico-financeiro. Diante disso, este estudo recomenda-se que, na formulação e modelagem dos futuros processos de concessão, especialmente no que se refere aos dados operacionais, sejam adotados cenários considerando diferentes perspectivas, desde as mais otimistas às mais pessimistas, permitindo que o concessionário tenha visão das várias possibilidades que a concessão possa prosseguir, a fim de mitigar os riscos de encerramento precoce dos contratos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Dúvidas sobre as concessões?. 2011a. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2011/duvidas-sobre-as-concessoes. (acesso em: 15/05/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Informações sobre o processo licitatório - 1° rodada. 2011b. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/concessoes/aeroportos-concedidos/natal/documentos-relacionados/audiencia-asga. (acesso em: 26/05/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Informações sobre o processo licitatório - 2° rodada. 2011c. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/concessoes/aeroportos-concedidos/jk/audiencia-publica-DF_SP_SP. (acesso em: 26/05/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Classificação AVSEC dos Aeródromos. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aeroportos-e-aerodromos/avsec/operador-aeroportuario/classificacao-dos-aerodromos. (acesso em: 10/09/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Relicitação do Aeroporto de São Gonçalo do Amarante. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/concessoes/relicitacao-do-aeroporto-de-sao-goncalo-do-amarante-rn. (acesso em: 20/05/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Relicitação do Aeroporto de Viracopos. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/concessoes/relicitacao-do-aeroporto-de-viracopos. (acesso em: 01/06/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Tarifas aeroportuárias de Porto Alegre, Fortaleza, Salvador e Florianópolis são reajustadas. Brasília, DF, 28 ago. 2020. Disponível em: em: https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2020/tarifas-aeroportuarias-de-porto-alegre-fortaleza-salvador-e-florianopolis-sao-reajustadas. (acesso em: 22/05/2025).

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Tarifas aeroportuárias do aeroporto de São Gonçalo do Amarante são atualizadas. Brasília, DF, 30 mai. 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2019/tarifas-aeroportuarias-do-aeroporto-de-sao-goncalo-do-amarante-sao-atualizadas. (acesso em: 22/05/2025).

Associação Brasileira de Empresas Aéreas (ABEAR). Panorama 2019 do Transporte Aéreo. São Paulo: ABEAR, 2020. Disponível em: https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Panorama2019.pdf. (acesso em: 10/09/2025).

Brasil. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). Edital CPE n° 5/2020 e Anexo II - Metodologia de Avaliação e Seleção dos Estudos Técnicos. Brasília: PPI, 2020.

Brasil. Secretaria Nacional de Aviação Civil. Movimentação - Desempenho. Hórus: Gerencial. 2025: LabTrans/UFSC. Disponível em: https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/. (acesso em: 11/06/2025).

Brasil. Secretaria Nacional de Aviação Civil. Relatório do 2° trimestre de 2014. Brasília, DF, 2014. 23 f. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/centrais-de-conteudo/relatorio-do-2o-trimestre-de-2014.pdf. (acesso em: 17/06/2025).

Evina, R. B. E. (2016) Teoria dos Contratos Incompletos e Parcerias Público-Privadas: uma aplicação para concessões aeroportuárias no Brasil. 72 f. Monografia (Bacharelado em Direito) - Universidade de Brasília, Brasília.

G1. Aeroporto de Natal, primeiro privatizado do país, será relicitado nesta sexta-feria (19) pela Anac. Rio Grande do Norte. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2023/05/18/aeroporto-de-natal-primeiro-privatizado-do-pais-sera-relicitado-nesta-sexta-feira-19-pela-anac.ghtml. (acesso em: 12/06/2025).

Longo, D. R. (2019) A evolução recente do modelo de concessão aeroportuária sob a ótica da financiabilidade. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 50, p. 45-88.

Machado, B. V. Z. et al. (2019) A evolução recente do modelo de concessão aeroportuária sob a ótica da financiabilidade. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 50, p. 45-88.

Ministério da Infraestrutura. Programa de Investimentos em Logística - Rodada de Concessões Aeroportuárias 2012. Brasília: Governo Federal, 2012.

Oliveira, J. S; Bagnoli. V (2024) Concessão e regulação: desafios ao desenvolvimento da infraestrutura aeroportuária brasileira. Revista Argumentum, Marília/SP, v. 25, n. 2, p. 167-190.

Silva, L. F. O. (2016) Mobilidade Urbana e Projetos Estruturantes na Região Metropolitana de Natal: desafios recentes a uma metrópole em transformação. 2016. 156 f. Dissertação (Mestrado em Estudos Urbanos e Regionais) – Programa de Pós-Graduação em Estudos Urbanos e Regionais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Veja. Acionistas decidem devolver aeroporto de Viracopos ao governo. São Paulo, 28 jul. 2017. Disponível em: https://veja.abril.com.br/economia/acionistas-decidem-devolver-aeroporto-de-viracopos-ao-governo/. (acesso em: 02/06/2025).

Daniel Victor Tavares Lopes (daniellopesvictor17@gmail.com) *Arthur Alves Bastos* (al_arthur@outlook.com) *Bruno*

Delfim Carmo Dias (brunodelfimcd@gmail.com) *Anna Carolina Corrêa Pereira* (annapereira@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus I – Belo Horizonte, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, e Brasil

CONCESSÕES AEROPORTUÁRIAS EM FORTALEZA, RECIFE E SÃO GONÇALO DO AMARANTE: ESTRUTURA CONTRATUAL E IMPLICAÇÕES REGULATÓRIAS

Nakita Naiades Nascimento de Souza[1], **Gustavo Viana de Sousa Barbosa**[1], **Viviane Adriano Falcão**[1]
[1]Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
O artigo analisa o desempenho de três concessões aeroportuárias no Brasil: Fortaleza (FOR), Recife (REC) e São Gonçalo do Amarante (NAT), com ênfase na relação entre estrutura contratual, desempenho operacional e capacidade de resposta institucional. A abordagem metodológica é qualitativa, baseada em estudo de casos múltiplos com suporte em análise documental e fontes oficiais. Os resultados apontam que contratos com cláusulas explícitas de revisão periódica, matrizes de risco bem delineadas e indicadores adaptáveis demonstram maior resiliência diante de choques exógenos, como a pandemia de COVID-19. Concessões estruturadas em blocos, como a do Bloco Nordeste, oferecem maior sustentabilidade, embora dificultem a avaliação individual de desempenho. Já o caso de São Gonçalo do Amarante evidencia fragilidades associadas à rigidez contratual e à baixa densidade regulatória. As evidências contribuem para o aprimoramento da modelagem contratual e para o desenvolvimento de políticas públicas mais robustas no campo da infraestrutura aeroportuária

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A intensificação das concessões aeroportuárias no Brasil, a partir de 2011, promoveu mudanças significativas na gestão da infraestrutura, com contratos progressivamente mais regulados. A adoção de cláusulas de desempenho, matrizes de risco e mecanismos de reequilíbrio econômico-financeiro tornou-se mais frequente nas rodadas mais recentes, refletindo avanços institucionais importantes (Engel *et al*., 2018; Oliveira & Andrade, 2023). No entanto, ainda persistem diferenças relevantes entre os modelos adotados, especialmente no que diz respeito à densidade normativa, à alocação de riscos e à capacidade de resposta contratual a choques externos.

A literatura especializada reconhece que estruturas contratuais robustas tendem a gerar maior eficiência e sustentabilidade em projetos de infraestrutura (Monteiro, 2014; Consulin, 2021). A crise da COVID-19 evidenciou a importância de cláusulas adaptativas e de uma regulação responsiva, revelando limites críticos nos contratos da primeira rodada, como o do Aeroporto de São Gonçalo do Amarante (NAT), e resiliência em contratos mais recentes, como os dos aeroportos de Fortaleza (FOR) e Recife (REC).

A partir desse contexto, este artigo realiza uma análise comparativa de três casos emblemáticos de concessão aeroportuária: FOR, REC e NAT. Esses aeroportos foram selecionados por representarem diferentes ciclos da política de outorgas federais e apresentarem contrastes marcantes em termos de desenho contratual, desempenho operacional e mecanismos de governança. O objetivo é identificar em que medida a estrutura contratual e os arranjos institucionais influenciam os níveis de eficiência, continuidade e sustentabilidade das concessões aeroportuárias no Brasil, oferecendo subsídios para o aprimoramento das políticas públicas e da regulação do setor.

2. METODOLOGIA

O estudo adota uma abordagem qualitativa de caráter comparativo, fundamentada no delineamento de estudo de casos múltiplos, conforme a orientação de Yin (2015). Essa estratégia metodológica mostrou-se adequada em razão da complexidade do objeto de investigação, uma vez que a análise da relação entre arranjos contratuais, desempenho operacional e resposta institucional exige a consideração simultânea de fatores normativos, econômicos e regulatórios, cujas fronteiras não se apresentam de forma claramente delimitada.

A seleção dos casos foi intencional e de natureza teórica, orientada pela heterogeneidade contratual e pela relevância institucional. Dessa forma, o Aeroporto de São Gonçalo do Amarante (NAT) foi incluído por se tratar do primeiro terminal concedido à iniciativa privada em 2011, representando a fase inaugural da política de outorgas; o Aeroporto de Fortaleza (FOR), concedido em 2017, foi escolhido por refletir os avanços da quarta rodada, caracterizada por contratos individuais com maior densidade normativa; e o Aeroporto de Recife (REC), concedido em 2019 no âmbito do Bloco Nordeste, foi selecionado por exemplificar o modelo em bloco, com mecanismos de redistribuição de riscos e receitas. A escolha desses três casos permite explorar contrastes significativos quanto à estrutura de governança e aos resultados institucionais alcançados.

A coleta de dados baseou-se exclusivamente em fontes secundárias de caráter oficial e científico. Foram examinados contratos de concessão e respectivos aditivos disponibilizados pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária S.A. (INFRA S.A.); relatórios

econômico-operacionais das concessionárias; indicadores oficiais extraídos dos painéis da ANAC (movimentação de passageiros, investimentos, receitas e Índice de Qualidade de Serviço – IQS); auditorias e pareceres do Tribunal de Contas da União (TCU); além de literatura acadêmica e técnica relacionada à temática das concessões aeroportuárias. A confiabilidade das informações utilizadas é reforçada pelo fato de se tratar de dados auditados e validados por órgãos de controle, o que garante consistência e legitimidade ao processo analítico.

A análise foi conduzida por meio da triangulação de três categorias complementares de informação: (i) elementos normativos, relativos às cláusulas contratuais sobre desempenho, penalidades, reequilíbrio econômico-financeiro e matrizes de risco; (ii) elementos operacionais, vinculados a indicadores oficiais de qualidade, auditorias e metas estabelecidas; e (iii) elementos institucionais, associados à atuação de órgãos de controle e à literatura especializada. O processo analítico seguiu cinco etapas principais, sintetizadas no Quadro 1, as quais permitiram organizar as informações de modo sistemático, reduzir vieses interpretativos e favorecer a comparabilidade entre os casos.

Tabela 1: Etapas da análise comparativa

Etapa	Procedimento	Resultado esperado
1	Definição dos casos e critérios de seleção	Amostra representativa de diferentes modelos contratuais
2	Coleta de documentos e literatura especializada	Base de dados normativa, operacional e institucional
3	Organização das informações por categoria de análise	Matriz de referência comparativa
4	Triangulação dos dados obtidos	Identificação de padrões e contrastes
5	Síntese intercasos	Extração de implicações regulatórias e contratuais

Embora a análise comparativa de três aeroportos permita identificar padrões relevantes entre diferentes modelos contratuais, a pesquisa apresenta algumas limitações. Primeiramente, os resultados baseiam-se exclusivamente em dados secundários e documentais, não incluindo entrevistas ou levantamentos primários junto a gestores públicos e privados, o que poderia ampliar a compreensão sobre os processos decisórios. Além disso, a amostra restrita a três casos, ainda que teoricamente justificada, limita a generalização dos achados para o conjunto de concessões aeroportuárias brasileiras. Por fim, o recorte temporal abrange informações até 2025, de modo que eventuais mudanças institucionais posteriores não foram contempladas. Essas restrições não comprometem a validade do estudo, mas indicam caminhos para pesquisas futuras que integrem abordagens quantitativas, dados longitudinais e maior diversidade de casos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos três casos evidencia como a evolução da modelagem contratual nas concessões aeroportuárias brasileiras impacta diretamente o desempenho operacional, a continuidade dos serviços e a resiliência institucional diante de choques externos.

3.1 Comparação Contratual e Governança

Os contratos analisados apresentam estruturas distintas quanto à densidade normativa, previsibilidade regulatória e mecanismos de reequilíbrio. O Aeroporto de Fortaleza (FOR), concedido em 2017 à Fraport, possui metas operacionais específicas (tempo de fila, uso de pontes de embarque), aplicação do Fator-Q, mecanismo regulatório que ajusta tarifas conforme desempenho em indicadores de qualidade (IQS), com impacto tarifário entre -7,5% e +2% e cláusulas de reequilíbrio acionáveis quando há variação superior a 1% na receita (Engel *et al.,* 2018). Essa modelagem permitiu respostas rápidas durante a pandemia, como revisão de metas e ajustes financeiros (ANAC, 2023).

O Aeroporto de Recife (REC), parte do Bloco Nordeste concedido à AENA em 2019, adota cláusulas semelhantes às de FOR, mas com lógica de compensação entre aeroportos superavitários e deficitários. A estrutura coletiva favorece a sustentabilidade contratual (Domingos *et al*., 2025), embora imponha limites à avaliação individual de desempenho (Celestino *et al*., 2024). As metas são auditáveis e vinculadas ao painel regulatório da ANAC.

Já o Aeroporto de São Gonçalo do Amarante (NAT), concedido em 2011, apresenta falhas estruturais: metas genéricas, ausência de matriz de risco clara e fragilidade nos dispositivos de reequilíbrio. Essas limitações resultaram na devolução antecipada da concessão, mesmo após tentativas de renegociação contratual (Medeiros & Silva, 2023; Oliveira & Andrade, 2023).

Tabela 2: Comparação da estrutura de governança entre os aeroportos

Dimensão	Fortaleza (FOR)	Recife (REC)	São Gonçalo (NAT)
Rodada de concessão	4ª rodada (2017)	6ª rodada (2019, Bloco Nordeste)	1ª rodada (2011)
Modelo contratual	Concessão individual	Concessão em bloco	Concessão individual
Reequilíbrio econômico-financeiro	Ativado durante a pandemia	Acionado com agilidade	Limitado e ineficaz
Desempenho pré-pandemia	Regular a bom (IQS acima da média nacional)	Satisfatório e crescente	Abaixo do esperado, infraestrutura subutilizada
Resposta à pandemia	Renegociação de metas com ANAC	Ajustes internos no bloco	Revisões parciais, seguidas de devolução
Situação contratual (2024)	Ativa	Ativa	Devolvida (Lei 13.448/2017)
Grau de resiliência	Moderado	Elevado	Baixo

Fonte: Elaborado pelos autores (2025), a partir de ANAC (2023, 2024, 2025) e TCU (2023).

3.2 Desempenho Operacional e Indicadores de Qualidade

Os indicadores de desempenho operacional reforçam a importância da modelagem contratual. FOR apresentou evolução positiva nos IQS, com média superior à nacional em conforto, sinalização e limpeza. O contrato permitiu renegociações tempestivas, preservando a continuidade do serviço (ANAC, 2023). Como mostra a Figura 1, os índices de Fortaleza se mantiveram acima da média regulatória desde a concessão em 2017, refletindo a combinação entre gestão eficiente e arranjos contratuais mais robustos. Esse resultado confirma as análises de Engel et al. (2018), que associam cláusulas de incentivo e flexibilidade regulatória ao melhor desempenho de longo prazo em parcerias público-privadas.

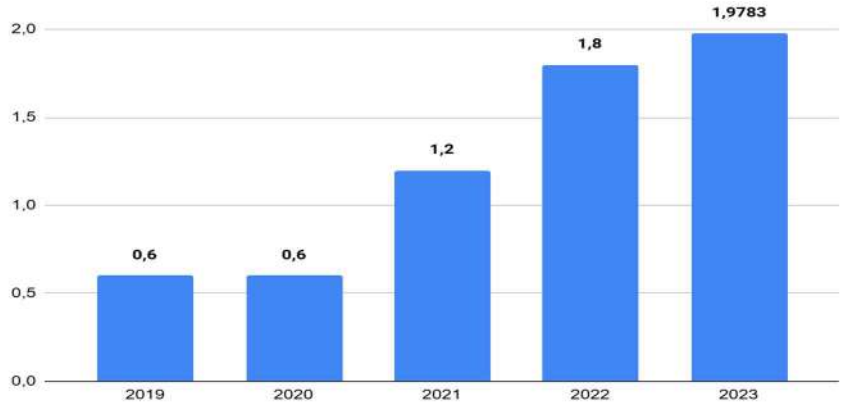


Figura 1: IQS do Aeroporto de Fortaleza (FOR) no período pós-concessão.
Fonte: ANAC (2025), adaptado pelos autores.

REC obteve nota máxima (230 pontos) em auditoria de segurança operacional conforme padrão Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) (AENA BRASIL, 2023), além de manter níveis satisfatórios de IQS desde 2019. Embora o modelo em bloco dificulte o isolamento dos efeitos individuais, estudos apontam que a combinação entre estrutura contratual adaptativa e gestão eficiente favorece o desempenho (Falcão et al.,

2025). A Figura 2 ilustra a estabilidade observada no período pós-concessão, demonstrando como a lógica de redistribuição entre aeroportos superavitários e deficitários contribuiu para a manutenção da qualidade, ainda que imponha desafios à mensuração da eficiência individual. Essa constatação dialoga com Consulin (2020), que destaca a necessidade de métricas específicas para ambientes multiconcessionados.

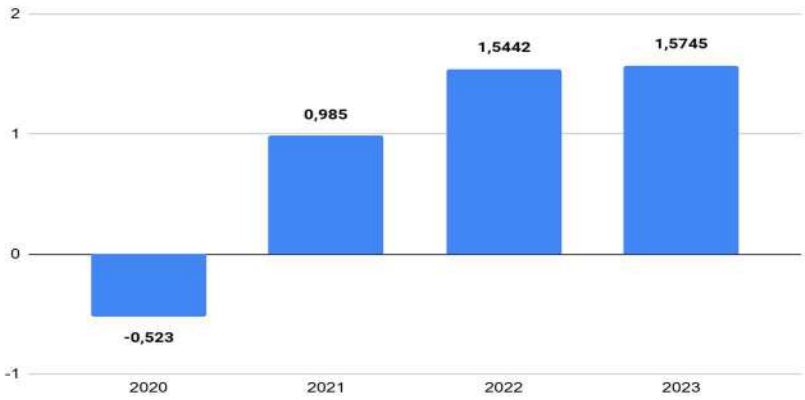


Figura 2: IQS do Aeroporto de Recife (REC) após concessão no Bloco Nordeste.
Fonte: ANAC (2025), adaptado pelos autores.

NAT, por sua vez, enfrentou subutilização da infraestrutura, queda nos IQS e desempenho abaixo da média nacional. A ausência de dispositivos robustos de ajuste contratual agravou o desequilíbrio, resultando na relicitação do ativo em 2020 (Medeiros & Silva, 2023). Os IQS, calculados e auditados pela ANAC, são utilizados como referência para aplicação de mecanismos como o Fator-Q, bonificações e penalidades (ANAC, 2025). Assim, o desempenho observado reflete tanto a capacidade da concessionária quanto a qualidade do arcabouço contratual. Como evidencia a Figura 3, os índices de São Gonçalo do Amarante apresentaram trajetória descendente desde o início da operação, revelando os limites da primeira rodada de concessões, marcada por baixa densidade normativa e fragilidades regulatórias. Nesse caso, a atuação do TCU, ao condicionar a relicitação à auditoria das indenizações devidas, foi decisiva para a resolução contratual, mas tardia para evitar a deterioração do serviço.

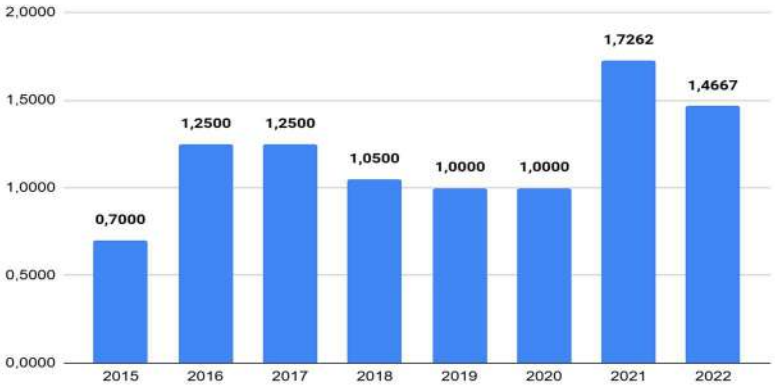


Figura 3: IQS do Aeroporto de São Gonçalo do Amarante (NAT).
Fonte: ANAC (2025), adaptado pelos autores.

3.3 Síntese Analítica e Implicações

A análise comparativa dos três aeroportos evidencia que a qualidade do desenho contratual é determinante para a resiliência das concessões diante de choques externos e variações de demanda. Em Fortaleza (FOR) e Recife (REC), contratos com maior densidade normativa, presença de cláusulas de revisão periódica e indicadores de qualidade auditáveis possibilitaram ajustes tempestivos durante a pandemia, preservando a continuidade dos serviços. Em contrapartida, o caso de São Gonçalo do Amarante (NAT) expôs as fragilidades da primeira rodada de concessões, caracterizada por contratos rígidos, metas pouco específicas e ausência de

matriz de risco claramente definida.

No caso de NAT, a participação inicial da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) limitou a flexibilidade operacional e financeira, enquanto a projeção superestimada de demanda rapidamente comprometeu a sustentabilidade do contrato. A ausência de mecanismos robustos de reequilíbrio agravou a deterioração da operação, culminando na devolução antecipada do ativo em 2020. A atuação do Tribunal de Contas da União (TCU) foi decisiva nesse processo, ao condicionar a relicitação à auditoria detalhada da indenização devida, conforme a Lei nº 13.448/2017, revelando a importância do controle institucional no reequilíbrio contratual.

Esses resultados confirmam a literatura que associa contratos adaptativos e regulados por incentivos à maior eficiência e sustentabilidade em projetos de infraestrutura (Engel et al., 2018; Consulin, 2020; Monteiro, 2014). Como destacam Silva et al. (2022), a flexibilidade regulatória e a previsibilidade de salvaguardas são elementos-chave para o desempenho de longo prazo em parcerias público-privadas. Assim, os achados deste estudo reforçam que o sucesso das concessões aeroportuárias depende menos da performance empresarial isolada e mais da capacidade institucional de promover ajustes contratuais, redistribuir riscos e assegurar a continuidade dos serviços públicos.

Tabela 3: Comparação das características contratuais entre os aeroportos analisados

Elemento Contratual	FOR (2017)	REC (2019)	NAT (2011)
Rodada de concessão	4ª	6ª (Bloco Nordeste)	1ª
Participação da INFRAERO	Não	Não	Sim
Metas de investimento	Específicas e vinculadas	Específicas por bloco	Genéricas
indicadores de qualidade (IQS)	Presentes e auditáveis	Presentes com metas flexíveis	Ausentes
Mecanismos de reequilíbrio	Ativados durante a pandemia	Aplicados com flexibilização	Limitados e ineficazes
Resultado observado	Alta resiliência e expansão	Estabilidade e continuidade	Devolução antecipada

A análise comparada demonstra que o sucesso de uma concessão não depende apenas da performance empresarial, mas da existência de arranjos institucionais capazes de promover ajustes, distribuir riscos e garantir a continuidade dos serviços públicos, mesmo em cenários adversos.

4. CONCLUSÕES

A análise dos aeroportos de Fortaleza (FOR), Recife (REC) e São Gonçalo do Amarante (NAT) demonstra que a qualidade da modelagem contratual é determinante para o desempenho e a resiliência das concessões aeroportuárias no Brasil. Contratos com cláusulas de revisão periódica, metas auditáveis, matrizes de risco bem definidas e incentivos regulatórios, como os de FOR e REC, revelaram maior capacidade de adaptação diante da crise provocada pela COVID-19. Em contraste, o caso de NAT expôs as limitações dos contratos da primeira rodada, marcados pela rigidez normativa e pela ausência de dispositivos de reequilíbrio eficazes, culminando na devolução antecipada da concessão.

Com base nesses achados, recomenda-se que futuras concessões aeroportuárias incorporem medidas mais claras e operacionais, tais como: (i) cláusulas de revisão periódica obrigatória, a cada cinco anos, vinculadas a indicadores predefinidos; (ii) definição de parâmetros mínimos de qualidade, como a manutenção do Índice de Qualidade de Serviço (IQS) acima de 4,0; (iii) adoção de matrizes de risco robustas, capazes de absorver eventos de baixa previsibilidade; (iv) fortalecimento técnico e institucional da ANAC, garantindo maior agilidade e responsividade nos processos de fiscalização e reequilíbrio; e (v) estratégias específicas para concessões em bloco, com métricas individualizadas que assegurem transparência na avaliação do desempenho de cada aeroporto. Tais recomendações oferecem subsídios concretos para a formulação de contratos mais resilientes e para a construção de uma regulação responsiva no setor aeroportuário.

Como limitação, destaca-se o fato de a pesquisa basear-se exclusivamente em dados secundários e na análise de apenas três casos, o que restringe a generalização dos resultados. Futuras investigações poderão avançar na

coleta de dados primários, por meio de entrevistas e levantamentos de campo, bem como explorar abordagens quantitativas e comparativas entre rodadas de concessão, ampliando a compreensão sobre a dinâmica contratual e regulatória no setor aeroportuário brasileiro.

Em síntese, este estudo contribui para o avanço da literatura ao evidenciar como a densidade normativa e a flexibilidade contratual moldam o desempenho das concessões aeroportuárias, ao mesmo tempo em que oferece recomendações práticas para aprimorar a formulação de políticas públicas e a governança regulatória no setor de transportes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa, bem como à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo suporte acadêmico-institucional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). *Painel de indicadores e decisões regulatórias*. Brasília: ANAC, 2023–2025. Disponível em: https://www.gov.br/anac. Acesso em: 10 jun. 2025.

AENA BRASIL. AENA Brasil celebra aumento no número de passageiros e melhoria na qualidade dos serviços nos aeroportos concedidos. 2023. Disponível em: https://www.aenabrasil.com.br/. Acesso em: 10 jun. 2025.

CELESTINO, M.; GALVÃO, M.; FALCÃO, V. O impacto da concessão no desempenho de aeroportos regionais: o caso de Campina Grande-PB. *SITRAER*, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/. Acesso em: 10 jun. 2025.

CONSULIN, R. F. *Modelagem contratual e desempenho em concessões de infraestrutura: estudo aplicado ao setor aeroportuário*. Recife: UFPE, 2020. (Dissertação de Mestrado).

DOMINGOS, M. C. F. et al. Unlocking efficiency and environmental impact: analyzing concessioned Brazilian airports. *Journal of Air Transport Management*, v. 124, 102754, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102754.

ENGEL, E.; FISCHER, R.; GALETOVIC, A. The joy of flying: efficient airport PPP contracts. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 114, p. 131–146, 2018. https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.001.

FALCÃO, V. et al. Indicadores regulatórios e qualidade em concessões aeroportuárias brasileiras. *Revista de Transportes e Mobilidade*, v. 32, n. 1, p. 45–67, 2025.

MEDEIROS, R. D. P.; SILVA, A. V. da. Governança no transporte aeroportuário: o caso do Aeroporto de Natal/RN. 2023. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/. Acesso em: 10 jun. 2025.

OLIVEIRA, R. L. de; ANDRADE, M. E. M. C. O impacto das concessões no setor aeroportuário: comparação do desempenho econômico entre aeroportos brasileiros. *Revista do Serviço Público*, v. 74, n. 2, p. 347–369, 2023. https://doi.org/10.21874/rsp.v74i2.6769.

SILVA, M. P. G. da; CUNHA, D. A. da; BERTUSSI, G. Reflexos da política de concessão dos aeroportos brasileiros na segurança operacional. *Revista do Serviço Público*, v. 73, n. 2, p. 315–338, 2022. https://doi.org/10.21874/rsp.v73.i2.5453

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). TCU aprova relicitação do aeroporto de São Gonçalo do Amarante (RN) com condicionantes. Brasília, 2023. Disponível em: https://portal.tcu.gov.br/. Acesso em: 10 jun. 2025.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Nakita Naiades Nascimento de Souza (nakita.naiades@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
Gustavo Viana de Sousa Barbosa (Gustavo.vbarbosa@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
Viviane Adriano Falcão (Viviane.afalcao@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil

CUSTO DE CAPITAL REGULATÓRIO EM CONCESSÕES DE INFRAESTRUTURA: REVISÃO CRÍTICA E PERSPECTIVAS PARA O SETOR METROVIÁRIO

Márjorie Passamani Marques, Paulo Afonso Lopes da Silva, Dayanna Rodrigues da Cunha Nunes
Instituto Militar de Engenharia-IME

RESUMO
Este artigo tem como objetivo revisar criticamente a literatura sobre o custo de capital regulatório em concessões de infraestrutura, com foco no setor de transportes. Utilizando uma abordagem qualitativa, foram analisadas publicações acadêmicas, documentos regulatórios e estudos de caso entre 2000 e 2024. Os resultados mostram uma evolução do uso de metodologias tradicionais, como CAPM (Custo Médio Ponderado de Capital) e WACC (*Weighted Average Cost of Capital*), para abordagens baseadas em risco, incluindo simulações de Monte Carlo. Também se destaca a introdução do fluxo de caixa marginal (FCM) como instrumento de reequilíbrio econômico-financeiro. Apesar dos avanços, observam-se lacunas quanto à aplicação prática dessas metodologias ao setor metroviário. A revisão indica a necessidade de desenvolver modelos regulatórios mais precisos e adaptados aos riscos específicos dos investimentos adicionais. Busca consolidar os principais referenciais teóricos e examinar aplicações práticas dos métodos em diversos países.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O custo de capital é uma referência fundamental para a viabilidade de contratos de concessão e parcerias público-privadas (PPPs), sobretudo em projetos de infraestrutura que envolvem riscos elevados e horizontes de longo prazo. A capacidade de remunerar adequadamente os investimentos realizados pelos concessionários depende da correta estimação desse custo, particularmente em situações em que novos investimentos não previstos precisam ser incorporados ao contrato original.

Segundo Ribeiro, Fioravanti e Cruvinel (2018), desde a década de 1990, o Brasil avança na utilização de modelos de concessão para ampliar a infraestrutura de transporte. Contudo, os mecanismos tradicionais de reequilíbrio econômico-financeiro muitas vezes apresentam limitações para lidar com as incertezas e os riscos regulatórios inerentes a novos investimentos, especialmente em ambientes urbanos complexos como os sistemas metroviários. A ampliação e integração da malha metroferroviária demanda abordagens atualizadas para mensuração de risco e retorno.

Diante disso, este artigo tem como objetivo revisar e analisar criticamente a literatura relacionada ao custo de capital regulatório, discutindo suas abordagens conceituais, aplicações empíricas, experiências regulatórias internacionais e lacunas na literatura aplicável ao setor metroviário. Busca-se também apresentar sugestões para aprimoramento metodológico e institucional com base nas boas práticas internacionais e nos desafios enfrentados no contexto brasileiro.

2. METODOLOGIA

A presente revisão de literatura foi conduzida segundo os princípios da revisão integrativa, com delineamento qualitativo e caráter exploratório, visando à sistematização do conhecimento existente sobre o custo de capital regulatório em projetos de infraestrutura metroviária. O procedimento metodológico adotado foi estruturado de forma a garantir transparência e replicabilidade, conforme descrito a seguir.

O levantamento bibliográfico abrangeu o período compreendido entre janeiro de 2000 e dezembro de 2024, contemplando publicações acadêmicas, relatórios técnicos, normas regulatórias e estudos de caso. As fontes foram obtidas por meio das bases de dados Scopus, Web of Science, Google Scholar e bibliotecas institucionais de órgãos reguladores nacionais e internacionais. A estratégia de busca utilizou os seguintes descritores: custo de capital regulatório, WACC, CAPM, infraestrutura e metroviário, combinados por operadores booleanos. Foram aplicados filtros de inclusão que consideraram: (i) aderência temática ao escopo da pesquisa; (ii) rigor metodológico; (iii) aplicabilidade ao contexto regulatório brasileiro ou internacional comparável; e (iv) disponibilidade integral do conteúdo. Os critérios de exclusão envolveram: duplicidade, ausência de revisão por pares, escopo genérico ou insuficiência metodológica.

A triagem inicial resultou na identificação de 308 documentos, dos quais 50 foram selecionados para análise aprofundada. Os estudos foram organizados em cinco eixos temáticos: (i) Modelos de custo de capital, com ênfase no *Capital Asset Pricing Model* (CAPM) e no *Weighted Average Cost of Capital* (WACC); (ii) Riscos

regulatórios e alocação contratual de riscos em concessões de infraestrutura; (iii) Metodologias de reequilíbrio econômico-financeiro baseadas em fluxo de caixa marginal; (iv) Abordagens probabilísticas aplicadas ao cálculo do custo de capital; (v) Aplicações práticas em concessões metroviárias e em outros modais de transporte.

A análise dos documentos selecionados permitiu identificar convergências, divergências, boas práticas internacionais e lacunas teóricas, com especial atenção à evolução dos modelos regulatórios e à sua compatibilidade com o arcabouço institucional brasileiro. Os achados da revisão fundamentam a construção teórica do estudo e subsidiam a formulação da proposta metodológica apresentada nas seções subsequentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fundamentos teóricos

A literatura clássica (SHARPE, 1966; MODIGLIANI e MILLER, 1958) define o custo de capital como o retorno mínimo requerido pelos investidores. No contexto regulatório, o WACC tornou-se a principal referência para estimar esse custo, combinando capital próprio (via CAPM) e capital de terceiros. O WACC busca refletir o custo médio do financiamento do projeto, ponderando as fontes segundo sua representatividade no capital total.

A regulação brasileira incorporou essas bases teóricas por meio de resoluções da ANTT, ANEEL e ARTESP. No setor elétrico, a ANEEL adota modelos sofisticados que incluem simulações de cenários, enquanto no setor metroferroviário ainda predominam métodos mais convencionais. Além disso, há variação entre os setores quanto à definição do beta, taxa livre de risco e prêmio de risco de mercado, o que evidencia a falta de padronização regulatória nacional.

3.2. Reequilíbrio e fluxo de caixa marginal

O reequilíbrio econômico-financeiro em concessões é um direito constitucional do concessionário, acionado quando eventos supervenientes alteram significativamente os pressupostos da modelagem original. Historicamente, esse reequilíbrio era baseado no fluxo de caixa original (FCO) e na taxa interna de retorno (TIR) da proposta vencedora.

Com a Resolução ANTT nº 3.651/2011, passou-se a permitir o uso do fluxo de caixa marginal (FCM), que isola os efeitos econômicos de eventos não previstos no contrato inicial. A metodologia avalia receitas e despesas adicionais separadamente, utilizando como taxa de desconto o custo de capital marginal atualizado. Essa abordagem foi inspirada nas concessões rodoviárias chilenas, conforme ENGEL et al. (2001), que introduziram o conceito de *Least Present Value of Revenue* (LVP) para garantir neutralidade financeira ao concessionário.

Embora ENGEL et al. (2001) apresentem o FCM como inovação metodológica, não discutem criticamente a centralidade do Valor Presente Líquido (VPL) como métrica única. A literatura especializada e decisões do Tribunal de Contas da União (TCU), como o Acórdão nº 2.462/2018-Plenário, alertam para a sensibilidade do VPL a premissas arbitrárias, como taxa de desconto e projeções de demanda. Outros julgados, como os Acórdãos nº 1.121/2020, 2.150/2015 e 3.214/2019, reforçam essa crítica e recomendam o uso de múltiplos critérios técnicos e verificáveis. A adoção exclusiva do VPL pode comprometer a objetividade e a legitimidade das decisões regulatórias.

Assim, futuras propostas metodológicas devem incorporar indicadores complementares, como métricas de desempenho, retorno ajustado ao risco e simulações probabilísticas, fortalecendo a robustez analítica e a governança dos contratos.

3.3. Abordagens probabilísticas e risco regulatório

O Ministério da Fazenda (2018) introduziu a abordagem probabilística no cálculo do WACC regulatório, com base em simulações de Monte Carlo. A ideia central é substituir o uso de valores determinísticos pontuais por distribuições de probabilidade para os parâmetros relevantes (taxa livre de risco, prêmio de risco, beta, entre outros). Tal abordagem permite representar de forma mais realista a incerteza presente nos ambientes regulados.

Reguladores internacionais como Ofgem (Reino Unido), FERC (EUA) e Ofwat (Inglaterra) adotam práticas semelhantes, com uso de percentis superiores da distribuição do WACC (como o percentil 75) para evitar subinvestimentos, sobretudo em setores de capital intensivo. Essas metodologias têm sido recomendadas também por consultorias regulatórias e por estudos acadêmicos voltados à infraestrutura resiliente.

3.4. Contribuições empíricas e lacunas

Estudos como os de Ng et al. (2007) propõem modelos quantitativos para definição do prazo ótimo de concessão, com base em parâmetros financeiros e de demanda. Já Vergara-Novoa et al. (2018) analisam concessões chilenas e estimam o WACC com base em componentes financeiros e variáveis de risco regulatório. Ambos os estudos reforçam a importância da transparência metodológica e da aderência a práticas internacionalmente reconhecidas.

No contexto brasileiro, Ribeiro (2020) propõe que o custo de capital regulatório seja reavaliado periodicamente, incorporando parâmetros atualizados do mercado financeiro e dos riscos marginais. Outros autores, como Faustino (2019), argumentam que o risco regulatório no Brasil permanece elevado, principalmente pela ausência de metodologias estáveis e de diretrizes nacionais consolidadas.

Apesar das contribuições, observa-se uma lacuna na literatura aplicada ao setor metroviário, o qual possui riscos específicos, como a complexidade de obras subterrâneas, a dependência de integrações modais e os longos ciclos de maturação dos investimentos. Poucos estudos propõem métricas específicas de risco ou adaptação das abordagens probabilísticas a esse segmento.

3.5. Avanços metodológicos e desafios técnicos na estimativa do custo de capital regulatório

O aprimoramento técnico da estimativa do custo de capital regulatório exige a incorporação de abordagens metodológicas mais robustas, sensíveis às especificidades dos projetos de infraestrutura. A determinação do custo de capital próprio (Ke), tradicionalmente obtido por meio do modelo CAPM, deve considerar a calibração precisa do coeficiente beta. Estudos recentes propõem o uso de regressões robustas com dados em painel e metodologias bayesianas para estimar betas setoriais ajustados por país, de modo a refletir variações no risco institucional, na maturidade do mercado de capitais e na estabilidade regulatória.

O prêmio de risco de mercado (MRP), outro componente fundamental do CAPM, tem sido objeto de discussão na literatura. Sua estimação tradicional com base em médias históricas simples pode gerar vieses, especialmente em economias com elevada volatilidade macroeconômica. Abordagens mais recentes sugerem a combinação de dados históricos com expectativas de mercado (*forward-looking estimations*), utilizando distribuições empíricas ajustadas por ciclo econômico.

No que tange ao custo da dívida (Kd), o desafio está em capturar a estrutura real de financiamento dos projetos. A literatura recomenda considerar *spreads* soberanos, riscos de crédito setoriais e prêmios por liquidez. Em concessões com forte participação do financiamento público, torna-se necessário isolar os efeitos das garantias estatais, distinguindo o custo efetivo do financiamento do risco assumido pelo Estado. O uso de curvas de rendimento implícitas e precificação de risco soberano são mecanismos que têm sido aplicados com sucesso em mercados regulatórios mais desenvolvidos.

A modelagem integrada de Ke e Kd exige o domínio de ferramentas estatísticas e econômicas que permitam simulações, análise de sensibilidade e construção de cenários, especialmente em ambientes regulatórios sujeitos a choques exógenos. O uso de abordagens como "*WACC-at-risk*", inspirado no conceito de *Value-at-Risk*, permite associar variações de parâmetros a faixas de risco e retorno esperadas.

3.6. Evidências internacionais: lições comparadas para o Brasil

Experiências internacionais bem-sucedidas oferecem parâmetros técnicos e institucionais valiosos para o aperfeiçoamento do marco regulatório brasileiro. No Reino Unido, a Ofgem adota o modelo RIIO (*Revenue = Incentives + Innovation + Outputs*), que promove ciclos regulatórios de oito anos com revisões do custo de capital baseadas em dados empíricos, metas de desempenho e benchmarks entre operadores. O WACC é estimado com participação ativa dos stakeholders e revisado com base em evidências atualizadas de mercado.

Na Austrália, a *Australian Energy Regulator* (AER) estabeleceu o "*Rate of Return Instrument*", instrumento regulatório que define os métodos de cálculo do custo de capital, com revisão quadrienal. A metodologia inclui consultas públicas e testes de coerência técnica dos parâmetros, promovendo previsibilidade e estabilidade regulatória. Um diferencial do modelo australiano é a padronização metodológica em todos os setores regulados, reduzindo assimetria de tratamento entre agentes econômicos. Entretanto, apesar dos avanços em termos de transparência e uniformidade, a aplicação de uma metodologia única a diferentes setores pode limitar a capacidade de acomodar especificidades setoriais, como perfis de risco distintos, estruturas de mercado e características operacionais. Essa abordagem, embora eficiente sob a ótica regulatória, pode resultar em sub-representação de variáveis críticas para determinados segmentos, comprometendo a acurácia na definição do custo de capital em contextos mais complexos ou menos maduros.

O caso chileno também oferece referência relevante, com o uso do mecanismo de menor valor presente da receita (LVP) nas concessões rodoviárias. Esse mecanismo viabiliza o reequilíbrio automático do contrato em função de variações de demanda e alterações de escopo. A literatura considera o modelo chileno como precursor do fluxo de caixa marginal (FCM), adotado posteriormente no Brasil com a Resolução ANTT nº 3.651/2011. A principal contribuição chilena está na objetividade e previsibilidade do mecanismo de reequilíbrio, cuja eficácia depende da qualidade da modelagem contratual e do monitoramento sistemático dos parâmetros de desempenho.

Essas experiências demonstram que a excelência regulatória está vinculada à construção de instituições técnicas independentes, à transparência metodológica e ao compromisso com o aprimoramento contínuo das práticas de avaliação econômica e financeira. O Brasil pode se beneficiar da adoção de modelos híbridos, com integração entre dados empíricos e processos participativos de revisão regulatória.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E AGENDA PARA A CIÊNCIA REGULATÓRIA NO BRASIL

A análise da literatura nacional e internacional evidencia uma progressiva sofisticação na abordagem do custo de capital regulatório, tanto sob o ponto de vista conceitual quanto metodológico. Contudo, observa-se a ausência de diretrizes específicas para o setor metroviário, que apresenta características técnicas e operacionais singulares. Diante desse contexto, este trabalho sugere o desenvolvimento de uma metodologia dedicada para o cálculo do WACC regulatório em concessões metroviárias, ainda em fase de formulação e validação.

A proposta preliminar contempla parâmetros ajustáveis ao contexto brasileiro, como o uso de beta setorial baseado em benchmarks internacionais, prêmio de risco compatível com a volatilidade macroeconômica nacional, spreads específicos para infraestrutura urbana e simulações de Monte Carlo para tratamento da incerteza regulatória. Embora promissora, essa abordagem requer aprofundamento técnico, testes empíricos e validação institucional antes de sua aplicação prática.

A literatura regulatória aponta uma tensão entre padronização metodológica e especialização setorial. Enquanto a padronização favorece estabilidade e comparabilidade entre setores, a especialização permite maior aderência aos riscos específicos, como os presentes em concessões metroviárias. Nesse contexto, discute-se a adoção de modelos híbridos que conciliem ambos os aspectos. Experiências internacionais oferecem subsídios relevantes: o modelo RIIO, da Ofgem (Reino Unido), estabelece ciclos regulatórios com revisões periódicas baseadas em dados empíricos; o Rate of Return Instrument, da AER (Austrália), promove revisões quadrienais com participação pública; e o modelo chileno baseado no menor valor presente da receita (LVP) contribui para mecanismos automáticos de reequilíbrio contratual.

Adicionalmente, são destacados temas como simetria regulatória, cláusulas de compartilhamento de ganhos e o prazo de concessão endógeno, conforme discutido por Ng et al. (2007). Para avanço dessa agenda, recomenda-se a estruturação de bases de dados integradas, metodologias replicáveis, capacitação técnica, pesquisa aplicada e desenvolvimento de modelos computacionais abertos com simulações de risco.

A ciência regulatória, enquanto campo emergente e interdisciplinar, deve incorporar ferramentas da economia, finanças, engenharia e direito público. Sua consolidação no Brasil depende de um compromisso institucional com a excelência técnica, a governança transparente e a orientação ao interesse público de longo prazo.

Agradecimentos
A autora agradece ao Instituto Militar de Engenharia (IME) pelo apoio institucional e acadêmico prestado ao longo da pesquisa. O ambiente rigoroso e estimulante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Australian Energy Regulator (AER). Rate of Return Instrument – Final Decision. Canberra: AER, 2022.

BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Resolução nº 3.651/2011, que institui o uso do Fluxo de Caixa Marginal. Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Nota Técnica sobre WACC Probabilístico. Brasília: Secretaria de Acompanhamento Econômico, 2018.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 2.462/2018 – Plenário. Relator: Ministro Bruno Dantas. Sessão: 31 jul. 2018. Disponível em: https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/doc/acordao-completo/2462/2018/Plenário. Acesso em: 12 set. 2025.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 1.121/2020 – Plenário. Relator: Ministro-Substituto Weder de Oliveira. Sessão: 29 jan. 2020. Disponível em: https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/doc/acordao-completo/1121/2020/Plenário. Acesso em: 12 set. 2025.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 2.150/2015 – Plenário. Relator: Ministro Bruno Dantas. Sessão: 26 ago. 2015. Disponível em: https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/doc/acordao-completo/2150/2015/Plenário. Acesso em: 12 set. 2025.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. Acórdão nº 3.214/2019 – Plenário. Relator: não identificado. Sessão: 2019. Disponível em: https://portal.tcu.gov.br/jurisprudencia. Acesso em: 12 set. 2025.

Brealey, Richard A.; Myers, Stewart C. *Princípios de Finanças Corporativas*. 10. ed. McGraw-Hill, 2012.

Damodaran, Aswath. *Applied Corporate Finance*. 4. ed. Wiley, 2015.

Engel, Eduardo; Fischer, Ronald; Galletto, Alexander. Least-Present-Value-of-Revenue Auctions and Highway Franchising. *Journal of Political Economy*, v. 109, n. 5, p. 993–1020, 2001.

Faustino, Luciana. Concessões de Transporte e Risco Regulatório no Brasil. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas) – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2019.

Gitman, Lawrence J.; Zutter, Chad J. *Princípios de Administração Financeira*. 12. ed. Pearson Prentice Hall, 2010.

Lima, Luciana; Coelho, Marcus Vinícius. Alocação de Riscos em PPPs no Brasil: Falhas de Governança e Alternativas Institucionais. *Revista de Administração Pública*, v. 49, n. 6, p. 1391–1413, 2015.

Modigliani, Franco; Miller, Merton H. The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment. *American Economic Review*, v. 48, n. 3, p. 261–297, 1958.

NG, S. Thomas; Wong, Yin; Wong, Jack K.W. A Framework for Evaluating the Viability of Public–Private Partnerships for Infrastructure Projects. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, v. 12, n. 3, p. 174–186, 2007.

Ofgem. RIIO-2 Final Determinations – Finance Annex. Londres: *Office of Gas and Electricity Markets*, 2020.

Ribeiro, Pedro. Novos Investimentos em Concessões Metroviárias: Avaliação Econômica e Metodologia de Reequilíbrio. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2020.

Ribeiro, Karisa; Fioravanti, Reinaldo; Cruvinel, Rodrigo. Concessões de infraestruturas de transportes no Brasil: identificação de empreendimentos, marcos legais e programas federais nos segmentos aeroportuário, ferroviário, portuário e rodoviário de 1990 a agosto de 2018. Washington: BID, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.18235/0001441. Acesso em: 12 set. 2025.

Sharpe, William F. Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. *Journal of Finance*, v. 19, n. 3, p. 425–442, 1964.

Vergara-Novoa, Alejandro; Rojas, Francisco; Ruiz-Tagle, Jaime. Estimating the WACC for Road Concession Projects under Risk and Uncertainty: Evidence from Chile. Transport Policy, v. 69, p. 206–214, 2018.

Márjorie Passamani Marques (marjorie.marques@ime.eb.br)
IME – Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca - Rio de Janeiro - RJ – Brasil
Paulo Afonso Lopes da Silva (pauloafonsolopes@ime.eb.br)
IME – Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca - Rio de Janeiro - RJ – Brasil
Dayanna Rodrigues da Cunha Nunes (dayanna@ime.eb.br)
IME – Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca - Rio de Janeiro - RJ – Brasil

DESAFIOS REGULATÓRIOS E CONCORRENCIAIS NOS TRANSPORTES DIGITAIS NO BRASIL: IMPACTOS ECONÔMICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS NAS DECISÕES DO CADE

Fernando Barbelli Feitosa [1], **Francisco das Chagas Sampaio Medina** [2]
[1]Universidade de Brasília -UnB, [2] Universidade de Fortaleza -UNIFOR

RESUMO
O crescimento das plataformas digitais de transporte, como Uber e Buser, trouxe desafios regulatórios, econômicos, sociais e ambientais ao setor no Brasil. O objetivo geral deste estudo é analisar os efeitos dessas plataformas na concorrência, com foco nas limitações dos procedimentos regulatórios atualmente adotados. Os objetivos específicos são: examinar a atuação do Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE) nos casos Uber e Buser; avaliar os impactos econômicos, sociais e ambientais das plataformas; e propor alternativas para a modernização dos procedimentos regulatórios. A metodologia utilizada foi qualitativa, com análise documental das decisões do CADE e revisão de literatura especializada. Os resultados indicam que o modelo regulatório vigente carece de instrumentos mais dinâmicos e responsivos. Como proposta, destaca-se o fortalecimento das análises de impacto regulatório, a ampliação da participação social e a integração interinstitucional. Conclui-se que a modernização procedimental é essencial para a efetividade da regulação dos transportes digitais no Brasil.

Palavras-chave: Plataformas digitais, transporte, concorrência, CADE, procedimento regulatório.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transporte no Brasil, tradicionalmente regulado por normas voltadas ao transporte convencional, como táxis e ônibus, tem vivenciado profundas transformações com a ascensão das plataformas digitais, a exemplo da Uber e da Buser. Essas plataformas, ao conectarem usuários e prestadores de serviço por meio de aplicativos, introduziram inovações que trouxeram benefícios como maior eficiência, redução de custos e ampliação do acesso à mobilidade. No entanto, essas inovações também impuseram desafios significativos à regulação e à defesa da concorrência (Wu, 2018; Zuboff, 2019).

No contexto brasileiro, o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE) tem desempenhado um papel central na análise de condutas concorrenciais no setor, mas suas decisões nos casos envolvendo plataformas digitais têm revelado limitações do atual procedimento regulatório. Embora existam marcos normativos relevantes, como a Lei nº 12.587/2012 (Política Nacional de Mobilidade Urbana), e tramitem propostas legislativas recentes, como o Projeto de Lei nº 2.768/2022, verifica-se que o Brasil ainda carece de um procedimento regulatório mais dinâmico e responsivo, capaz de lidar com a complexidade e a velocidade de evolução dos mercados digitais de transporte (Frossard, 2020; Aranha, 2025).

Como aponta Feitosa (2022), a experiência brasileira com a regulação de setores tradicionais de transporte, como o ferroviário e o rodoviário, oferece aprendizados importantes, mas insuficientes frente aos novos desafios impostos pelas plataformas digitais. Essa percepção também dialoga com a literatura internacional, que identifica a necessidade de novos instrumentos regulatórios voltados para mercados baseados em algoritmos e dados (Pasquale, 2015; Rosado, 2021; Rouroy, 2018). As lacunas procedimentais hoje existentes dificultam a formulação de políticas públicas e a adoção de respostas regulatórias que equilibrem inovação, concorrência, proteção social e sustentabilidade ambiental.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo geral analisar os efeitos das plataformas digitais de transporte sobre a concorrência no Brasil, com foco nas limitações procedimentais da atual regulação concorrencial e setorial. Além disso, busca-se avaliar os impactos econômicos, sociais e ambientais associados a essas plataformas, e propor alternativas para a modernização dos procedimentos regulatórios, tendo como base as decisões do CADE, os dispositivos da Lei nº 12.587/2012 e os debates legislativos em torno do PL nº 2.768/2022.

Os objetivos específicos são: analisar a atuação do CADE nos casos envolvendo Uber e Buser, identificando os principais desafios enfrentados; avaliar os impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da atuação dessas plataformas no setor de transporte; e propor aperfeiçoamentos procedimentais no modelo

regulatório vigente, com vistas a garantir uma regulação mais ágil, inclusiva e eficaz para os mercados digitais de transporte no Brasil.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo é qualitativa, com abordagem descritivo-analítica, conforme orientações de pesquisa em direito econômico e regulação digital (Aranha, 2019; Athayde, 2020). Esse tipo de desenho metodológico dialoga com os fundamentos propostos por Aranha & Lopes (2019), que ressaltam a importância da regulação baseada em técnicas e métodos científicos de governança. O desenho metodológico foi estruturado em duas etapas principais:

1. Análise documental: examinaram-se decisões do Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), especialmente os casos envolvendo as plataformas Uber (2015) e Buser (2021), selecionados por representarem precedentes paradigmáticos da atuação estatal em mercados digitais de transporte. A análise documental buscou identificar não apenas o conteúdo das decisões, mas também as limitações procedimentais enfrentadas pelo órgão, em linha com abordagens críticas da regulação econômica (Frossard, 2020; Timm, 2021).

2. Revisão de literatura: realizou-se levantamento bibliográfico de autores nacionais e internacionais que discutem regulação de mercados digitais, concorrência e inovação. Destacam-se Aranha (2025), Athayde (2020), Frossard (2020), Marques Neto (2019), Wu (2018), Pasquale (2015), Ranchordás (2021) e Zuboff (2019). Essa literatura permitiu estabelecer as bases conceituais para a análise das decisões e construir categorias interpretativas aplicáveis ao setor de transportes digitais.

Com base nessas fontes, foram definidas três dimensões de análise:

1. Econômica: eficiência, custos e concorrência, em diálogo com Mello (2021) e Marques Neto (2019);

2. Social: impactos sobre o trabalho e inclusão digital, apoiando-se em Leitão (2024);

3. Ambiental: efeitos sobre frota, congestionamento e emissões de CO_2, segundo Rosado (2021).

Essas dimensões foram utilizadas como categorias de codificação para interpretar tanto as decisões do CADE quanto os debates legislativos (Lei nº 12.587/2012; PL nº 2.768/2022), garantindo que a análise empírica estivesse ancorada em referenciais teóricos consistentes (Rouroy, 2018; Zuboff, 2019).

Essa estratégia metodológica possibilitou articular evidências documentais e fundamentação acadêmica, assegurando maior rigor científico e permitindo a proposição de aperfeiçoamentos regulatórios alinhados às práticas de governança contemporânea. O Quadro 1, a seguir, sintetiza essa estrutura metodológica, relacionando etapas, procedimentos adotados, referências de apoio e dimensões de análise.

Quadro **1**: Estrutura metodológica da pesquisa

Etapa da pesquisa	Procedimento adotado	Referências de apoio	Dimensão analítica vinculada
Análise documental	Exame das decisões do CADE (Uber – 2015; Buser – 2021), normas (Lei nº 12.587/2012) e debates legislativos (PL nº 2.768/2022).	Frossard (2020); Timm (2021); Medina (2024)	Econômica, Social, Ambiental
Revisão de literatura	Levantamento bibliográfico sobre regulação digital,	Wu (2018); Zuboff (2019); Pasquale (2015); Aranha & Lopes (2019)	Econômica, Social, Ambiental

	concorrência e inovação.		
Definição de categorias	Construção das três dimensões analíticas para interpretar casos e legislações.	Mello (2021); Marques Neto (2019); Leitão (2024); Rosado (2021); Rouroy (2018)	Econômica, Social, Ambiental

Para reforçar o rigor científico, o Quadro 1 apresenta a estrutura metodológica adotada, relacionando objetivos, procedimentos, referências de apoio e dimensões de análise.

Dessa forma, a metodologia combina análise documental e revisão de literatura especializada, articuladas por meio das dimensões econômica, social e ambiental. O recurso ao quadro metodológico buscou garantir maior transparência e consistência científica, assegurando que a interpretação das decisões do CADE e dos debates legislativos estivesse devidamente ancorada em referenciais teóricos consolidados. Esse desenho confere solidez à análise empírica e oferece suporte às proposições regulatórias apresentadas nas seções seguintes.

3. RESULTADOS

A partir da análise das decisões do CADE, da avaliação da Lei nº 12.587/2012 (Política Nacional de Mobilidade Urbana) e do Projeto de Lei nº 2.768/2022, além da revisão bibliográfica realizada, foi possível identificar os principais desafios enfrentados pela regulação dos mercados digitais de transporte no Brasil. Esta seção apresenta os resultados da pesquisa, estruturados em três eixos principais: a atuação do CADE nos casos emblemáticos envolvendo as plataformas Uber e Buser; os impactos econômicos, sociais e ambientais gerados por essas plataformas; e, por fim, as propostas para a modernização dos procedimentos regulatórios, com vistas a aprimorar a capacidade do Estado de responder aos novos cenários de concorrência e inovação no setor.

3.1. Análise da atuação do CADE

Nos casos envolvendo a Uber e a Buser, o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE) foi chamado a analisar questões concorrenciais inéditas no contexto brasileiro, fruto das inovações trazidas pelas plataformas digitais ao setor de transporte. Em 2015, no caso da Uber, o CADE concluiu que a empresa não praticava condutas anticoncorrenciais, reconhecendo que o serviço ampliava a concorrência e oferecia novas opções de mobilidade aos consumidores. No entanto, o órgão destacou a necessidade de uma regulação equilibrada que permitisse a convivência entre os serviços tradicionais, como os táxis, e as novas plataformas digitais.

Já no caso da Buser, o CADE analisou uma consulta sobre os impactos da regulação do transporte coletivo interestadual por fretamento, especialmente no que diz respeito às barreiras regulatórias criadas por normas da ANTT. Embora não tenha decidido sobre o mérito da consulta, o CADE ressaltou a importância de que a regulação setorial não gere obstáculos injustificados à concorrência e à inovação.

Esses casos revelam que, apesar de sua competência na análise de condutas anticoncorrenciais, o CADE enfrenta limitações procedimentais para lidar com as especificidades dos mercados digitais, em linha com os desafios apontados por Pasquale (2015) e Wu (2018), que destacam a insuficiência de instrumentos tradicionais para enfrentar práticas baseadas em dados e algoritmos.

Esse diagnóstico também encontra respaldo na análise de Medina (2024), que ao examinar casos concretos do CADE destaca a necessidade de redefinir competências institucionais diante dos mercados digitais.

3.2. Impactos econômicos, sociais e ambientais

Do ponto de vista econômico, as plataformas digitais de transporte proporcionaram benefícios evidentes aos consumidores, com redução de custos, maior oferta de serviços e incremento da concorrência (Marques Neto, 2019; Timm, 2021). Nessa mesma direção, Mello (2021) observa que as plataformas digitais concentram poder econômico relevante, o que reforça a necessidade de respostas regulatórias adequadas. Contudo, surgiram também externalidades negativas, como a precarização das relações de trabalho, já que motoristas vinculados às plataformas em regra não têm acesso a direitos trabalhistas tradicionais (Leitão, 2024).

Em termos sociais, observou-se ampliação do acesso à mobilidade, inclusive em áreas antes desassistidas por serviços convencionais. Todavia, também se verificaram efeitos adversos, como a exclusão digital de motoristas e usuários sem acesso adequado às tecnologias (Zuboff, 2019).

No aspecto ambiental, os impactos mostraram-se ambíguos. De um lado, verificou-se maior eficiência no uso da frota existente; de outro, constatou-se aumento do número de veículos em circulação, o que contribui para congestionamentos e elevação das emissões de CO_2 (Rosado, 2021).

3.3. Propostas para a modernização dos procedimentos regulatórios no setor de transportes digitais

A análise das decisões do CADE, combinada com a avaliação da Lei nº 12.587/2012 e do Projeto de Lei nº 2.768/2022, evidencia que o principal obstáculo para uma regulação eficiente dos mercados digitais de transporte no Brasil não é de natureza institucional, mas sim procedimental. O desafio consiste em modernizar os procedimentos regulatórios vigentes, construindo um processo decisório mais ágil, transparente e alinhado à realidade dinâmica desses mercados (Aranha, 2025; Frossard, 2020).

Nesse contexto, algumas diretrizes fundamentais se destacam:

Fortalecimento das Análises de Impacto Regulatório (AIR), em linha com a literatura de governança regulatória (Athayde, 2020; Ranchordás, 2021);

Ampliação e qualificação das consultas públicas, de modo a incluir múltiplos atores e garantir maior legitimidade social;

Institucionalização de ciclos periódicos de revisão normativa, o que permite correção de distorções e adaptação contínua às mudanças de mercado;

Integração interinstitucional entre CADE, ANTT e órgãos locais, favorecendo decisões mais consistentes (Leitão, 2024);

Adoção de sandboxes regulatórios, ambientes controlados de experimentação que conciliam inovação e segurança jurídica (Athayde, 2020; Ranchordás, 2021);

Promoção de evidências empíricas e dados abertos, como defendem Zuboff (2019) e Rouroy (2018), de forma a embasar políticas públicas em informações concretas.

Essa proposta de modernização procedimental representa um passo essencial para fortalecer a governança regulatória no setor de transportes digitais, assegurando maior capacidade de resposta do Estado e equilibrando os interesses da concorrência, da inovação, da proteção social e da sustentabilidade ambiental.

4. CONCLUSÃO

A partir da análise das decisões do CADE e do exame das normas e projetos legislativos vigentes, como a Lei nº 12.587/2012 (Política Nacional de Mobilidade Urbana) e o Projeto de Lei nº 2.768/2022, a pesquisa possibilitou atender aos objetivos específicos propostos.

Em relação ao primeiro objetivo específico, que buscava analisar a atuação do CADE nos casos envolvendo as plataformas Uber e Buser, os resultados demonstraram que o órgão tem exercido um papel relevante na defesa da concorrência. Contudo, as decisões também evidenciaram limitações procedimentais para lidar com as características dos mercados digitais de transporte, aspecto já ressaltado por autores como Pasquale (2015) e Wu (2018), que discutem a dificuldade de aplicar instrumentos tradicionais a contextos baseados em dados e algoritmos.

Quanto ao segundo objetivo específico, voltado para a avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais das plataformas digitais, o estudo identificou efeitos positivos, como o aumento da concorrência, a redução de custos e a ampliação do acesso à mobilidade (Marques Neto, 2019; Timm, 2021). No entanto, também foram evidenciados aspectos negativos, como a precarização das relações de trabalho (Leitão, 2024), a exclusão digital de determinados grupos (Zuboff, 2019) e o agravamento de problemas ambientais, como o aumento das emissões de CO_2 e dos congestionamentos urbanos (Rosado, 2021).

No que se refere ao terceiro objetivo específico, que tratava da formulação de propostas para a modernização dos procedimentos regulatórios, a pesquisa apontou caminhos concretos para o aperfeiçoamento do modelo vigente. Entre as principais sugestões estão o fortalecimento das análises de impacto regulatório (Athayde, 2020), a ampliação e qualificação das consultas públicas, a institucionalização de ciclos de revisão normativa periódica, a integração interinstitucional entre órgãos reguladores e de defesa da concorrência (Leitão, 2024) e a adoção de mecanismos experimentais, como os sandboxes regulatórios (Ranchordás, 2021).

Diante das constatações apresentadas, é possível afirmar que o objetivo geral da pesquisa foi plenamente alcançado. A análise permitiu compreender os efeitos das plataformas digitais de transporte sobre a concorrência no Brasil, com ênfase nas limitações procedimentais do modelo regulatório atual. Nesse sentido, a literatura consultada reforça a necessidade de modernização dos procedimentos como condição essencial para a construção de um ambiente regulatório mais ágil, responsivo e capaz de equilibrar inovação, concorrência, proteção social e sustentabilidade ambiental (Aranha, 2025; Frossard, 2020; Rouroy, 2018).

Agradecimentos
Este trabalho contou com o apoio da Universidade de Fortaleza (Unifor) e da Universidade de Brasília (UnB), instituições às quais se registra agradecimento pelo suporte acadêmico e institucional ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANHA, Mário Iorio. *Regulação da Economia Digital: Desafios para o Direito Econômico Contemporâneo*. Revista de Direito Público da Economia, v. 17, n. 65, 2025.

ARANHA, Mário Iorio; LOPES, Othon. *Técnicas e Métodos de Regulação Econômica: Bases para um Modelo Eficiente de Governança Regulatória*. Revista de Direito Econômico, v. 2, n. 4, 2019.

ATHAYDE, Amanda. *Sandbox Regulatório: Inovação e Flexibilidade no Ambiente Regulatório*. Revista de Regulação e Concorrência, v. 6, n. 12, 2020.

FEITOSA, Fernando Barbelli. *Previsão de Produção de Transporte Ferroviário: Uma Aplicação do Modelo de Componentes Não Lineares*. In: ABAR; KPMG. A Regulação de Infraestruturas no Brasil. São Paulo: KPMG, 2022.

FROSSARD, Paulo. *Regulação da Concorrência em Mercados Digitais: Desafios e Perspectivas*. Revista Brasileira de Direito da Concorrência, v. 7, n. 14, 2020.

LEITÃO, Gustavo. *Governança Digital e Integração Regulatória no Brasil: Desafios e Caminhos*. Revista de Direito Econômico e Socioambiental, v. 15, n. 2, 2024.

MARQUES NETO, Paulo. *Concorrência e Plataformas Digitais: Repensando as Métricas Tradicionais*. Revista de Direito Econômico, v. 10, n. 1, 2019.

MEDINA, Francisco das Chagas Sampaio. *Os Desafios da Concorrência nos Mercados Digitais no Brasil: Modelo de Regulação Jurídica e uma Proposta de Delimitação de Competências a Partir de Estudos de Casos do CADE*. 2024. Tese de Doutorado – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2024.

MELLO, André. *Regulação e Poder Econômico nas Plataformas Digitais*. Revista de Direito Público da Economia, v. 18, n. 69, 2021.

PASQUALE, Frank. *The Black Box Society: The Secret Algorithms That Control Money and Information*. Harvard University Press, 2015.

RANCHORDÁS, S. Experimental Regulations and Regulatory Sandboxes – Law Without Order? *Law and Method*, p. 1-23, dezembro 2021.

ROUROY, Antoinette. *Governing Through Algorithms: A Critical Approach to the Regulation of the Digital Economy*. 2018.
ROSADO, Fernanda. *Mercados Digitais e Delimitação do Mercado Relevante: Além da Análise de Preços*. Revista de Concorrência e Regulação, v. 5, n. 10, 2021.
TIMM, Luciano Benetti. *Concorrência e Inovação: Desafios Regulatórios Contemporâneos*. Revista de Direito Econômico e Regulação, v. 9, n. 17, 2021.
WU, Tim. *The Curse of Bigness: Antitrust in the New Gilded Age*. Columbia Global Reports, 2018.
ZUBOFF, Shoshana. *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*.

Francisco das Chagas Sampaio Medina (fcomedina.adv@hotmail.com)
Universidade de Fortaleza - UNIFOR, Coordenador Pós-Unifor (Avenida Washington Soares, 1321, Bairro Edson Queiroz, Fortaleza, CE, Brasil)
Fernando Barbelli Feitosa (fernando.feitosa@antt.gov.br)
Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT, Gerente de Regulação Rodoviária, (Setor de Clubes Esportivos Sul - SCES, trecho 03, lote 10, Projeto Orla Polo 8, Brasília, DF, Brasil)

ELASTICIDADE DEMANDA-TARIFA NO TRANSPORTE PÚBLICO: ESTUDO DE CASO DOS MUNICÍPIOS DE BELO HORIZONTE, BETIM E CONTAGEM (MG)

Paola Gonçalves da Silva[1], André Leite Guerra[2]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

RESUMO
O transporte público por ônibus no Brasil enfrenta um ciclo de queda de demanda e sucessivos aumentos tarifários, comprometendo sua sustentabilidade. Este estudo analisa os efeitos dos reajustes tarifários sobre a demanda a partir da elasticidade demanda-tarifa e propõe uma metodologia para estimar a tarifa ótima que maximize a receita do sistema de transporte. Utilizou-se abordagem quantitativa com dados secundários dos municípios de Belo Horizonte, Betim e Contagem. Os resultados indicam maior sensibilidade da demanda aos domingos e evidenciam que aumentos tarifários acima da tarifa ótima podem reduzir a receita do sistema.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte público coletivo é um serviço essencial para garantir a mobilidade e o acesso à cidade, especialmente para populações de baixa renda (Vasconcellos, 2014). Entretanto, muitos municípios brasileiros enfrentam um ciclo vicioso: a queda da demanda reduz a receita das operadoras, levando ao aumento das tarifas, o que diminui ainda mais a atratividade do serviço e compromete sua sustentabilidade financeira. (Pereira *et al.,* 2011). Segundo Rabay *et al.* (2017), o crescimento urbano e o aumento de automóveis sobrecarregam a infraestrutura viária, provocando congestionamentos e atrasos no transporte coletivo. Diante da ineficácia das políticas públicas e da má qualidade do serviço, a população recorre ao transporte individual, agravando a situação. Nesse cenário, este trabalho tem como finalidade analisar a elasticidade demanda-tarifa, entendida, conforme Litman (2021), como a medida da sensibilidade da demanda diante de variações tarifárias. O estudo tem como objetivo ainda, propor uma metodologia para estimar a tarifa ótima, ou seja, aquela que maximiza a receita do sistema, considerando que, a partir desse ponto, aumentos tarifários podem a resultar na redução da receita.

Estudos nacionais e internacionais investigaram a elasticidade-preço da demanda por transporte público, revelando variações conforme o contexto territorial, o perfil dos usuários e as políticas tarifárias adotadas. Em um estudo aplicado para diversas cidades brasileiras, Pompermayer *et al.* (2019) encontraram elasticidade de -0,2566 para o transporte rodoviário por ônibus, indicando uma demanda inelástica, atribuída à baixa oferta de modos alternativos. Já Carvalho (2012), em estudo realizado em Belo Horizonte, demonstrou que políticas tarifárias de redução, como integrações com desconto e gratuidade em áreas vulneráveis, aumentam a demanda e a receita. Em outro estudo na mesma cidade, Carvalho e Guachalla (2011) analisaram os efeitos dos descontos aos domingos, obtendo uma elasticidade de -0,3882. Paiva e Muller (2014), ao avaliarem o transporte interestadual na Região Metropolitana de Belo Horizonte, encontraram uma demanda elástica de -1,4. Em Fortaleza, Barreto (2013) identificou elasticidade mais elevada aos domingos, com valores de até -1,0433. Por fim, Carvalho (2016) constatou, no Rio de Janeiro, que a demanda é inelástica no curto prazo, mas se torna elástica no longo prazo, destacando a importância do horizonte temporal na análise.

No cenário internacional, Grange *et al.* (2013) apontaram demandas inelásticas em Santiago, sendo a demanda mais sensível fora do pico. Em Buenos Aires, Montalvo (2016) observou elasticidade de -0,042 no curto prazo e -0,477 no longo prazo, indicando maior sensibilidade ao longo do tempo. Rantzien e Rude (2014) verificaram valores semelhantes no metrô de Estocolmo, com -0,17 no pico e -0,23 fora do pico. Hensher (2008), em uma análise global com mais de 1.100 casos, destacou a influência de variáveis como finalidade da viagem, horário e modo de transporte. Ignacio (2019), ao estudar o Corredor Nordeste dos EUA, constatou demandas inelásticas para todos os modos, com destaque para o transporte aéreo. Em Sydney, Tsai *et al.* (2014) encontraram elasticidade de -0,22 no curto prazo e -0,29 no longo prazo, reforçando a tendência de maior sensibilidade com o tempo. Por fim, Fouquet (2012) demonstrou que, no Reino Unido, a elasticidade caiu de -1,5 em 1860 para -0,6 em 2010, sugerindo que, com o desenvolvimento econômico, a demanda por transporte tende a se tornar menos sensível ao preço.

2. METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa, utilizando dados secundários para calcular a elasticidade demanda-tarifa e analisar seus impactos na receita. A metodologia do estudo seguiu cinco etapas principais. A

primeira etapa consistiu na revisão de estudos relacionados ao tema da elasticidade-preço da demanda no transporte público. Em seguida, realizou-se a delimitação da área geográfica, englobando os municípios de Belo Horizonte, Betim e Contagem, localizados na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). A terceira etapa correspondeu à coleta de dados secundários, abrangendo séries históricas de demanda e tarifas, obtidas por meio das entidades gestoras locais: BHTRANS (2009 a 2019), TRANSBETIM (2011 a 2016) e TRANSCON (2014 a 2019), os períodos de análise foram escolhidos para representar o cenário pré-pandemia da Covid-19 e também pela disponibilidade de dados. Os dados de demanda de Betim estavam incompletos em alguns meses do ano de 2013, assim, esses períodos foram descartados e, consequentemente, parte dos reajustes tarifários não foram analisados. Em Belo Horizonte, devido à existência de diferentes categorias tarifárias, foi utilizada a média ponderada das tarifas com base no volume de passageiros. Na quarta etapa, os dados foram tratados e organizados para garantir consistência e comparabilidade. As informações de bilhetagem eletrônica, que registram passageiros pagantes por dia, foram integradas aos dados de reajuste tarifário extraídos de decretos oficiais. Com base nesses dados, foi realizada a quinta etapa: o cálculo da elasticidade-preço da demanda. Essa análise permitiu avaliar a sensibilidade da demanda às variações tarifárias e estimar os impactos desses reajustes sobre a receita do sistema, fornecendo subsídios para a discussão sobre a definição de uma tarifa que maximize a receita sem comprometer a acessibilidade dos usuários.
É importante destacar que a elasticidade foi estimada considerando períodos imediatamente anteriores e posteriores aos reajustes tarifários. À fim de isolar o efeito direto da tarifa sobre a demanda, reduzindo a influência de fatores de longo prazo, como renda, desemprego ou alterações estruturais no sistema de transporte (LI *et al.*, 2020). Dessa forma, o estudo concentra-se na elasticidade de curto prazo, entendida como a resposta imediata da demanda às variações tarifárias. Reconhece-se, contudo, que outras variáveis externas podem afetar a demanda, o que constitui uma limitação metodológica.

2.1. Cálculo da elasticidade demanda-tarifa

A elasticidade demanda-tarifa foi calculada pela fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\%Q}{\Delta\%P} \quad (1)$$

Onde:

- ε: Elasticidade demanda-tarifa
- Δ%Q: Variação percentual da demanda de passageiros;
- Δ%P: Variação percentual da tarifa.

Valores negativos indicam relação inversa (aumento da tarifa reduz a demanda), e a magnitude reflete a sensibilidade: |ε|>1 (elástica), |ε|<1| (inelástica), |ε|=1 (unitária) (Mankiw, 2016).

2.2. Análise da receita

A análise do impacto dos reajustes tarifários sobre a receita do transporte público foi realizada apenas para o município de Belo Horizonte, devido a disponibilidade de dados sobre demanda diária e tarifas por tipo de dia. A receita foi estimada como o produto da demanda (passageiros equivalentes) pela tarifa. A partir dos dados referentes ao valor da tarifa e à receita, foram construídos gráficos nos quais foram traçadas as curvas de receita em função da tarifa, sendo determinadas as equações que descrevem essas curvas. As equações das curvas permitiram a identificação do ponto de máximo da função, o qual representa a tarifa ótima, aquela que maximiza a arrecadação do sistema. Essa análise foi realizada separadamente para os contextos de dia útil, sábado e domingo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Elasticidade demanda-tarifa

Foram analisados 21 reajustes tarifários: 10 em Belo Horizonte (2010-2018), 5 em Betim (2011-2016) e 6 em Contagem (2014-2019). A seguir, os resultados são detalhados por município.

3.1.1. Elasticidade Demanda-Tarifa em Belo Horizonte

Em Belo Horizonte, os resultados (Tabela 1) indicam que a demanda por transporte público nos dias úteis se manteve predominantemente inelástica durante o período analisado, com exceção de 2013, ano em que houve uma redução tarifária e a elasticidade calculada foi de -1,7341, sugerindo uma demanda reprimida. Aos

sábados, a demanda também se mostrou inelástica em todos os reajustes, embora em 2016 tenha se aproximado de -1, indicando maior sensibilidade nesse período. Já aos domingos, a demanda foi caracterizada como elástica em cinco períodos distintos, sendo o mais sensível em 2010, com elasticidade de -3,3101. Esses resultados apontam que os usuários de domingo podem ser mais sensíveis a variações tarifárias, o que pode estar relacionado ao perfil das viagens realizadas nesse tipo de dia (ex. lazer). Em 2014, observou-se um comportamento atípico com 2 reajustes no ano: após um primeiro reajuste, a demanda cresceu apesar do aumento na tarifa, possivelmente por fatores externos; no segundo reajuste, com aumento tarifário maior, a demanda voltou a se comportar de forma elástica.

Tabela 1: Resultados da elasticidade demanda-tarifa de Belo Horizonte

Data do reajuste da tarifa	Δ tarifa (%)	Δ demanda - Dias úteis (%)	Δ demanda - Sábados (%)	Δ demanda - Domingos (%)	Elasticidade - Dias úteis	Elasticidade - Sábados	Elasticidade - Domingos
29/12/2010	6,18%	-1,35%	-5,87%	-20,45%	-0,2181	-0,9501	-3,3101
30/12/2011	7,89%	0,03%	0,49%	-3,64%	0,0043	0,0620	-0,4618
29/12/2012	6,25%	-0,72%	-2,34%	-12,27%	-0,1157	-0,3747	-1,9635
10/07/2013	-5,31%	9,20%	-4,22%	3,01%	-1,7341	0,7950	-0,5682
10/05/2014	3,10%	0,36%	2,01%	12,16%	0,1162	0,6493	3,9226
29/12/2014	8,40%	0,68%	-1,22%	-9,12%	0,0810	-0,1453	-1,0848
04/08/2015	9,50%	-3,51%	-3,01%	-6,44%	-0,3693	-0,3173	-0,6777
03/01/2016	8,77%	-2,51%	-8,60%	-12,10%	-0,2866	-0,9805	-1,3800
03/01/2017	9,22%	-4,50%	-4,73%	-17,02%	-0,4883	-0,5127	-1,8470
30/12/2018	11,32%	-3,79%	-2,71%	-3,61%	-0,3353	-0,2397	-0,3190

3.1.2. Elasticidade Demanda-Tarifa em Betim

Em Betim, os resultados (Tabela 2) mostraram que a demanda por transporte público nos dias úteis permaneceu inelástica durante o período analisado. Aos sábados, a demanda se mostrou elástica apenas no reajuste de 24/01/2016, com elasticidade de -1,2291, sugerindo sensibilidade pontual nesse período. Aos domingos, a demanda apresentou comportamento elástico em três ocasiões, evidenciando maior sensibilidade dos usuários às variações tarifárias nesse dia da semana. O ano de 2015 se destacou por apresentar elasticidades positivas aos sábados e domingos. Esses resultados indicam que, embora a maior parte do tempo a demanda se mantenha inelástica, há períodos específicos nos fins de semana em que o impacto tarifário é mais significativo.

Tabela 2: Resultados da elasticidade demanda-tarifa de Betim

Data do reajuste da tarifa	Δ tarifa (%)	Δ demanda - Dias úteis (%)	Δ demanda - Sábados (%)	Δ demanda - Domingos (%)	Elasticidade - Dias úteis	Elasticidade - Sábados	Elasticidade - Domingos
31/12/2011	8,16%	-1,14%	-4,26%	-7,10%	-0,1394	-0,5213	-0,8697
30/12/2012	9,43%	-2,27%	-2,43%	-11,53%	-0,2407	-0,2575	-1,2217
31/12/2014	12,73%	-0,65%	-1,41%	-16,10%	-0,0510	-0,1105	-1,2652
13/09/2015	9,68%	-2,46%	0,47%	3,88%	-0,2543	0,0488	0,4010
24/01/2016	8,82%	-2,91%	-10,84%	-17,87%	-0,3297	-1,2291	-2,0251

3.1.3. Elasticidade Demanda-Tarifa em Contagem

Em Contagem, observa-se pela análise das elasticidades que a demanda por transporte público se manteve predominantemente inelástica nos dias úteis e aos sábados, apresentando sensibilidade significativa apenas aos domingos em dois períodos. As demandas elásticas ocorreram nos reajustes de 01/01/2015 (-1,6449) e 01/01/2016 (-1,7605), indicando que, nesses momentos, aumentos tarifários superiores a 1% resultaram em quedas proporcionais ainda maiores na demanda aos domingos. Esses resultados reforçam o padrão observado nos demais municípios analisados, evidenciando que a demanda tende a ser mais sensível a variações tarifárias nos domingos do que nos demais dias da semana.

Tabela 3: Resultados da elasticidade demanda-tarifa de Contagem

Data do reajuste da tarifa	Δ tarifa (%)	Δ demanda - Dias úteis (%)	Δ demanda - Sábados (%)	Δ demanda - Domingos (%)	Elasticidade - Dias úteis	Elasticidade - Sábados	Elasticidade - Domingos
18/05/2014	3,64%	-0,87%	-1,36%	7,36%	-0,2406	-0,3741	2,0228
01/01/2015	8,77%	-1,58%	2,20%	-14,43%	-0,1798	0,2513	-1,6449
15/09/2015	9,68%	-5,03%	-2,21%	0,00%	-0,5196	-0,2287	-0,0002
01/01/2016	8,82%	-1,12%	-5,16%	-15,53%	-0,1272	-0,5847	-1,7605
31/12/2016	9,46%	-0,67%	-0,29%	-4,71%	-0,0711	-0,0305	-0,4976
10/01/2019	11,11%	-0,98%	-3,97%	-8,79%	-0,0881	-0,3574	-0,7913

3.2. Impacto dos reajustes tarifários na receita

A partir dos dados de passageiros equivalentes, calculou-se a receita como o produto entre o número de passageiros e o valor da tarifa. Foram projetadas curvas de receita em função da tarifa para três diferentes contextos temporais: dias úteis, sábados e domingos (Figura 1). As equações obtidas (Tabela 4) permitiram identificar a tarifa que maximiza a receita em cada cenário, representando o ponto de equilíbrio financeiro ideal sob a ótica da arrecadação.

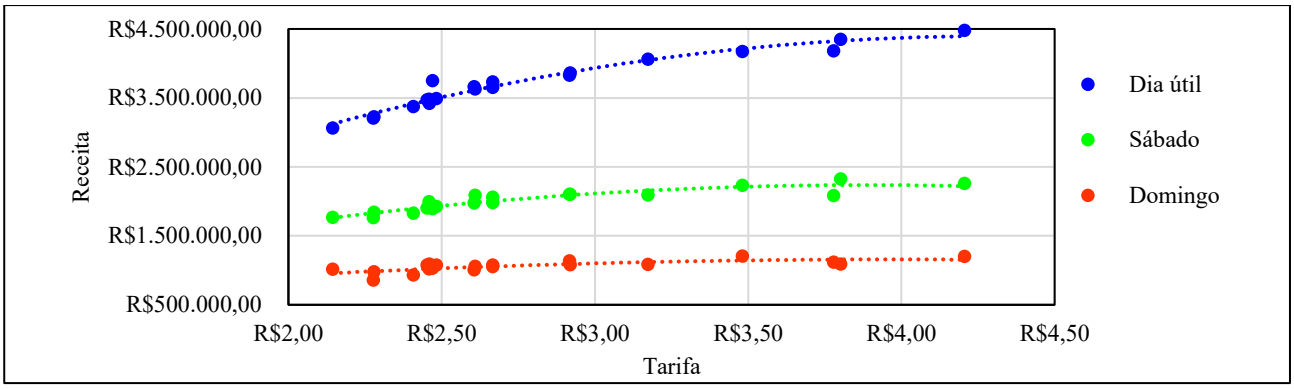


Figura 1: Gráfico da Tarifa *versus* Receita

Tabela 4: Tarifa ótima em Belo Horizonte por tipo de dia

Tipo de dia	Equação Tarifa × Receita	Tarifa ótima
Dia útil	$R = -272.679{,}66T^2 + 2.346.648{,}51T - 652.811{,}52$	R$ 4,30
Sábado	$R = -156.796{,}94T^2 + 1.218.243{,}47T - 130.111{,}79$	R$ 3,88
Domingo	$R = -59.132{,}40T^2 + 470.937{,}40T + 220.314{,}57$	R$ 3,98

Os resultados indicam que, a partir da tarifa ótima, a receita começa a diminuir, mesmo com o aumento da tarifa cobrada. Esse valor foi identificado como R$ 4,30 para os dias úteis, R$ 3,88 para os sábados e R$ 3,98 para os domingos, sugerindo que tarifas superiores a esses valores podem reduzir a receita. Embora a tarifa de R$ 4,30 ainda não estivesse em vigor no período analisado, os valores médios praticados em 2017 e 2018 (R$ 3,80 e R$ 4,20) se aproximaram das tarifas ótimas calculadas para os fins de semana, indicando que, nesses anos, a receita aos finais de semana pode ter caído. A diferença entre as tarifas ótimas calculadas, sugere que políticas tarifárias diferenciadas aos finais de semana, com valores reduzidos, podem ser vantajosas, pois tendem a atrair mais passageiros e, em alguns casos, ampliar a receita. Ressalta-se que a análise considerou apenas variáveis diretas (tarifa, demanda e receita), sendo que fatores externos, como renda e condições socioeconômicas locais, podem influenciar nos resultados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da análise de elasticidade demanda-tarifa evidenciaram que a demanda por transporte público é mais sensível aos reajustes tarifários aos domingos do que em dias úteis e sábados. Isso pode ser explicado pelo perfil dos deslocamentos: nos dias úteis e sábados, predominam viagens por motivo de trabalho, muitas vezes subsidiadas pelo vale-transporte; enquanto aos domingos, aumenta-se a procura por destinos de lazer, que são pagos com recursos próprios, tornando o impacto do aumento tarifário mais perceptível para o usuário. Em Belo Horizonte, observou-se demanda elástica somente no ano de 2013, quando houve redução da tarifa, com crescimento de 9,20% na demanda, sugerindo demanda reprimida, o que reforça os achados de Carvalho (2012) sobre o potencial das políticas de redução tarifária para ampliar tanto a demanda quanto a receita. A análise da relação entre tarifa e receita mostrou que aumentos tarifários nem sempre elevam a arrecadação; ao contrário, a partir de um determinado ponto, a receita tende a cair. A construção da curva Receita versus Tarifa possibilitou identificar a tarifa ótima para diferentes dias da semana. Assim, propõe-se a adoção de políticas tarifárias diferenciadas para dias úteis, sábados e domingos como estratégia para maximizar a receita. Ressalta-se, contudo, que os dados utilizados referem-se a um período anterior à pandemia de COVID-19 e à adoção de políticas de subsídio tarifário em Belo Horizonte. Alterações no contexto socioeconômico e nas políticas públicas desde então podem ter impactado no comportamento da demanda. Assim, recomenda-se que estudos futuros considerem o cenário pós-pandemia, os efeitos dos subsídios e outras variáveis externas que influenciam o uso do transporte coletivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barreto, C. G. (2013) *Estimativa da elasticidade-preço da demanda por transporte público em Fortaleza*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/5285 (acesso em 13/05/2025).

Carvalho, C. C. de (2012) *Elasticidade-preço da demanda por transporte público coletivo: o caso de Belo Horizonte*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/AMSA-95ZKSB (acesso em 13/05/2025).

Carvalho, H. B. C. (2016) *Elasticidade da demanda de passageiros na cidade do Rio de Janeiro: uma análise de curto e longo prazo*. Dissertação (mestrado). Curso de Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. DOI: https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.27334.

Carvalho, S. L. R. de e W. F. Guachalla (2011) Elasticidade-tarifa no transporte público: estudo de caso referente à implantação de política tarifária diferenciada para domingos e feriados no município de Belo Horizonte/MG. Comunicação técnica. Rio de Janeiro: ANTP, p. 992–998. Disponível em: http://files-server.antp.org.br/_5dot System/download/dcmDocument/2013 /01/21/40D1CAB3-E982-470D-9855-4CA9CE8920FC.pdf (acesso em 02/06/2025).

Fonseca, M. (2015) *Estudo sobre a elasticidade da demanda no transporte público*. Rio de Janeiro: Editora ABC.

Fouquet, R. (2012) Trends in income and price elasticities of transport demand (1850–2010). *Energy Policy*, v. 50, p. 62–71. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.001.

Grange, L. de; D. Muñoz; R. Troncoso e M. Vassallo (2013) Aggregate estimation of the price elasticity of demand for public transport in integrated fare systems: the case of transantiago. *Transport Policy*, v. 29, p. 178–185. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.06.002.

Hensher, D. A. (2008) Assessing systematic sources of variation in public transport elasticities: some comparative warnings. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 42, n. 7, p. 1031–1042. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2008.02.002.

Li, L.; Kasraian, D.; Shalaby, A. (2020) Empirical Analysis of Long-Run Elasticities and Asymmetric Effects of Transit Demand Determinants. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2674, n. 8, p. 274-284. DOI: http://dx.doi.org/10.1177/0361198120925465.

Litman, T. (2021) *Understanding Transport Demands and Elasticities: how prices and other factors affect travel behavior*. Victoria Transport Policy Institute. Disponível em: https://www.vtpi.org/elasticities.pdf (acesso em 18/06/2021).

Mankiw, N. G. (2016) *Princípios de economia*, 7. ed. São Paulo: Cengage Learning.

Montalvo, J. (2016) Elasticidad-precio de la demanda del transporte público urbano: un análisis para los servicios de ómnibus y subterráneo de la ciudad autónoma de Buenos Aires. *Actualidad Económica*, v. 26, n. 88, p. 7–19. Disponível em: https://revistas.unc.edu.ar/index.php/acteconomica/article/view/14877/14839 (acesso em 02/06/2025).

Paiva, I. C. P. L. e C. Müller (2014) Competição entre o ônibus e o avião no transporte interestadual de passageiros na Região Metropolitana de Belo Horizonte. *Journal of Transport Literature*, v. 8, n. 1, p. 109–124.

Pereira, R. H. M.; C. Schwanen e L. C. M. de Andrade (2011) A mobilidade urbana no Brasil. *Comunicados do Ipea*, v. 94. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272833396 (acesso em 28/06/2022).

Pompermayer, F. M.; L. T. de Oliveira; A. C. F. Silva; A. R. Santos e A. A. A. Oliveira (2019) Elasticidade preço e Elasticidade renda de passageiros por modo de transporte para projeção de matrizes origem destino nacional. *Radar: Tecnologia, produção e comércio exterior*, Brasília, v. 61, n. 1, p. 29–31. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes (acesso em 02/06/2025).

Rabay, L.; M. M. Fernandes; T. P. B. Silva e R. H. M. Pereira (2017) Prospecção de fatores influenciadores da demanda por transporte público para aplicação ao mercado brasileiro. In: *Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*, 31., 2017, Recife. *Anais...* Recife: ANPET, p. 1–12.

Rantzien, V. H. A. e A. Rude (2014) Peak-load pricing in public transport: a case study of Stockholm. *Journal of Transport Literature*, v. 8, n. 1, p. 52–94.

Tsai, C. H.; C. Mulley e G. Clifton (2014) A review of pseudo panel data approach in estimating short-run and long-run public transport demand elasticities. *Transport Reviews*, v. 34, n. 1, p. 102–121. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2013.875079.

Vasconcellos, E. A. (2014) *Urban transport environment and equity: the case for developing countries*. London: Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315071756.

Paola Gonçalves da Silva (paolagoncalves@ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha – Belo Horizonte, MG, Brasil
André Leite Guerra (andreguerra@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus I – Belo Horizonte, MG, Brasil

FINANCIAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO POR MEIO DE AGREGAÇÃO DE VALOR: O CASO DA BR 430

Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato[1], **Yaeko Yamashita**[1], **Paulo José Pessoa de Jesus**[1], **Joaquim José Guilherme de Aragão**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
A BR-430, situada no MATOPIBA, conecta áreas produtoras do Oeste Baiano a centros consumidores, mas sua capacidade de desenvolvimento é prejudicada pela falta de pavimentação. Este estudo avalia se a agregação de valor nas cadeias de soja e milho pode financiar a infraestrutura rodoviária da região. Parte-se da hipótese de que a expansão da produção e a instalação de indústrias locais gerarão receitas fiscais suficientes para compensar os investimentos necessários. Foram projetadas a expansão da área cultivada e a produção futura em um cenário médio de produtividade, estimando-se o potencial de arrecadação fiscal indireta. Os resultados indicam a viabilidade de implantação de plantas industriais de soja (1.500 t/dia) e milho (2.500 t/dia), com retorno fiscal em prazos compatíveis com o investimento na infraestrutura. Conclui-se que a agregação de valor na produção agropecuária constitui uma estratégia viável para financiar a infraestrutura logística e impulsionar o desenvolvimento regional ao longo da BR-430.

1. INTRODUÇÃO

O financiamento das infraestruturas de transportes no Brasil, particularmente no interior, é uma questão estrutural da integração produtiva e do desenvolvimento regional. A finitude logística prejudica a eficiência econômica devido ao aumento dos custos de transação e à redução do fluxo de produção em áreas com elevado potencial agropecuário (Assis *et al*, 2019; Brasil, 2012; Correa e Ramos, 2010). A literatura especializada expressa amplamente uma correlação entre infraestrutura de transporte e desenvolvimento regional (Banister e Berechman, 2000; Aschauer, 1989; Limão e Venables, 2001). A evidência empírica internacional e brasileira demonstra que decisões eficientes sobre o território, via investimentos logísticos, podem fomentar integração produtiva, promover redução de custos de transação e elevar a competitividade regional. No Brasil, a insuficiência da infraestrutura de transportes limita o desempenho competitivo de diversas áreas, em especial aquelas localizadas no interior (Gonçalves *et al*. 2017).

A extensão em que mecanismos de financiamento baseados em agregação de valor podem permanecer viáveis, bem como o impacto que tais deslocamentos podem gerar no âmbito fiscal e global, também são abordados. A Engenharia Territorial complementa essa discussão ao sugerir uma articulação entre políticas de desenvolvimento regional e investimentos estratégicos em infraestrutura, para possibilitar a ativação de cadeias produtivas locais e induzir a coesão territorial (Aragão *et al.* 2010).

Os resultados analisados neste artigo são derivados da aplicação de uma abordagem metodológica proposta na região da BR-430, Oeste da Bahia. Visa a identificação de oportunidades rurais territoriais para empreendimentos agroindustriais, com objetivo de estabelecer o potencial produtivo e de criação de valor da área da BR-430, cuja ativação está condicionada à requalificação da infraestrutura rodoviária. Presume-se que os benefícios econômicos e fiscais de impulsionar as cadeias produtivas regionais seriam suficientes para justificar os investimentos públicos necessários para a pavimentação do trecho da estrada sobre leito natural.

A abordagem metodológica busca estimar de maneira comparativa os impactos fiscais e produtivos em cenários alternativos. Seus objetivos são demonstrar o potencial de produção e a capacidade de criar valor que a região da BR-430, no contexto de melhoria da estrutura de infraestrutura, possui, de modo a orientar decisões de investimento público levando em consideração a expansão econômica e fiscal esperada.

2. METODOLOGIA

Com base nos pressupostos discorridos na introdução, e de forma a atingir os objetivos apresentados, foi desenvolvido um processo metodológico estruturado em sete etapas sequenciais, visando quantificar os impactos econômicos e fiscais potenciais decorrentes da melhoria da infraestrutura rodoviária no trecho da BR-430 e da dinamização das atividades produtivas associadas.

a) Definição do Território e estudo de mercado: coleta de informações sobre a infraestrutura de transporte a ser estudada e definição do território em função da sua influência sobre o mercado nacional e

internacional, para identificar tendencias produtivas e orientar escolhas sobre segmentos âncora a serem explorados;
b) Levantamento territorial definido e diagnóstico socioeconômico: coleta de dados dos ambientes ocupado e não ocupado dos municípios situados no entorno da infraestrutura rodoviária, com base em registros oficiais e outras fontes públicas. A análise compreendeu o uso da terra e os fluxos econômicos predominantes;
c) Diagnóstico da infraestrutura logística existente: mapeamento da infraestrutura viária principal e secundária, com foco na infraestrutura de transportes. Identificação de entraves físicos e funcionais ao escoamento da produção;
d) Mapeamento das cadeias de negócios e sua completude: levantamento das atividades econômicas existentes, com base na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), e identificação dos elos ausentes nas cadeias de valor da agropecuária. Análise do grau de verticalização da produção local;
e) Identificação do potencial produtivo agropecuário: seleção dos cultivos predominantes (soja, milho e pastagens), considerando suas exigências agroecológicas e a compatibilidade com as características do solo, clima e relevo da região. Projeção de áreas aptas à intensificação e expansão agrícola com base em critérios técnicos;
f) Projeção de cenários produtivos e fiscais: estimativa da produção total e sua divisão em exportação e mercado nacional sob o cenário médio, definido de acordo com a média de 3 cenários de produtividade da cultura. A partir desses valores, foram realizados os seguintes cálculos, considerando a estrutura tributária incidente sobre a produção a partir da Matriz de Recursos e Usos do Sistema de Contas Nacionais:

- Valor Bruto da Produção (VBP):

$$VBP = TP \times VVpp \quad (1)$$

- Oferta Total a Preço de Consumidor (OTpc):

$$OTpc = \frac{VBP}{POTpc} \quad (2)$$

- Potencial de Arrecadação Indireta Setorial (AIS):

$$AIS = OTpc \times TI \quad (3)$$

Onde:
TP = Total da Produção em unidades de mercado
VVpp = Valor de Venda do produto a preços pagos ao produtor
POTpc = Participação Relativa do Valor Bruto da Produção na composição da Oferta Total a preços de consumidor
TI = Taxa de Incidência Total dos Impostos na Oferta Total a preços de consumidor

g) Estimativa da viabilidade fiscal da infraestrutura: levantamento dos custos médios de implantação de rodovia pavimentada comparando com os valores de arrecadação projetada nos cenários e o custo da infraestrutura para avaliar a viabilidade de recuperação dos aportes públicos via retorno tributário.

3. ESTUDO DE CASO: BR-430 (BA)

A BR-430 foi escolhida para o estudo de caso e está situada na região do MATOPIBA, considerada a última fronteira agrícola do Brasil, e estabelece a ligação entre áreas produtoras do Oeste baiano e centros consumidores e logísticos. Nesse contexto, o estudo teve como território os municípios de Baianópolis, Brejolândia, Canápolis, Correntina, Santa Maria da Vitória, Santana, Serra Dourada e Tabocas do Brejo Velho — trecho que ainda não possui pavimentação rodoviária. Consiste em uma área de 24.456,33 km² (IBGE), maior do que o estado de Sergipe, entre o Cerrado e a Caatinga, com uma população total de 145.829 habitantes (IBGE) e um PIB de R$ 5.168.102.000,00 (IBGE), com o VAB do Agro representando 45,71% do total.

Trata-se de uma região cuja base produtiva é voltada ao cultivo predominantemente de soja e milho, mas que enfrenta restrições estruturais, dificultando o escoamento da produção e limitando as possibilidades de

agregação de valor no território. A aplicação da metodologia permitiu gerar estimativas consistentes acerca dos impactos econômicos e fiscais decorrentes da intervenção proposta. A seguir, são apresentados os principais resultados, com ênfase no potencial de incremento da produção e na projeção de retorno fiscal.

3.1. Aplicação da Metodologia Proposta:

As etapas de "a" a "e" permitiram estimar a área disponível para expansão da produção agrícola no território da BR-430, resultado que serviu de base para o cálculo das projeções de produção da soja e milho. Isso possibilita demonstrar o potencial produtivo que reside na região e delinear cenários prospectivos, a partir do ano base de 2023. A análise da expansão da produção de soja (figura 1) demonstra as trajetórias de crescimento no horizonte de 10 anos. Ao se comparar com a taxa de crescimento de 2013 a 2023 (11,41%), o cenário avaliado se torna factível e pressupõe a intensificação dos investimentos e a adoção de estratégias para a ampliação da capacidade produtiva.

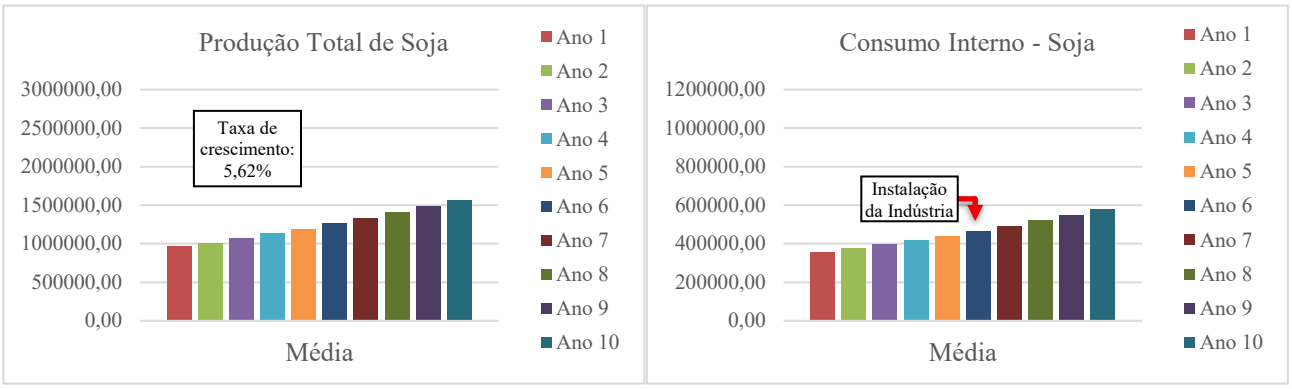


Figura 1: Projeção da Produção Total de Soja e o seu Consumo Interno para o Território da BR-430 (em ton)
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Considerando o percentual da produção projetada a ser destinada ao consumo nacional, conforme proporções indicadas pela Associação das Indústrias de Óleo Vegetal (Abiove) – 63% para exportação e 37% para o mercado interno –, verifica-se a viabilidade de instalação de uma indústria esmagadora de soja com processamento de 1500 ton/dia (495.000 ton/ano). De acordo com as projeções, essa implantação seria possível no sexto ano para o cenário médio, agregando valor à produção, o que eleva a receita fiscal do território.

Segundo dados do IBGE, o cultivo de milho na BR430 em 2023 representou 27,81% do total da produção agrícola, metade da produção de soja (54,28%). O investimento no aumento da produção se faz necessário para a ativação das oportunidades de industrialização local, premissa que orientou a projeção de produção (figura 3), baseada tanto na ampliação da área cultivada quanto no incremento da produtividade. Com isso, a taxa de crescimento projetada no horizonte temporal é inferior a taxa histórica registrada (16,36% ao ano entre 2013 e 2023), demonstrando a viabilidade da produção.

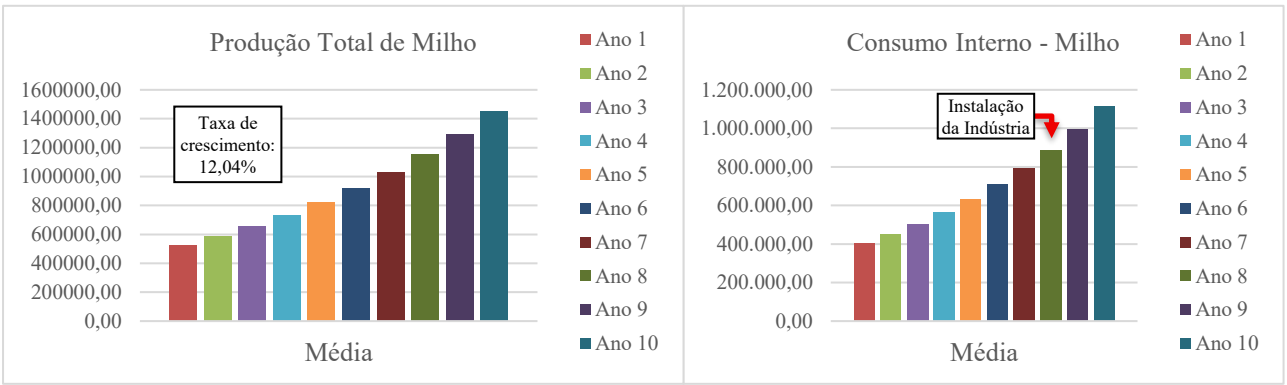


Figura 2: Projeção da produção de Milho e seu Consumo Interno para o Território da BR-430 (em ton)
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com base nas proporções indicadas pela Associação Brasileira dos Produtores de Milho (Abramilho) – 22% para exportação e 78% para o mercado interno –, pode-se afirmar que há a possibilidade de instalação de uma indústria de milho com processamento de 2500 ton/dia (825.000 ton/ano). De acordo com as projeções, a unidade poderia ser implantada a partir do oitavo ano, possibilitando um aumento da receita fiscal nos anos correspondentes.

A análise de viabilidade da pavimentação da BR-430 evidencia que a estratégia de agregar valor à produção regional, especialmente nas cadeias da soja e do milho, pode se firmar como uma solução para o financiamento de obras de infraestrutura rodoviária. A Figura 3 apresenta a projeção da arrecadação fiscal indireta acumulada proveniente dessas cadeias ao longo de um horizonte de 10 anos, considerando um custo médio estimado de pavimentação de R$ 276.608.044,41, calculado com o uso da ferramenta de Custos Médios Gerenciais da Fundação Getúlio Vargas (FGV) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

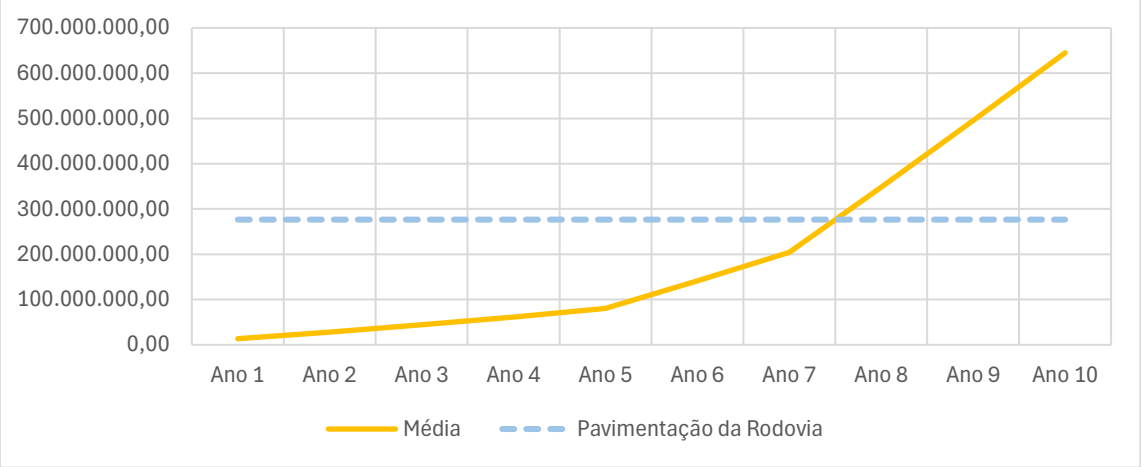


Figura 3: Projeção de Arrecadação Indireta Acumulada (Soja + Milho) (em R$) no Território da BR-430
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Nos primeiros anos, a arrecadação cresce de forma gradual, refletindo o tempo necessário para a expansão da produção agrícola, implantação e operação das indústrias vinculadas às cadeias produtivas. A partir do sexto ano, verifica-se um crescimento expressivo na arrecadação, impulsionado pelas plantas industriais, pelo ganho de escala produtiva e pela consolidação da logística regional viabilizada pela infraestrutura pavimentada.

O ponto de equilíbrio entre a arrecadação indireta e o investimento na pavimentação da BR-430 é alcançado ao final do sétimo ano, indicando que, mesmo em um cenário conservador, a arrecadação acumulada pode cobrir integralmente o custo da obra em menos de uma década. Além dos benefícios fiscais, o investimento tende a impulsionar a formação de polos industriais e logísticos, gerar empregos, elevar a renda local e fortalecer a coesão regional e a interiorização do desenvolvimento.

4. CONCLUSÃO

Os resultados do estudo confirmam que agregar valor à produção agrícola no território da BR-430 é uma estratégia viável para impulsionar o desenvolvimento regional e viabilizar o financiamento de infraestrutura. A comparação entre os custos de implantação da rodovia e a arrecadação fiscal indireta projetada aponta para um retorno fiscal positivo dentro de um horizonte compatível com o período de implantação das cadeias produtivas e industriais locais.

À medida que a agroindústria se consolida na região, a arrecadação fiscal tende a superar os custos iniciais do investimento, gerando excedentes fiscais que podem ser utilizados em novos projetos de infraestrutura, na manutenção da própria rodovia ou em iniciativas voltadas ao fortalecimento do desenvolvimento territorial. Esse cenário sugere que modelos de financiamento baseados na agregação de valor local podem contribuir para a sustentabilidade financeira de projetos similares, estimulando o crescimento regional de forma mais autônoma.

A metodologia aplicada oferece uma contribuição prática e potencialmente replicável para o desenvolvimento de novos arranjos de financiamento, especialmente em regiões de fronteira agrícola ou áreas com histórico de baixo investimento público. Trata-se de um modelo que pode reduzir a dependência de recursos orçamentários tradicionais ou de concessões onerosas.

Além disso, o fortalecimento das cadeias produtivas regionais, quando articulado com investimentos logísticos estratégicos e políticas de incentivo à industrialização local, pode estimular uma reconfiguração territorial que favoreça a formação de polos logísticos e industriais, ampliando a geração de emprego e renda e aumentando a competitividade das economias locais no mercado nacional e internacional. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise de cenários, explorem indicadores de sensibilidade e avaliem a aplicabilidade da metodologia proposta em diferentes setores e contextos territoriais, buscando ampliar a robustez dos resultados aqui apresentados.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro, que viabilizou o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aragão, J. J. G.; Y. Yamashita e M. A. Pricinote. (2010) *Engenharia Territorial: problemas e territórios programáticos*. Brasília, DF: CEFTRU/UnB. Disponível em: https://www.academia.edu/4787200/Engenharia_Territorial_Problemas_e_Territ%C3%B3rios_Program%C3%A1ticos (acesso em 08/06/2025).

Aschauer, D. A. (1989) Is Public Expenditure Productive? *Journal of Monetary Economics*, v. 23, n. 2, p. 177-200. DOI: https://doi.org/10.1016/0304-3932(89)90047-0.

Assis, C. P.; L. D. V. Costa e S. A. Hirassaka. (2019) Infraestrutura logística brasileira de transporte e o impacto na escoação de grãos exportados pelo Brasil. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. Disponível em: https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/10/infraestrutura-logistica-brasil.html (acesso em 08/06/2025).

Banister, D. e J. Berechman. (2000) Transport Investment and Economic Development. London: *UCL Press*.

Brasil. (2012) Financiamento da infraestrutura de transportes no Brasil. In: Campos Neto, C. A.S. et al. (Org.). *Brasil em desenvolvimento 2011: estado, planejamento e políticas públicas*. Brasília: Ipea, p. 103–132. Disponível em: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14434 (acesso em 08/06/2025).

Correa, V.H.C. e P. Ramos. (2010) A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. *Revista Economia e Sociologia Rural* v. 48 n.2 DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-20032010000200009.

Fundação Getulio Vargas. (s.d.). *Simulador CMG*. FGV IBRE. https://simuladorcmg-ibre.fgv.br/ (acesso em: 09/06/2025).

IBGE. (2025) *Cidades@ [site]*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. (acesso em: 10/06/2025)

Gonçalves, R. R.; J. Braatz e, G. I. Moraes. (2017) Infraestrutura de transportes no Rio Grande do Sul e desenvolvimento regional. *Revista FEE*. Disponível em: https://arquivofee.rs.gov.br/wp-content/uploads/2017/06/20170608livro-inovacao-texto-03-infraestrutura-de-transportes-no-rio-grande-do-sul-e-desenvolvimento-regional.pdf (acesso em 09/06/2025).

Limão, N. e A. J. Venables. (2001) Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs, and Trade. *World Bank Economic Review,* v. 15, n. 3, p. 451–479. DOI: https://doi.org/10.1093/wber/15.3.451.

Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato (marcosp.arch@gmail.com)
Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Yaeko Yamashita (yaekoyamashita@gmail.com)
Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Paulo José Pessoa de Jesus (paulopessoabsb@gmail.com)
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Joaquim José Guilherme de Aragão (joaquim.jg.aragao@gmail.com)
Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900

FINANCIAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE PASSAGEIROS: RECEITAS NÃO-TARIFÁRIAS E BOAS PRÁTICAS INTERNACIONAIS

Fernando M. Ely, Francisco Gildemir F. Silva
Universidade de Brasília - UnB

RESUMO
O transporte ferroviário de passageiros é estruturalmente deficitário quando baseado apenas em receitas tarifárias. Este artigo revisa modelos internacionais de financiamento não-tarifário, como captura da valorização imobiliária, publicidade e exploração comercial de estações. São apresentados casos de sucesso, como Sotetsu (Japão) e MTR (Hong Kong), discutindo sua aplicabilidade ao Brasil. O estudo se insere no contexto de estudos de financiabilidade de infraestruturas de transportes e é aplicável aos EVTEAs desenvolvidos no Brasil. O trabalho reforça a importância da diversificação de receitas para viabilizar economicamente a expansão ferroviária no país.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento populacional, a urbanização acelerada e a demanda crescente por deslocamentos entre centros urbanos e regiões metropolitanas impõem ao Brasil a necessidade de investir em sistemas de transporte público de alta capacidade. Entre os modos disponíveis, o transporte ferroviário de passageiros - em suas variantes como metrôs, trens urbanos e intercidades - destaca-se por sua eficiência, segurança e baixo impacto ambiental. Atento a esse desafio, o Governo Federal, por meio do Ministério dos Transportes e da INFRA S.A., contratou em 2024 a elaboração de Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) para seis trechos ferroviários com potencial para transporte de passageiros: Brasília/DF – Luziânia/GO; Rio Grande/RS – Pelotas/RS; Londrina/PR – Maringá/PR; Fortaleza/CE – Sobral/CE; Salvador/BA – Feira de Santana/BA; e São Luís/MA – Itapecuru Mirim/MA. Esses estudos, em andamento, visam avaliar a viabilidade de retomar ou implantar serviços regulares de passageiros, marcando um novo ciclo de planejamento ferroviário no país.
Contudo, a experiência internacional e dados históricos mostram que o transporte ferroviário de passageiros tende a ser financeiramente deficitário. Mesmo em regiões densamente povoadas, as receitas tarifárias raramente cobrem integralmente os custos operacionais — o chamado *farebox recovery ratio* dificilmente atinge 100%. Essa limitação decorre dos elevados custos de implantação, operação e manutenção, das tarifas acessíveis praticadas e dos benefícios sociais e ambientais não internalizados na tarifa.
Diante da escassez de recursos públicos e da necessidade de priorização de investimentos em diferentes setores, surge a questão: como viabilizar economicamente projetos ferroviários de passageiros em um país com restrições fiscais e baixa capacidade de autofinanciamento? Em outras palavras, é preciso compreender o grau de dependência operacional desses sistemas e identificar mecanismos de financiamento não-tarifários — como valorização imobiliária e receitas acessórias — que possam garantir sua sustentabilidade.
Este artigo busca responder a essa questão por meio de uma revisão bibliográfica estruturada, reunindo evidências sobre a importância das fontes extra-tarifárias no transporte ferroviário de passageiros. São analisadas experiências internacionais de destaque, especialmente na Ásia e Europa, com foco em instrumentos como captura de mais-valia fundiária, exploração imobiliária, receitas comerciais, publicidade e serviços em estações. Por fim, discute-se a aplicabilidade dessas estratégias ao contexto brasileiro, considerando suas especificidades institucionais, urbanas e financeiras.

1.1. Metodologia

Adotou-se como metodologia uma revisão bibliográfica estruturada, abrangendo relatórios institucionais, artigos acadêmicos e estudos documentados sobre sistemas ferroviários urbanos. O relatório do Banco Mundial *Financing Transit-Oriented Development with Land Values* (2015) foi a principal base teórica, ao tratar de mecanismos de *Land Value Capture* em países em desenvolvimento. Complementarmente, analisaram-se fontes internacionais sobre financiamento de metrôs e trens urbanos em cidades da Ásia (Hong Kong, Tóquio) e Europa (Londres, Paris), destacando boas práticas e resultados quantitativos.
A pesquisa incluiu coleta de dados sobre indicadores financeiros (porcentagem dos custos cobertos por tarifas, peso das receitas imobiliárias, etc.) e modelos institucionais (PPP, legislação urbanística, impostos dedicados). Foram selecionados casos internacionais emblemáticos para *benchmarking*, além de referências a experiências recentes no Brasil. A análise comparativa permite identificar fatores de sucesso em instrumentos de financiamento alternativo e discutir sua viabilidade de aplicação no país.
O objetivo não é propor políticas públicas específicas, mas avaliar evidências e extrair recomendações gerais. O artigo segue uma estrutura temática: introdução do problema, revisão bibliográfica e casos, discussão da

aplicabilidade no Brasil e conclusão.

2. ESTUDOS DE CASO INTERNACIONAISL (*BENCHMARKING*)

Nesta seção são apresentadas experiências internacionais de financiamento ferroviário que demonstram modelos bem-sucedidos de receitas não-tarifárias. Os casos selecionados – Hong Kong, Tóquio, Londres e Paris – ilustram diferentes abordagens de captura de valor e diversificação de receitas, servindo como benchmark para outras cidades.

2.1. Hong Kong: Modelo *Rail* + *Property* (R+P)

Hong Kong é um dos exemplos mais emblemáticos de integração entre transporte e desenvolvimento imobiliário. Desde os anos 1980, a *MTR Corporation*, operadora do metrô local, adota o modelo "*Rail + Property*", no qual recebe do governo direitos de desenvolvimento de terras públicas ao longo das linhas, a preços anteriores à construção. Em parceria com incorporadoras, a MTR desenvolve esses terrenos — com edifícios residenciais, comerciais e centros de compras — e utiliza os lucros imobiliários para financiar tanto a construção quanto a operação das linhas (SUZUKI, *et al.* 2015).

Em 2012, a MTR registrou um índice de recuperação tarifária de 185,5%, com receitas tarifárias muito superiores aos custos operacionais (SUZUKI, *et al.* 2015). Isso se deve às robustas receitas não-tarifárias. Entre 2001 e 2005, 52% da receita da MTR veio de desenvolvimento imobiliário, 10% de atividades associadas (aluguéis, gestão de propriedades, publicidade), 10% de outras receitas não tarifárias e apenas 28% da operação de transporte (CERVERO e MURAKAMI, 2009). Ou seja, dois terços da receita eram extra tarifários, tornando o metrô não apenas autossuficiente, mas lucrativo. Os excedentes geraram dividendos e valorização das ações ao acionista majoritário: o governo.

O modelo de Hong Kong mostra como ativos imobiliários podem subsidiar os custos de capital e manutenção de ferrovias em operação de passageiros. Os lucros do setor imobiliário ajudam a financiar os elevados investimentos exigidos pelas linhas e permitem manter tarifas acessíveis. Fatores locais facilitam essa lógica: todo o solo é público (arrendado), simplificando a concessão de uso, e a alta densidade populacional e comercial gera forte demanda. O caso ilustra o potencial de parcerias transporte-imobiliário.

2.2. Tóquio (Japão): Integração Ferroviária Privada e Desenvolvimento Urbano

Em Tóquio, há longa tradição de integração entre ferrovias privadas e desenvolvimento urbano. Diversas operadoras não apenas constroem e operam linhas de trem e metrô, mas também atuam como desenvolvedoras de bairros inteiros — com *shopping centers*, escritórios, hotéis e outros empreendimentos conectados às estações. O princípio é simples: os trens atraem pessoas, valorizam o entorno e geram lucros nos empreendimentos, que subsidiam a operação ferroviária.

A *Tokyu Corporation* é um exemplo. Entre 2004 e 2013, apenas 41% de seu lucro veio do transporte. Os outros 59% vieram de receitas não-tarifárias: 34% do setor imobiliário (venda/locação de propriedades) e 25% de serviços comerciais e de lazer nas estações e arredores (SUZUKI, *et al.* 2015). A empresa atua como incorporadora, gestora de *shoppings* e operadora de serviços de lazer, aproveitando o ecossistema criado ao redor de suas linhas. Os passageiros não geram apenas receita de bilhete, mas também consomem, alugam imóveis e utilizam serviços próximos às estações, criando múltiplas fontes de renda.

Outro exemplo é a *JR East*, privatizada nos anos 1980. A empresa investiu fortemente na exploração comercial das estações, com centros de compras, supermercados, restaurantes e escritórios. Essas atividades passaram a responder por cerca de 23% da receita da *JR East* (SUZUKI, *et al.* 2015). O modelo resultou em uma sobretaxa imobiliária às operadoras aplicada pelo governo metropolitano, dado o impacto sobre o comércio tradicional de rua. Mais de um terço da receita da maior operadora ferroviária privada de Tóquio é não-tarifária, reduzindo a necessidade de subsídios públicos e permitindo investimentos contínuos.

A experiência de Tóquio mostra que operadoras ferroviárias podem rentabilizar sua presença territorial e fluxo diário de passageiros. Ao planejar empreendimentos ao longo das linhas, capturam a valorização gerada pelo transporte. Com isso, constroem sistemas financeiramente robustos, onde a tarifa é apenas uma das fontes de receita — complementada por aluguéis, vendas e serviços. Apesar das condições favoráveis do Japão (densidade, cultura ferroviária e mercado imobiliário desenvolvido), os princípios de integração transporte-urbanismo são replicáveis.

2.3. Londres (Reino Unido): Taxas Urbanas e Receitas Comerciais

Londres adota um modelo híbrido de financiamento ferroviário, combinando recursos públicos e privados para

viabilizar grandes projetos e equilibrar o orçamento operacional (SUZUKI, *et al.* 2015). Tradicionalmente subsidiado por governos central e municipal, o sistema passou a incorporar, nas últimas décadas, mecanismos de captura de valor local e receitas acessórias:

• Taxa sobre propriedades beneficiadas (*Business Rate Supplement*): Para financiar a linha Elizabeth (Crossrail), foi criada em 2010 uma contribuição adicional à taxa predial comercial de £ 0,02 (R$ 0,05 na cotação de 2010) do valor cadastral, aplicada a grandes propriedades não residenciais. A medida deve arrecadar £4,5 bilhões (R$ 11,97 bilhões na cotação de 2010) em 20 anos, cobrindo parte significativa do custo da obra (BUCK, 2017). Empresas beneficiadas pela nova linha contribuem progressivamente para o investimento.

• Contribuição de melhoria (*Community Infrastructure Levy*): Desde 2012, incorporadores imobiliários passaram a pagar uma taxa em novos empreendimentos próximos à rede, internalizando a valorização gerada pelo transporte com o setor imobiliário participando diretamente do financiamento da expansão (BUCK, 2017).

• Receitas comerciais e de publicidade: *A Transport for London* (TfL) vem ampliando receitas extra-tarifárias. Na temporada 2023/2024, arrecadou £237 milhões (R$ 1,64 bilhão na cotação de 2024) em publicidade. Além disso, explora áreas ociosas em estações e pátios com lojas, cafés, caixas eletrônicos e até *naming rights*, gerando aluguéis e vendas de imóveis (TfL, 2024). Embora essas receitas ainda sejam modestas frente às tarifas e subsídios (4,7%), crescem continuamente e ajudam no equilíbrio financeiro.

• Cobrança de congestionamento: Desde 2003, Londres cobra taxa de veículos que ingressam no centro. Em 2024, arrecadou £345,9 milhões (R$ 2,4 bilhões na cotação de 2024), destinado integralmente ao transporte público (TfL, 2024). Embora não atrelada a um projeto específico, a tarifa exemplifica uma política que inibe o uso do carro e financia o coletivo.

A experiência londrina demonstra que é politicamente viável captar recursos de beneficiários indiretos do transporte — como motoristas, empresas e incorporadores. A lógica do "valor compartilhado" assegura que quem se beneficia da infraestrutura contribua para seu custeio. Associada à exploração comercial dos ativos da TfL, essa abordagem permitiu financiar obras como o *Crossrail* com menor dependência do poder público e dos usuários (BUCK, 2017).

2.4. Paris (França): *Versement Transport* e Outros Instrumentos

Desde 1971, a França adota um modelo singular de financiamento do transporte urbano baseado no *Versement Mobilité* — um tributo parafiscal pago por empregadores urbanos com mais de 11 funcionários, destinado a subsidiar operação e investimentos no transporte público. As empresas devem contribuir com uma porcentagem sobre a folha salarial, variando conforme o porte da cidade (cerca de 2% na região de Paris e entre 0,5% e 1,5% em cidades menores) (DESCLOS e MINSTER, 2020). A lógica é que empresas se beneficiam da mobilidade urbana — independentemente de seus funcionários usarem o sistema — e, portanto, devem financiá-lo.

Em 2017, em Paris esse tributo correspondeu 42% das receitas operacionais dos sistemas de transporte. Isso viabilizou a expansão do metrô, dos trens RER e dos bondes, mantendo tarifas acessíveis (DESCLOS e MINSTER, 2020). Além disso, a operadora RATP explora receitas acessórias — como aluguéis em estações, publicidade e desenvolvimento imobiliário por meio de uma subsidiária, embora em escala menor que Hong Kong ou Tóquio.

Outro instrumento importante, comum a diversas capitais europeias como Paris e Londres, é a tarifação de estacionamento e rodízio pago de veículos, cujas receitas também são destinadas ao transporte coletivo. Essas medidas atuam tanto na moderação do uso do automóvel quanto na geração de receitas dedicadas.

Paris mostra como um sistema institucionalizado de financiamento, com base ampliada de contribuintes, pode reduzir a dependência de subsídios orçamentários diretos. A cobrança não se limita ao usuário, mas se estende a toda a sociedade local, especialmente aos setores que mais se beneficiam da mobilidade urbana. Essa diversificação fortalece a resiliência financeira e o equilíbrio operacional do sistema.

2.5. *Sotetsu Group* (Japão)

A *Sotetsu Holdings* é um exemplo relevante de aplicação bem-sucedida de estratégias de financiamento não-tarifárias no transporte ferroviário de passageiros. Atuando na região de Kanagawa, próxima a Tóquio, a empresa integra transporte, desenvolvimento urbano, hotelaria e comércio, adotando o conceito de *shared value* — geração simultânea de valor econômico e social a partir da infraestrutura ferroviária.

Embora a operação ferroviária seja seu núcleo, a sustentabilidade do grupo depende fortemente da

diversificação de receitas. Em 2022, mais de 50% da receita veio de fontes não-tarifárias (SOTETSU, 2023):

- Empreendimentos imobiliários ao longo das linhas, com projetos de uso misto (residencial, comercial e escritórios);
- Operação de shoppings e supermercados (como o Sotetsu Rosen), próximos às estações;
- Receitas de hotelaria e entretenimento, com hotéis urbanos integrados ao sistema ferroviário;
- Publicidade e locação de espaços comerciais nas estações;
- Serviços comunitários (escolas, clínicas e equipamentos urbanos), que atraem moradores e visitantes.

A gestão do grupo é orientada pelo conceito de "Estação como Polo de Vida", promovendo adensamento urbano e diversidade funcional em torno das estações, com foco em conveniência e acessibilidade. O relatório anual da empresa destaca a importância estratégica dos ativos imobiliários como fonte de receita e base de sustentação para a ferrovia.

A Sotetsu também atua na revitalização urbana e requalificação de bairros, usando a ferrovia como eixo estruturante. Isso permite internalizar os ganhos com a valorização fundiária — aproximando-se dos mecanismos de *land value capture* discutidos na literatura especializada.

Essa experiência japonesa mostra como o sucesso financeiro do transporte ferroviário depende de uma abordagem sistêmica e de longo prazo. Em vez de atuar como operadora isolada, a Sotetsu se posiciona como agente de gestão territorial e de valor urbano, demonstrando que a viabilidade econômica da ferrovia está diretamente ligada ao planejamento urbano integrado.

3. RECOMENDAÇÃO DE APLICABILIDADE AO BRASIL

O Brasil compartilha com os exemplos internacionais o desafio do subfinanciamento do transporte público. As tarifas raramente cobrem os custos operacionais e, nos sistemas ferroviários, os altos custos fixos agravam essa situação. Assim, torna-se essencial ampliar receitas não-tarifárias para viabilizar a expansão sustentável do setor. Algumas estratégias discutidas são replicáveis no país, desde que adaptadas ao seu contexto institucional e de mercado:

- Desenvolvimento Imobiliário Integrado: Inspirado pelos modelos de Hong Kong e Tóquio, o Brasil pode aproveitar áreas públicas próximas às estações metroferroviárias para empreendimentos em parceria com a iniciativa privada. Em São Paulo, a Companhia do Metrô já arrecada cerca de 5% de sua receita com exploração de imóveis e publicidade (SUZUKI, *et al.* 2015). Com a criação de braços imobiliários ou *joint ventures*, seria possível ampliar essa fonte de receita, integrando estações a centros comerciais, como já ocorre nos shoppings Metrô Tatuapé e Santa Cruz.
- Outorga Onerosa e CEPACs: O Brasil dispõe de instrumentos urbanísticos como os CEPACs em Operações Urbanas Consorciadas. São Paulo, pioneira na aplicação desses mecanismos, poderia vincular parte dos recursos arrecadados à expansão ferroviária, como nas Linhas 4 e 5 do Metrô (SUZUKI, *et al.* 2015). Isso exige coordenação entre Estado e município, algo ainda incipiente, mas fundamental para viabilizar essa forma de financiamento.
- Contribuições de Beneficiários e Tributos Dedicados: A exemplo do *Versement Mobilité* francês, o Brasil pode criar instrumentos como a "Cide-Mobilidade" — contribuição de empregadores com base na folha salarial. Também seria viável adotar formas de *tax increment financing*, retendo parte da valorização imobiliária nas áreas beneficiadas por novas linhas. São propostas desafiadoras politicamente, mas com grande potencial arrecadatório.
- Receitas Comerciais e Publicidade: No curto prazo, ampliar a exploração comercial em estações e trens é uma medida viável. Contratos de *naming rights*, expansão de espaços comerciais, concessões de serviços e aluguel de infraestrutura (como antenas ou fibra óptica) são formas já aplicadas, mas com espaço para crescimento. Enquanto Hong Kong arrecada cerca de R$ 2,22 por passageiro com receitas não-tarifárias, o Metrô de São Paulo arrecada apenas R$ 0,38 (SUZUKI, *et al.* 2015). A meta realista seria elevar esse valor para 15–20% da receita total.
- Desafios e Viabilidade: A replicação dos modelos exige que operadoras públicas desenvolvam competências em gestão imobiliária e estruturação de PPPs. Além disso, o marco legal deve permitir a vinculação de receitas urbanísticas ao transporte. Ciclos imobiliários, instabilidade fiscal e barreiras institucionais são obstáculos, mas podem ser enfrentados com planejamento gradual e diversificado, diluindo riscos e promovendo segurança jurídica aos investidores.

Princípios como "valor compartilhado", "desenvolvimento orientado ao transporte" e "diversificação de *funding*" são plenamente aplicáveis ao Brasil. Sua adoção pode transformar a sustentabilidade financeira do transporte ferroviário de passageiros, reduzindo a dependência tarifária e aumentando a resiliência dos sistemas. Ademais, iniciativas como a de Engenharia Territorial (Aragão *et. al*, 2019) parecem promissoras na tentativa de captar os ganhos financeiros por meio de multiplicadores fiscais, garantindo a financiabilidade pública de iniciativas onde o privado não assumiria a totalidade do empreendimento.

4. CONCLUSÃO

A análise bibliográfica e os casos estudados confirmam que o transporte ferroviário de passageiros tende estruturalmente ao déficit operacional quando baseado apenas em tarifas. Mesmo em sistemas eficientes, os altos custos de capital e manutenção raramente são cobertos integralmente pelo usuário, sobretudo diante da necessidade de tarifas acessíveis. O modelo historicamente adotado no Brasil deve envolver complementar a arrecadação tarifária com subsídios públicos e receitas não-tarifárias, reconhecendo o transporte coletivo como bem social gerador de benefícios amplos — como redução de congestionamentos, emissões e exclusão territorial. Este estudo demonstrou que há caminhos sustentáveis para financiar o gap operacional e de investimento e financiabilidade dos trens no Brasil. Em contextos asiáticos e europeus, a captura de mais-valia fundiária são exemplos empregados com sucesso para reinvestir parte da valorização imobiliária causada pela infraestrutura de transporte. O caso de Hong Kong evidencia a integração com projetos imobiliários pode tornar o metrô praticamente autossuficiente. Tóquio mostra como operadores ferroviários podem diversificar atividades e obter lucros expressivos com serviços associados. Londres e Paris, por sua vez, demonstram o potencial de instrumentos fiscais locais — como taxas sobre empresas e imóveis — para financiar grandes projetos, alinhando os interesses de diversos setores urbanos.

Para o Brasil, essas experiências trazem lições valiosas. Ampliar as receitas não-tarifárias exige inovação institucional, coordenação entre entes públicos e planejamento urbano-transportes integrado. Instrumentos já existentes, como CEPACs e outorga onerosa, devem ser aproveitados em sua plenitude com vinculação direta a projetos ferroviários. Novas formas de contribuição econômica — como taxas setoriais ou parcerias para desenvolvimento imobiliário — também devem ser consideradas, desde que com desenho transparente e foco na sustentabilidade. Em todos os casos, é fundamental que os recursos capturados retornem efetivamente ao sistema de transporte.

Portanto, a sustentabilidade financeira do transporte ferroviário exige romper com a dependência tarifária somente do usuário. Um mix equilibrado — com tarifas, subsídios bem calibrados e múltiplas fontes complementares — é essencial para manter e expandir os serviços com resiliência financeira. Se bem estruturado, o sistema pode se tornar um ativo estratégico, promovendo desenvolvimento urbano, econômico e social. Ao capturar parte do valor que gera, o transporte pode financiar sua própria evolução, consolidando um modelo virtuoso e duradouro para o Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGAO, J. & YAMASHITA, Y.; BRACARENSE, L.. (2019). Princípios da Engenharia Territorial Aplicados como Instrumento para o Crescimento e para o Desenvolvimento Econômico Territorial. Revista Brasileira de Gestao e Desenvolvimento Regional. 15. 194-207.

SUZUKI, H.; MURAKAMI, J.; HONG, Y.; TAMAYOSE, B. Financing Transit-Oriented Development with Land Values: Adapting Land Value Capture in Developing Countries. Washington, DC: World Bank, 2015.

CERVERO, R.; MURAKAMI, J. Rail + Property Development: A model of sustainable transit finance and urbanism. In: Environment and Planning A, v. 41, n. 8, p. 2048–2067, 2009.

BUCK, M., Crossrail Project: Finance, Funding and Value Capture for London's Elizabeth Line. In: ICE Publishing

TRANSPORT FOR LONDON (TfL). Annual Report and Statement of Accounts 2023/24. London, GB : Transport of London, 2024.

DESCLOS, T.; MINSTER, C. Alternative Revenue Sources for Urban Transport: Presentation and Discussion on the French Mobility Tax. CODATU; World Bank, 2020. Disponível em: https://www.codatu.org/en/alternative-revenue-sources-for-urban-transport-presentation-and-discussion-on-the-french-mobility-tax-by-thierry-desclos-clotilde-minster-world-bank/. Acesso em: 01 jun. 2025.

SOTETSU HOLDINGS INC. Integrated Report 2023. Yokohama: Sotetsu Group, 2023. Disponível em: https://www.sotetsu.co.jp/media/ir/en/library/integrated-report/2023/integrated-report-2023-e.pdf. Acesso em: 4 jun. 2025.

Fernando Marques Ely (fernando.ely@aluno.unb.br), Francisco Gildemir Ferreira da Silva (gildemir@ufc.br)
Universidade de Brasília – UnB, Programa de Pós-graduação em Transportes
Brasília/DF

IMPACTO DAS EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO DE SISTEMA BRT SOB O SISTEMA DE SAÚDE

Giangiulio Pietro Reis Cocco[1], Renato Guimarães Ribeiro[1], Guilherme de Castro Leiva[1], Simone Queiroz da Silveira Hirashima[1]
[1] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

RESUMO
A poluição emitida por veículos automotores tem ajudado a prejudicar a saúde da população, gerando vários problemas de saúde. A emissão de material particulado tem impactos sobre o sistema cardiovascular e respiratório, provocando múltiplos efeitos. A partir de uma análise em três etapas, envolvendo dados ambientais, epidemiológicos e econômicos, é possível estimar os efeitos das emissões de material particulado ($MP_{2,5}$) de uma frota de ônibus sobre a saúde pública e seus custos, que no caso em análise é a frota do BRT de Belo Horizonte, que mesmo com idade média superior a 8 anos, não impacta significativamente nos eventos de saúde ocorridos na cidade. A conclusão aponta que, nesse contexto, não se poderia utilizar a economia com gastos como forma de financiar mudanças sustentáveis no sistema. Além disso, estes impactos se mostram diretamente relacionados com o tamanho da frota e o impacto nas emissões gerais de material particulado na cidade.

1. INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa é assimilado ao uso de um cobertor que vem aumentando, ficando mais espesso, dificultando a saída de calor do planeta, provocando a elevação da temperatura média do planeta (Ramanathan e Feng, 2009). Além da preocupação sobre o aumento das temperaturas, o agravamento do aquecimento global tem provocado uma mudança no clima, intensificando a ocorrência de eventos climáticos severos, como chuvas volumosas, enchentes e ondas de calor (Otto, 2019). Este cenário vem se agravando ao longo dos anos, podendo causar danos irreversíveis a saúde e ao modo de vida das pessoas.

Os poluentes emitidos por veículos têm causado impactos significativos na saúde humana. Além de contribuírem para a poluição do ar, a exposição a estes gases pode estar está associada a uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias e cardiovasculares e a mortalidade prematura. Segundo Santana et al. (2020), estudos indicam que existe a correlação entre emissões veiculares e doenças respiratórias, destacando o aumento de hospitalizações devido a poluentes como MP, NO_x, e CO, principalmente em áreas com tráfego elevado.

A exposição aos gases poluentes pode causar pode causar irritação no nariz e nos olhos, alterações na função pulmonar, alterações respiratórias, dor de cabeça, fadiga e náusea, além de estar associada à tosse, produção de escarro e diminuição da função pulmonar (Sydbom *et al.*, 2001). Segundo Diaz-Sanchez, Proietti e Polosa (2003), a emissão de material particulado contribui significativamente para o aumento das ocorrências de doenças respiratórias, já que veículos a diesel podem liberar até 100 vezes mais partículas do que os motores a gasolina.

Na parte cardiovascular, a poluição atmosférica pode motivar ao incremento de casos de arritmias cardíacas, vasoconstrições, aumento da pressão arterial, isquemia miocárdica e cerebral e progressão da arteriosclerose (Santana *et al.*, 2020). A exposição a curto prazo ao material particulado proveniente da queima de combustíveis fósseis pode aumentar o risco cardiovascular agudo em até 3% (Rajagopalan *et al.*, 2018; Requia *et al.*, 2018)

As mortes e os custos com as doenças causadas por poluição do ar impactam significativamente a economia. Santana et al. (2020) destaca que, em São Paulo, estima-se que mais de 300 mil internações podem ter sido motivadas pela poluição, gerando um déficit na economia superior a 100 milhões de dólares.

Em Pequim, acredita-se que mais de 7.000 mortes prematuras podem sido influenciadas pela poluição (Tong *et al.*, 2020). Já Hao et al. (2023), estima que, em 2020, as emissões de material particulado dos veículos podem ter motivado a morte prematura de 34.000 habitantes, considerando a população das cidades de Pequim, Tianjin e Hebei. No mesmo estudo, além destas mortes prematuras, foram consideradas 45.500 internações e uma perda econômica de 129.965 bilhões de yuans, sendo o tráfego de caminhões e ônibus apontado como

principal vilão. Segundo Ma, Madaniyazi e Xie (2021), para a mesma região chinesa, a adoção de veículos elétricos até 2030, evitaria a morte prematura de 4.600 pessoas, evitaria 23,5 milhões de pessoas com alguma morbidade e salvaria 20,65 bilhões de yuans com internações, tratamentos e vidas perdidas.

Atualmente, com o forte apelo ambiental, tem-se uma janela de oportunidade interessante para avaliar os possíveis impactos econômicos das emissões de material particulado no sistema de saúde, podendo utilizar estes como meio de financiamento para o sistema em uma possível troca para veículos elétricos. Aproveitando-se desta oportunidade, este trabalho pretende estes impactos das emissões provenientes do sistema BRT de Belo Horizonte em vistas de uma possível alternativa de financiamento de uma transição para a implantação de veículos elétricos.

2. METODOLOGIA

Os cálculos para estimativa dos impactos das emissões de MP do sistema BRT se dividem em 3 partes:

- Parte ambiental: Este se baseia no cálculo das emissões de material particulado gerado pela frota em operação.
- Parte epidemiológico: Este se baseia na estimativa dos efeitos na morbimortalidade (mortes e internações) atribuíveis ao $MP_{2,5}$.
- Parte econômica: Este se baseia na valoração monetária dos impactos em saúde, tanto por custos diretos de internações quanto por perdas econômicas associadas à mortalidade prematura.

2.1 Parte ambiental

A abordagem da parte ambiental será apresentada por duas variáveis diferentes. A primeira variável será a taxa de emissão, expressada em t/ano, mostrando números totais das emissões para a frota em operação. A segunda variável será concentração destas emissões de $MP_{2,5}$, expressa em mcg/m³. Os efeitos ambientais são baseados nas emissões de material particulado, já que este poluente é capaz de chegar aos pontos mais profundos, como os alvéolos pulmonares e a circulação sanguínea. A presença no ar de elementos particulados em quantidades acima dos padrões de qualidade do ar pode, mesmo em seres humanos menos suscetíveis, afetar a respiração, agravar doenças cardiovasculares preexistentes ou afetar o sistema imunológico (André *et al.*, 2017).

Para o cálculo da taxa de emissões, é necessário identificar o impacto do transporte na poluição da capital mineira. Segundo Pereira Bales et al. (2013), é possível estimar as emissões utilizando índices como a massa de poluente emitida na queima do combustível, o tipo de frota por ano e a intensidade de uso. Para isso, são necessários dados como o consumo de combustível, percurso médio diário e a idade dos veículos, que são apresentados na tabela 1. Os dados foram trabalhados em planilha eletrônica, visando a construção de gráficos e tabelas, que subsidiem as conclusões esperadas.

Tabela 1: Variáveis adotadas para a cálculo das emissões.

Variável	Origem
Consumo de combustível	Os valores de consumo apresentados por ANTP (2017) ainda foram majorados em 33,83%, devido a presença de ar-condicionado nos veículos conforme D'Agosto, Gonçalves e Queiroz (2016). Mesmo critério adotado para cálculo do custo
Percurso médio diário	Dados operacionais do sistema de bilhetagem eletrônica (CITOP®)
Idade dos veículos	Banco de dados de frotas
Fator de emissão para veículos a diesel	Relatório de emissões veiculares CETESB

Para cálculo da concentração de material particulado, segundo André et al. (2017), é necessário demonstrar a representatividade da frota dentro das concentrações detectadas para a cidade. A figura 1 mostra a sequência de cálculo para estimativa da concentração de $MP_{2,5}$ emitida pela frota do MOVE.

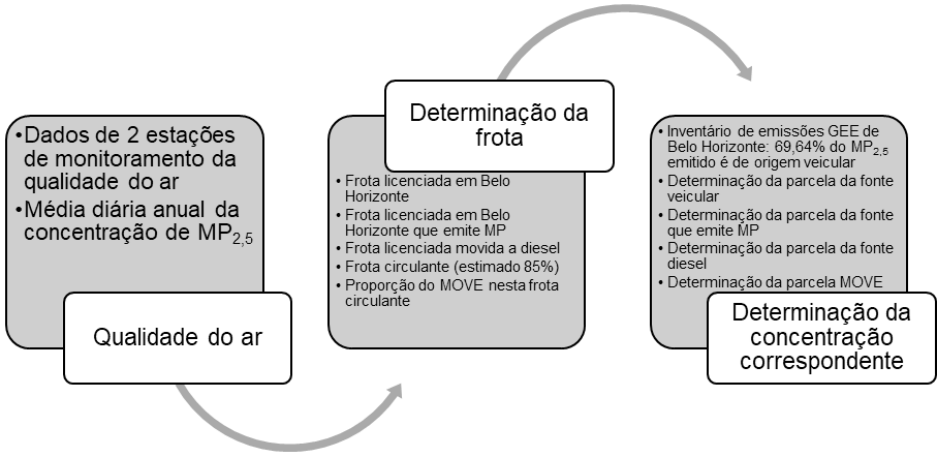


Figura 1: Metodologia aplicada para estimativa da concentração de $MP_{2,5}$ emitida pela frota do MOVE

2.2 Parte epidemiológica

O cálculo de mortes e internações públicas atribuíveis ao $MP_{2,5}$ será feito utilizando os dados de mortalidades e morbidades registrados no SIH/DATASUS, conforme os critérios apresentados na tabela 2, segundo André et al. (2017).

Tabela 2: Critérios para seleção dos dados do SIH/DATASUS para mortes e morbidades possivelmente relacionadas com a poluição do ar.

Grupo	Subgrupo	Grupos CID-10	Grupos Etários
Mortalidade	Todas as mortes	Todos (capítulo I a XVI da CID-10)	Todos
Internações e gastos	Câncer	Neoplasia maligna de traqueia brônquios e pulmões	40 anos e mais
	Cardiovascular	Acidente vascular cerebral não especificado como hemorrágico ou isquêmico	40 anos e mais
		Hemorragia intracraniana	
		Infarto agudo do miocárdio	
		Infarto cerebral	
		Outras doenças isquêmicas do coração	
	Doenças Respiratórias em crianças	Pneumonia	Até 5 anos
	Doenças Respiratórias em idosos	Bronquite, enfisema e outras doenças pulmonares obstrutivas crônicas	60 anos e mais
		Asma	
		Pneumonia	

Os eventos de saúde relacionados com a concentração de material particulado são determinados pelo modelo de regressão de Poisson (Rothman e Greenland, 1998 apud André et al., 2017), apresentado na equação 1:

$$Eventos_{\Delta\, Conc} = (e^{(\beta \times \Delta\, Conc)} - 1) \times Eventos_{Totais} \quad (1)$$

onde $Eventos_{\Delta\, Conc}$ é a estimativa dos eventos de saúde para a dada variação de concentração de material particulado, Δ Conc é a variação de concentração de material particulado, $Eventos_{Totais}$ são os números totais de eventos observados e β é o coeficiente de regressão, geralmente obtido de estudos epidemiológicos, apresentados na tabela 3, segundo André et al. (2017).

Tabela 3: Coeficientes de regressão beta conforme o evento de saúde.

Mortalidade e morbidade	Beta	Referência
Mortalidade	0,00583	WHO, 2006
Cardiovascular 40 a 59 anos	0,00133	Anderson et al., 2003
Cardiovascular 60 a 69 anos	0,00198	Conceição et al., 2006
Cardiovascular acima de 69 anos	0,00228	Ulirsch et al., 2007
Respiratório 0 a 4 anos	0,00395	Gouveia et al., 2006
Respiratório 60 a 69 anos	0,00363	Gouveia et al., 2006
Respiratório acima de 69 anos	0,0105	Cançado et al., 2006
Câncer pulmão acima de 40 anos	0,00862	Hamra et al., 2014

2.3 Parte econômica

A valoração econômica dos impactos em saúde é composta com os custos das internações e os custos das mortes atribuídas. Quanto ao custo das internações, considerou-se o valor médio da internação por cada evento pelas faixas etárias analisadas dentro do cenário proposto. O custo médio por evento é obtido através dos registros existentes do SIH/DATASUS.

O impacto da mortalidade na economia, através do cálculo da perda de produtividade baseada em anos de vida perdidos, considerando a faixa etária produtiva da população, conforme exemplificado pela equação 2:

$$Custo_{morte} = YLL \times Rend_{mensal} = N \times L \times Rend_{mensal} \quad (2)$$

onde, YLL são os anos de vida perdidos devido à morte, N são mortes atribuíveis ao evento de saúde e L é a expectativa de vida restante na idade média de morte. Os dados de renda média foram obtidos através da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A frota do MOVE, que neste cenário, é composta por 485 veículos, com data de fabricação entre 2013 e 2024. Com isso, a frota possui parâmetros de emissões de acordo com o PROCONVE P7 (em sua maioria) e PROCONVE P8. Estimando 250 dias úteis em um ano e o percurso médio diário de 250 km, multiplicando pelos respectivos fatores de emissão fornecidos pela CETESB (2024), o sistema BRT emite 576 g de material particulado por ano.

Diariamente, com base nas medições das estações de monitoramento da qualidade do ar, em Belo Horizonte, a média diária concentração de $MP_{2,5}$ é de 12,63 mcg/m^3, considerando todas as fontes de emissão (MINAS GERAIS, 2023).

Para o mês de setembro de 2024, Belo Horizonte tem uma frota de 2.667.065 veículos (BRASIL, 2024). Destes veículos, apenas não emitem $MP_{2,5}$ aqueles movidos a etanol e a eletricidade. Isto representa uma frota residual de 2.572.021 veículos. Considerando apenas os veículos a diesel e que a frota circulante representa 85% deste total, tem-se que a frota do MOVE representa 0,30% da frota circulante.

Com base no cálculo da frota e que a fonte veicular é responsável por 69,64% das emissões de $MP_{2,5}$ (PETROBRAS, 2018), é possível estimar qual a parcela de contribuição do MOVE na concentração medida nas estações de monitoramento da qualidade do ar. O MOVE é responsável por 0,002 mcg/m^3. A tabela 4 apresenta os cálculos para a chegada desta estimativa. A baixa representatividade da frota do MOVE influencia diretamente na parcela de contribuição na concentração total.

Tabela 4: Cálculos da estimativa da concentração da parcela da frota do MOVE.

Situação frota	Veículos	%	Situação $MP_{2,5}$	Concentração	%
Frota registrada	2.667.065	-	Média diária anual	12,63 mcg/m^3	-
Frota circulante	2.267.005	85%	Determinação da fonte veicular	8,79 mcg/m^3	69,64%
Frota que emite MP	2.186.218	96%	Determinação da parcela que emite MP	8,48 mcg/m^3	96%
Frota diesel	162.495	7%	Determinação da parcela diesel	0,63 mcg/m^3	7%
Frota MOVE	485	0,30%	Determinação da parcela MOVE	**0,002 mcg/m^3**	0,30%

A partir da parcela obtida e com base no modelo de regressão, é possível estimar o impacto na saúde (0,002 mcg/m^3). O cenário inicial é representado pela concentração da parcela diesel (0,63 mcg/m^3). A parcela da concentração da frota a diesel motiva 0,32% dos eventos de saúde destacados.

Por sua vez, a MOVE não é capaz, de maneira isolada, de motivar quaisquer eventos de saúde por consequência da concentração de $MP_{2,5}$, mesmo a frota tendo idade média superior a 08 anos, motivando 0,076 mortes e 0,125 eventos de comorbidades em um ano. Com base nos custos médios de internação de cada evento de saúde para cada faixa etária selecionada, o impacto econômico na saúde é de R$ 292,43, mesmo sem a ocorrência de eventos dentro de um ano. Expandindo para este impacto para o cenário atual do sistema, que tem 11 anos de implantação, estima-se que o impacto foi de aproximadamente R$ 3.216,76.

Quanto as mortes atribuídas a parcela de emissão da frota do MOVE, considerando a idade média dos óbitos totais de 2024 de 39,24 anos e a expectativa de vida para 2024 de 77,6 anos (IBGE, 2025), a rendimento mensal para 2024 de R$ 4.340,50 (IBGE, 2024), tem-se o custo anual de R$ 12.655,12 com as mortes atribuídas.

4. CONCLUSÕES

No caso de Belo Horizonte e, particularmente, dentro do cenário proposto, essa alternativa se mostra inviável para manutenção de uma possível adoção de veículos elétricos no sistema BRT. A frota não exerce um impacto significativo na poluição, mesmo tendo uma idade média elevada. Neste ponto, podem-se destacar 2 fatores. O primeiro seria este baixo impacto, fruto das normas de controle de emissões, que em um processo iniciado há mais de 30 anos, vem apresentando resultados na melhoria da poluição atmosférica.

O segundo ponto está na representatividade do tamanho da frota do BRT frente a frota registrada. A parcela da frota em circulação neste estudo foi estimada, já que a frota de veículos da capital mineira é "inflada" com veículos que necessariamente não rodam na cidade. Isto reforça também certa precariedade de dados, principalmente quanto à atualização do inventário de emissões para a região de Belo Horizonte, que dificulta a segregação da parte diesel veicular.

A título de comparação, mesmo considerando a frota inteira de ônibus urbanos que operam sob gestão do município de Belo Horizonte (2.700 ônibus), o impacto não superaria R$ 2.000,00 em um ano, somente as internações. Em um município como São Paulo, onde a frota de ônibus urbanos é significativamente maior, considerando os dados locais de saúde e uma concentração de $MP_{2,5}$ superior, o impacto seria de R$ 46.569.865, em um cenário entre 2017 e 2050 (André *et al.*, 2017).

Este estudo demonstra que os impactos econômicos da poluição na saúde são diretamente relacionados ao tamanho da frota e a distribuição das fontes de emissões de material particulado na área de estudo. Em frotas expressivas, os gastos com saúde evitados com uma possível substituição das fontes de propulsões no transporte coletivo, podem ser uma alternativa de receita para financiamento do sistema. Entende-se também que parte da aplicação das hipóteses apresentadas dependem também de certo rigor político quanto a destinação de recursos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CEFET-MG, da CAPES, do CNPQ e da FAPEMIG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

André, P. A. de, Vormittag, E. da M. P. A. de A., e Saldiva, P. H. N. (2017) *Avaliação e valoração dos impactos da poluição do ar na saúde da população decorrente da substituição da matriz energética do transporte público na cidade de São Paulo*. São Paulo. Obtido de https://www.greenpeace.org.br/hubfs/Campanhas/mobilidade/documentos/GP_ISS_Relatorio_ImpactosOnibusSP.pdf

BRASIL (2024). *Quantidade de Veículos por UF Município e Combustível: Setembro/2024*. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2024. Acesso em: 11 abr. 2025.

CETESB (2024). *Fator de emissão*. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2025/03/Fator-de-emissao-2023.xlsx. Acesso em: 11 abr. 2025.

Diaz-Sanchez, D., Proietti, L., e Polosa, R. (2003) Diesel fumes and the rising prevalence of atopy: An urban legend? *Current Allergy and Asthma Reports*, *3*(2), 146–152. doi:10.1007/S11882-003-0027-4/METRICS

Hao, Y. P., Song, X. W., Zhu, X. D., Wang, J. W., e Cheng, P. (2023) [Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region]. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*, *44 12*(12), 6610–6620. doi:10.13227/J.HJKX.202302096

IBGE (2024). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: Contínua trimestral*. Brasília. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5436#/n6/3106200/v/5932/p/last%204/c2/6794/l/v,p+c2,t/resultado. Acesso em: 15 abr. 2025.

Ma, C., Madaniyazi, L., e Xie, Y. (2021) Impact of the Electric Vehicle Policies on Environment and Health in the Beijing–Tianjin–Hebei Region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(2), 1–14. doi:10.3390/IJERPH18020623

Otto, F. (2019) Attribution of extreme weather events: how does climate change affect weather? *Weather*, *74*(9), 325–

326. doi:10.1002/WEA.3610

Pereira Bales, M., Dias, C., e Regina da Silva, S. (2013) Estimativa de emissões de poluentes e GEE em frotas: Aplicação Prática. *Anais eletrônicos do 19o Congresso Brasileiro de Transportes e Trânsito*. ANTP, Brasilia.

PETROBRAS. (2018) *Atualização do Inventário das Fontes de Emissão de Poluentes Atmosféricos da Região de Belo Horizonte, Contagem e Betim*. Disponível em: https://liferay.meioambiente.mg.gov.br/documents/38374/7315303/Relatório_Técnico_Inventário_RMBH/303a4eb1-71ad-53a7-aac8-82398a580e4c

Rajagopalan, S., Al-Kindi, S. G., e Brook, R. D. (2018) Air Pollution and Cardiovascular Disease: JACC State-of-the-Art Review. *Journal of the American College of Cardiology*, *72 17*(17), 2054–2070. doi:10.1016/J.JACC.2018.07.099

Ramanathan, V., e Feng, Y. (2009) Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, *43*(1), 37–50. doi:10.1016/J.ATMOSENV.2008.09.063

Requia, W. J., Adams, M. D., Arain, A., Papatheodorou, S., Koutrakis, P., e Mahmoud, M. (2018) Global Association of Air Pollution and Cardiorespiratory Diseases: A Systematic Review, Meta-Analysis, and Investigation of Modifier Variables. *American Journal of Public Health*, *108*, 123–130. doi:10.2105/AJPH.2017.303839

Santana, J. C. C., Miranda, A. C., Yamamura, C. L. K., Filho, S. C. da S., Tambourgi, E. B., Ho, L. L., e Berssaneti, F. T. (2020) Effects of Air Pollution on Human Health and Costs: Current Situation in São Paulo, Brazil. *Sustainability*, *12*(12). doi:10.3390/SU12124875

SEMAD-MG (2023). *Dados do Monitoramento Contínuo da Qualidade do ar: Estação PUC São Gabriel 2023 - BH - Regap. Belo Horizonte*. Disponível em: https://semad.mg.gov.br/documents/d/semad/estacao-puc-sao-gabriel-2023-bh-regap. Acesso em: 11 abr. 2025.

Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandström, T., e Dahlén, S. E. (2001) Health effects of diesel exhaust emissions. *The European respiratory journal*, *17 4*(4), 733–46. doi:10.1183/09031936.01.17407330

Tong, R., Liu, J., Wang, W., e Fang, Y. (2020) Health effects of PM2.5 emissions from on-road vehicles during weekdays and weekends in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, *223*. doi:10.1016/J.ATMOSENV.2019.117258

Giangiulio Pietro Reis Cocco (giangiuliococco@hotmail.com)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Amazonas, nº 5.253 - Sala 101, Nova Suiça, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Guilherme de Castro Leiva (guilherme.leiva@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Amazonas, nº 5.253 - Sala 101, Nova Suiça, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Renato Guimarães Ribeiro (renato.ribeiro@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Amazonas, nº 5.253 - Sala 101, Nova Suiça, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Simone Queiroz da Silveira Hirashima (simonehirashima@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Departamento de Engenharia Civil
Av. Amazonas, nº 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG, Brasil.

MAIS DÍVIDA, MAIS RETORNO? A RELAÇÃO ENTRE CAPITAL DE TERCEIROS E RENTABILIDADE NAS CONCESSÕES FERROVIÁRIAS BRASILEIRAS

Francisco Gildemir F. Silva[1], Raphael Vieira dos Santos[2]
[1]Universidade Federal do Ceará – UFC/Universidade de Brasília – UnB, [2]Universidade de Brasília – UnB

RESUMO
Este estudo investigou se maiores níveis de endividamento produzem rentabilidades superiores nas concessões ferroviárias federais brasileiras. Foram analisados dados contábeis de doze operadoras entre 2007 e 2023, com foco na relação entre o Capital de Terceiros e o Retorno sobre Patrimônio Líquido (ROE). A aplicação de estatísticas descritivas, ANOVA, testes não paramétricos e correlações por concessão, em caráter exploratório, revelou que, apesar da crescente mobilização de dívida, a alavancagem mostrou associação predominantemente fraca ou negativa com a rentabilidade em boa parte das operadoras. Os achados sugerem que mais dívida não significa, necessariamente, mais retorno, e reforçam o uso da estatística descritiva como etapa preliminar para organizar indicadores e subsidiar futuras análises econométricas que busquem aprofundar a relação entre endividamento e desempenho no longo prazo.

Palavras-Chave: Estrutura de Capital; Alavancagem Financeira; Rentabilidade; Concessões Ferroviárias; Debêntures Incentivadas

1. INTRODUÇÃO

O financiamento e a sustentabilidade econômico-financeira das concessões ferroviárias brasileiras tornaram-se temas centrais desde os anos 1990, quando as concessões buscaram atrair investimentos privados e modernizar operações em um contexto de restrição fiscal (Frischtak et al., 2016; Santos Silva, 2022). Nesse processo, a estrutura de capital das concessionárias passa a ser determinantes para viabilizar investimentos, honrar obrigações contratuais e resistir a ciclos adversos. A escolha por maiores níveis de capital de terceiros pode expandir a capacidade de investimento, mas também elevar riscos financeiros e pressões sobre o fluxo de caixa, afetando o retorno ao acionista. A literatura destaca que esse *trade-off* entre dívida e rentabilidade é particularmente relevante em setores regulados e intensivos em ativos fixos (Modigliani & Miller, 1958; Myers, 2001). No caso brasileiro, Ferreira Da Silva & Rocha (2024) analisam a estrutura de capital das concessionárias ferroviárias brasileiras e identificaram que essas parecem seguir majoritariamente a teoria *pecking order*. Isto posto, o presente estudo busca analisar, de forma descritiva, a relação entre alavancagem financeira e rentabilidade do patrimônio (ROE) nas concessões ferroviárias federais entre 2007 e 2023, oferecendo evidências que contribuam para estratégias de captação, gestão de riscos e fortalecimento do equilíbrio econômico dos contratos.

2. DÍVIDA, RETORNO E CONCESSÕES FERROVIÁRIAS: O QUE DIZ A LITERATURA?

O debate sobre a sustentabilidade econômico-financeira das concessões ferroviárias brasileiras tem se apoiado majoritariamente em análises normativas que descrevem a evolução dos instrumentos legais e das expectativas regulatórias para mobilizar capital privado. Frischtak et al. (2022) e Rocha (2023) destacam o potencial das debêntures incentivadas e do *project finance* para estruturar investimentos de longo prazo, mas reconhecem que persistem assimetrias de acesso ao crédito e uma alta concentração empresarial. Embora a literatura internacional traga valiosas contribuições sobre a relação entre estrutura de capital e desempenho financeiro em contextos de parcerias público-privadas (Algaard & Lines, 2020; Kravchenko et al., 2020), no Brasil prevalecem estudos descritivos e pouco afeitos a evidências empíricas aplicadas ao segmento ferroviário. Grande parte das análises concentra-se em mapear o desenho institucional das concessões e os dilemas regulatórios, mas dedica pouca atenção aos impactos da alavancagem sobre o retorno ao acionista (Frischtak et al., 2016, 2022; Rocha, 2023; Santos Silva, 2022).

Essa lacuna não é trivial: a escassez de séries históricas consistentes de indicadores contábeis compromete o diagnóstico da robustez financeira das operadoras e limita sua capacidade de atrair capital privado de forma sustentável. Embora Pereira & Miterhof (2021) e Santos Silva (2022) tenham avançado na discussão sobre a eficiência fiscal das debêntures, seus trabalhos não detalham como diferentes graus de endividamento se conectam à rentabilidade ao longo do ciclo das concessões. Se, internacionalmente, cresce o consenso de que a estrutura de capital molda tanto a percepção de risco quanto a capacidade de sustentar liquidez e rentabilidade frente a choques regulatórios ou macroeconômicos (Ray & Bisbey, 2020; Suyunchev & Mozgovaya, 2016),

no Brasil ainda carece pesquisas que investigam de forma longitudinal como a alavancagem efetivamente dialoga com o desempenho financeiro das ferrovias.

3. ABORDAGEM DESCRITIVA DA RELAÇÃO ENTRE ALAVANCAGEM E RENTABILIDADE

A presente investigação adota um enfoque quantitativo, de caráter exploratório-descritivo, voltado a sistematizar dados financeiros de doze concessões ferroviárias federais brasileiras entre 2007 e 2023, com base nos registros da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Embora as técnicas adotadas não capturem dependência temporal ou relações causais, elas permitem sistematizar evidências descritivas comparativas entre concessões, funcionando como ponto de partida para análises econométricas mais aprofundadas. A seleção e o tratamento das variáveis seguiram critérios de consistência e comparabilidade contábil (Schroeder, 2010; Ross et al., 2015), reconhecendo as limitações inerentes à utilização de dados agregados em séries históricas (Wooldridge et al., 2010). As concessionárias analisadas incluem Estrada de Ferro Carajás (EFC), Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), Ferrovia Norte-Sul – Trecho Norte (FNSTN), Ferrovia Tereza Cristina (FTC), Ferrovia Transnordestina Logística (FTL), Malha Regional Sudeste (MRS), Rumo Malha Norte (RMN), Rumo Malha Oeste (RMO), Rumo Malha Paulista (RMP), Rumo Malha Sul (RMS) e Estrada de Ferro de Porto Alegre (EFPO).

O estudo concentrou-se na análise de dois indicadores: Capital de Terceiros, definido como a razão entre Passivo Total e Patrimônio Líquido, representando o grau de alavancagem financeira; e Retorno sobre Patrimônio Líquido (ROE), que expressa a rentabilidade atribuída aos acionistas. Ambos os indicadores possuem respaldo na literatura de finanças corporativas (Modigliani & Miller, 1958; Myers, 2001) e na análise de risco em empresas de infraestrutura (Ray & Bisbey, 2020). Foram calculadas medidas descritivas (média, mediana, variância, desvio padrão, curtose e extremos), aplicados testes de normalidade (Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (Bartlett e Levene) e comparação multigrupo por ANOVA e Kruskal-Wallis, conforme aderência às premissas paramétricas (Hair et al., 2009). Por fim, estimaram-se correlações de *Pearson* e *Spearman* em cada concessão, compondo um retrato comparativo entre as duas variáveis de interesse nesse estudo. Todas as análises foram realizadas no RStudio, com *scripts* reprodutíveis (de Lima et al., 2022).

4. O QUE OS NÚMEROS REVELAM SOBRE AS FERROVIAS

O indicador Capital de Terceiros revelou ampla heterogeneidade entre as concessões ferroviárias analisadas. Rumo Malha Norte (RMN) e Rumo Malha Oeste (RMO) apresentaram médias de alavancagem substancialmente superiores às demais, com valores de 24,657 e 12,739, respectivamente, evidenciando dependência expressiva de capital de terceiros e forte dispersão, como demonstrado pelos elevados desvios padrão (67,732 e 24,991) e máximos registrados (210,124 e 98,210). Por outro lado, Estrada de Ferro de Porto Alegre (EFPO) manteve os menores níveis médios (0,047) e variabilidade praticamente nula, sugerindo estrutura de capital marcadamente conservadora. Observa-se também que Estrada de Ferro Carajás (EFC), Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) e Ferrovia Transnordestina Logística (FTL) apresentaram níveis médios próximos a 0,5, caracterizando perfis de alavancagem intermediária, enquanto a Ferrovia Tereza Cristina (FTC) destacou-se pelo alto coeficiente de curtose (15,055), evidenciando que a distribuição dos valores apresenta caudas mais pesadas e maior frequência de extremos em relação à média.

Tabela 1: Estatística descritiva do Capital de Terceiro entre os anos de 2007 e 2023 das Concessões Ferroviárias Brasileiras

Ferrovia	Média do Capital de Terceiros	Mediana do Capital de Terceiros	Variância do Capital de Terceiros	Desvio Padrão do Capital de Terceiros	IQR do Capital de Terceiros	Curtose do Capital de Terceiros	Mínimo do Capital de Terceiros	Máximo do Capital de Terceiros
RMN	24.657	0.697	4587.580	67.732	0.216	6.660	0.222	210.124
RMO	12.739	2.466	624.551	24.991	11.828	10.506	0.759	98.210
FTC	1.446	0.948	4.246	2.061	0.054	15.055	0.895	9.441
RMP	0.877	0.934	0.021	0.146	0.202	2.381	0.568	1.044
MRS	0.810	0.614	0.741	0.861	0.059	14.993	0.521	4.146
RMS	0.759	0.735	0.033	0.183	0.313	1.939	0.574	1.103

EFC	0.571	0.706	0.033	0.181	0.329	1.162	0.341	0.774
FCA	0.568	0.584	0.094	0.306	0.274	2.157	0.070	1.061
FTL	0.525	0.490	0.034	0.184	0.260	2.189	0.260	0.898
EFVM	0.451	0.438	0.015	0.121	0.095	2.474	0.222	0.653
FNSTN	0.248	0.217	0.016	0.126	0.174	2.283	0.119	0.502
EFPO	0.047	0.056	0.000	0.020	0.022	2.811	0.005	0.070

No que se refere ao Retorno sobre Patrimônio Líquido (ROE), os resultados também evidenciam marcadas diferenças entre as operadoras. A FTC apresentou a maior média (2,948) e desvio padrão (9,160), com valores extremos que alcançaram 37,132, refletindo variações expressivas de rentabilidade. Em contrapartida, RMO e RMS apresentaram médias negativas (-0,775 e -0,422) associadas a elevada dispersão, sugerindo histórico de resultados operacionais desfavoráveis. Estrada de Ferro Carajás (EFC), EFVM, FNSTN, MRS, RMN e RMP apresentaram médias positivas e relativamente estáveis, com menor variância e distribuição concentrada próxima de zero, enquanto EFPO, FCA e FTL registraram médias próximas ou abaixo de zero, indicando rentabilidade mais restrita. A análise das medidas de curtose evidencia que FTC (12,917) e EFPO (10,815) concentram distribuições com caudas mais pesadas, reforçando a existência de períodos de resultados atípicos.

Tabela 2: Estatística descritiva do Retorno sobre o Patrimônio Líquido (ROE) entre os anos de 2007 e 2023 das Concessões Ferroviárias Brasileiras

Ferrovia	Média do ROE	Mediana do ROE	Variância do ROE	Desvio Padrão do ROE	IQR do ROE	Curtose do ROE	Mínimo do ROE	Máximo do ROE
FTC	2.948	0.494	83.911	9.160	0.559	12.917	-2.254	37.132
RMP	0.514	0.131	7.684	2.772	0.672	6.209	-5.133	8.300
RMN	0.260	0.249	0.030	0.173	0.155	2.566	0.027	0.634
MRS	0.244	0.175	0.049	0.221	0.089	6.134	0.099	0.882
EFC	0.131	0.097	0.018	0.135	0.188	2.706	-0.030	0.442
EFVM	0.118	0.114	0.017	0.128	0.169	3.362	-0.050	0.442
FNSTN	0.103	0.104	0.005	0.071	0.051	4.269	-0.005	0.278
EFPO	-0.025	-0.026	0.001	0.027	0.013	10.815	-0.050	0.071
FTL	-0.138	-0.044	0.030	0.172	0.174	7.970	-0.704	-0.001
FCA	-0.139	-0.015	0.130	0.360	0.101	7.705	-1.282	0.102
RMS	-0.422	-0.164	0.627	0.792	0.232	8.944	-2.860	-0.024
RMO	-0.775	0.116	3.245	1.801	0.612	4.122	-5.343	0.292

Os testes de normalidade e homogeneidade de variâncias indicaram, ao nível de significância de 5%, que as distribuições dos indicadores não seguem padrões normais, conforme os p-valores extremamente baixos. Os testes apontam para a validade da hipótese nula quando $p > 0.05$, e a validade da hipótese alternativa quando $p \leq 0.05$. Assim, nos testes de Shapiro-Wilk (teste paramétrico, cuja hipótese nula indica normalidade da distribuição, com $p \approx 1.1e\text{-}28$ para Capital de Terceiros, e $p \approx 1.1e\text{-}27$ para o ROE) e Bartlett (teste paramétrico, cuja hipótese nula indica variâncias iguais, com $p \approx 1.1e\text{-}270$ para Capital de Terceiros, e $p \approx 1.1e\text{-}153$ para o ROE), podemos inferir certa heterogeneidade na distribuição. O teste de Levene (teste não paramétrico, cuja hipótese nula aponta para variâncias contínua, com $p \approx 3.0e\text{-}02$ para Capital de Terceiros e $p \approx 4.8e\text{-}02$) rejeitou parcialmente a homocedasticidade, apontando heterogeneidade moderada para ambos os indicadores. Na comparação multigrupo (doze concessões), a ANOVA (teste paramétrico, cuja hipótese nula indica médias iguais) e o teste de Kruskal-Wallis (teste não paramétrico, cuja hipótese nula indica distribuição idêntica entre os grupos analisados) revelaram diferenças significativas no Capital de Terceiros (ANOVA, $p \approx 3.0e\text{-}02$ e Kruskal-Wallis, $p \approx 4.7e\text{-}23$), enquanto para o ROE a ANOVA indicou não significância marginal ($p \approx 8.985e\text{-}02$), e apenas o teste não paramétrico (Kruskal-Wallis, $p \approx 1.2e\text{-}14$) rejeitou a igualdade entre grupos, reforçando a necessidade de cautela interpretativa.

Tabela 3: Testes de Normalidade e Homocedasticidade

Indicador	p-valor Shapiro-Wilk	p-valor Bartlett	p-valor Levene	p-valor ANOVA	p-valor Kruskal-Wallis
Capital de Terceiros	1.072e-28	1.129e-270	3.572e-02	3.014e-02	4.741e-23
ROE	1.112e-27	3.057e-153	4.847e-02	8.985e-02	1.189e-14

Os coeficientes de correlação estimados mostram que a maioria das concessões apresentou relação negativa entre alavancagem e rentabilidade no método de *Pearson*, com destaque para a FTL (-0.545, p-valor: 2.356e-02) e RMS (-0.489, p-valor: 1.070e-01, não significativo ao nível de 5%), sugerindo que dívidas mais elevadas tenderam a coincidir com menor retorno. Já RMP e EFC exibiram correlações positivas, ainda que modestas, indicando que em alguns contextos a alavancagem pode conviver com rentabilidade sem prejuízo aparente. No método de *Spearman*, RMS teve o coeficiente mais negativo (-0.762, p-valor de 5.897e-03), sinalizando forte relação inversa monotônica, enquanto RMP alcançou o maior valor positivo (0.304, p-valor de 2.708e-01). Esses contrastes reforçam que, ao contrário da expectativa de causalidade direta, mais dívida não assegura rentabilidade consistente e pode, em muitos casos, expor fragilidades estruturais no desempenho financeiro das concessões.

Tabela 4: Correlação entre Capital de Terceiros e ROE

Ferrovias	Coeficiente Pearson	p-valor Pearson	Coeficiente Spearman	p-valor Spearman
RMP	0.165	5.570e-01	0.304	2.708e-01
EFC	0.104	6.918e-01	0.216	4.042e-01
FNSTN	0.060	8.524e-01	0.189	5.578e-01
EFPO	-0.049	8.510e-01	-0.276	2.835e-01
FTC	-0.052	8.429e-01	0.219	3.973e-01
MRS	-0.060	8.180e-01	0.296	2.495e-01
RMN	-0.163	5.310e-01	0.044	8.686e-01
FCA	-0.185	4.780e-01	0.071	7.874e-01
EFVM	-0.336	1.874e-01	-0.424	9.131e-02
RMO	-0.360	1.874e-01	0.264	3.401e-01
RMS	-0.489	1.070e-01	-0.762	5.897e-03
FTL	-0.545	2.356e-02	-0.358	1.588e-01

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES PARA O SETOR FERROVIÁRIO

Os achados deste estudo tensionam a hipótese de que mais dívida necessariamente produzirá retornos superiores nas concessões ferroviárias brasileiras. Ressalta-se, contudo, que a análise tem caráter exploratório e descritivo, limitando-se a organizar indicadores e apontar padrões comparativos entre operadoras. Avanços futuros exigem a aplicação de instrumentos econométricos mais robustos, como modelos de painel dinâmicos, testes de estacionariedade, cointegração e causalidade, capazes de captar relações temporais e de longo prazo. A correlação predominantemente fraca ou negativa entre alavancagem e rentabilidade sugere que, isoladamente, a expansão do capital de terceiros não assegura desempenho consistente, sobretudo diante de passivos de curto prazo, volatilidade operacional e assimetrias regulatórias.

A presença de concessões com níveis elevados de endividamento e ROE negativos, como Rumo Malha Oeste e RMS, mostra que o custo da dívida pode suplantar seus benefícios, comprimindo resultados ao acionista. Nesse contexto, as debêntures incentivadas de infraestrutura (Lei nº 12.431/2011; Lei nº 14.801/2024) emergem como instrumento promissor para alinhar prazos de financiamento ao ciclo de investimentos de longo prazo, mas seu impacto positivo sobre a rentabilidade dependerá da integração entre disciplina financeira, eficiência operacional e credibilidade perante investidores. A evidência comparativa sugere, portanto, que a

sustentabilidade não decorre apenas do volume de dívida mobilizado, mas da qualidade do passivo e da clareza sobre sua destinação estratégica, abrindo uma agenda de pesquisa sobre como as debêntures incentivadas podem reconfigurar a relação entre endividamento e desempenho financeiro no setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Algaard, E. M., & Lines, R. D. (2020). Railway infrastructure portfolio management in the UK. *Infrastructure Asset Management*, *7*(1), 15–24. https://doi.org/10.1680/jinam.18.00012

de Lima, D. A., Helito, C. P., de Lima, L. L., Clazzer, R., Gonçalves, R. K., & de Camargo, O. P. (2022). How to perform a meta-analysis: a practical step-by-step guide using R software and RStudio. *Acta Ortopédica Brasileira*, *30*(3), e248775. https://doi.org/10.1590/1413-785220223003E248775

Ferreira Da Silva, F. G., & Rocha, C. H. (2024). Estrutura de capital das ferrovias concedidas no brasil: uma análise das práticas de endividamento. In *38º Congresso ANPET*, *Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Disponível em: https://proceedings.science/p/191000?lang=pt-br (acesso em 06/07/2025)

Frischtak, C. R., Davies, K., & Noronha, J. (2016). O financiamento do investimento em infraestrutura no Brasil: uma agenda para sua expansão sustentada. *Revista Econômica*, *17*(2). https://doi.org/10.22409/economica.17i2.p294

Frischtak, C. R., Rodrigues, A. M., Faria, M., Bellon, L., & Canini, R. (2022). Uma análise do financiamento em infraestrutura e o projeto de lei das debêntures. In Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) (Ed.), *Concessões e Parcerias Público-Privadas: Políticas Públicas para Provisão de Infraestrutura*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). https://doi.org/10.38116/978-65-5635-040-0/capitulo4

Hair, Jr. J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tathan, R. L. (2009). *Análise Multivariada de Dados* (M. A. Gouvêa, Ed.; A. S. Sant'Anna, Trans.; 6th ed.). Bookman.

Kravchenko, O., Bohomolova, N., Karpenko, O., Savchenko, M., & Bondar, N. (2020). Scenario-based financial planning: the case of Ukrainian railways. *National Accounting Review*, *2*(3), 217–248. https://doi.org/10.3934/NAR.2020013

Modigliani, F., & Miller, M. H. (1958). The Cost of Capital, Corporation Finance and the Theory of Investment. *American Economic Review*, *48*(3), 261–297.

Myers, S. C. (2001). Capital Structure. *Journal of Economic Perspectives*, *15*(2), 81–102.

Pereira, T. R., & Miterhof, M. T. (2021). Uma nota sobre a eficiência fiscal das debêntures incentivadas em infraestrutura no Brasil. *Revista Brasileira de Economia*, *75*(2). https://doi.org/10.5935/0034-7140.20210008

Ray, S., & Bisbey, J. (2020). Financing infrastructure in Asia through bonds and capital markets. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, *4*(1), 87. https://doi.org/10.24294/jipd.v4i1.1168

Rocha, K. (2023). Perspectivas do mercado de dívida corporativa no brasil a partir do projeto de lei das debêntures de infraestrutura e da medida provisória no 1.137/2022. *Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior*, *71*, 7–10. https://doi.org/10.38116/radar71art1

Ross, S. A., Westerfield, R. W., Jaffe, J., & Lamb, R. (2015). *Administração Financeira: Versão Brasileira de Corporate Finance* (McGraw-Hill & AMGH Editora Ltda., Eds.; 10th ed.). AMGH Editora Ltda. (Grupo A Educação)

Santos Silva, M. (2022). Financiamento à infraestrutura: desenvolvimento institucional e desempenho do mercado de debêntures incentivadas. *Livros*, *Concessões e parcerias*, 45–80. https://doi.org/10.38116/978-65-5635-040-0/capitulo2

Schroeder, D. A. (2010). *Accounting and Causal Inference: Econometric Challenges* (Vol. 5). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7225-5

Suyunchev, O. O., & Mozgovaya, O. O. (2016). The Development of Mechanisms of State Regulation, Creating Conditions to Attract and Protect Investments in the Infrastructure Sector (On the Example of the Rail Transport). *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.2776547

Wooldridge, J., Wooldridge, & Jeffrey. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. *1*, 1064.

Francisco Gildemir Ferreira da Silva (gildemir@ufc.br), Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Exatas (ICE), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Programa de Pós-Graduação em Transporte, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil. Universidade Federal do Ceará – UFC, Campus do Pici, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

Raphael Vieira dos Santos (raphael.vieira@infrasa.gov.br), INFRA S.A. Setor de Autarquia Sul (SAUS), Quadra 01, Bloco G, Lotes 3 e 5, Asa Sul, Brasília, DF, Brasil. Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Exatas (ICE), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Programa de Pós-Graduação em Transporte, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil.

METODOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES POLUENTES POR VEÍCULOS RODOVIÁRIOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Ana Clara Rodrigues de Araújo Lima, Maurício Oliveira de Andrade, Anísio Brasileiro de Freitas Dourado
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este artigo propõe uma análise exploratória das metodologias de estimativa das emissões de gases poluentes geradas pelo tráfego rodoviário, uma problemática de escala global, aqui examinada na perspectiva do Contorno do Recife em Pernambuco. O estudo foi motivado pelo crescimento expressivo do tráfego veicular na região e o consequente agravamento de congestionamentos e poluição. A metodologia envolveu uma revisão sistemática da literatura, com busca de artigos em bases de dados como *Scopus* e *Web of Science*, utilizando o protocolo PRISMA. Foram analisados os objetivos, metodologias e resultados de oito artigos científicos. Os resultados indicam que as emissões veiculares aumentam em áreas de maior tráfego e veículos novos poluem menos, as metodologias mais utilizadas foram Top-down, que estima as emissões em escala regional e Bottom-up, que utiliza dados detalhados de trechos específicos. O estudo reforça a necessidade de políticas de incentivo ao transporte público e substituição de frotas para mitigar a poluição.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A poluição do ar é um problema urbano enfrentado por diversas cidades ao redor do mundo (Figliozzi, 2017; Lurie *et al*., 2019; Zhao et al., 2018). Entre os setores com maior contribuição para as emissões de gases poluentes, destaca-se o transporte terrestre, especialmente em países como o Brasil, onde a dependência do modo rodoviário é significativa. A escolha por analisar uma rodovia pernambucana como o "Contorno do Recife" foi devido a sua relevância local e impacto nacional**,** onde os desafios de mobilidade, planejamento urbano e impactos ambientais se destacam. Assim, análises realizadas nessa região podem servir de referência para outros centros urbanos de médio e grande porte no Brasil com características semelhantes.
A Tabela 1 ilustra o expressivo crescimento da frota de veículos no Brasil e em Pernambuco entre os anos de 2001 e 2025, evidenciando o aumento da motorização individual e o consequente impacto ambiental associado ao setor.

Tabela 1: Crescimento da frota entre janeiro de 2001 e maio de 2025:

BRASIL	Total	Automóvel	Caminhão	Caminhonete	Ônibus	Motos
2001	27.413.355	21.236.011	1.456.464	421.243	274.081	4.025.556
2025	106.938.986	63.831.697	3.189.937	10.249.349	739.686	28.928.317
Variação	290,10%	200,58%	119,02%	2333,12%	169,88%	618,62%

PERNAMBUCO	Total	Automóvel	Caminhão	Caminhonete	Ônibus	Motos
2001	688.655	480.879	42.941	11.779	8.254	144.802
2025	3.277.401	1.518.164	99.044	241.899	25.349	1.392.945
Variação	375,91%	215,71%	130,65%	1953,65%	207,11%	861,97%

Fonte: Brasil (2025)

De acordo com dados da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), a frota de veículos do estado de Pernambuco cresceu aproximadamente 376% nos últimos vinte e cinco anos. Atingindo em 2025, mais de 3 milhões de veículos, dos quais 42% estão na Região Metropolitana do Recife. Além disso, o crescimento veicular tem contribuído para o agravamento dos congestionamentos, bem como para o aumento das emissões de poluentes atmosféricos.

Em Pernambuco, envolta pela Região Metropolitana do Recife (RMR), a BR-101 assumiu o papel de importante corredor perimetral. Entre o km 51,6 (Abreu e Lima) e o km 82,3 (Jaboatão dos Guararapes) da rodovia é um trecho conhecido como "*Contorno do Recife*". A Tabela 2 apresenta os valores de Volume Médio Diário (VMD) registrados em diferentes pontos desse segmento da rodovia, evidenciando sua alta demanda de tráfego. Observa-se que todos os pontos monitorados ultrapassam 59 mil veículos por dia, com destaque para o km 65,5, em Recife, que atinge um VMD de 98.630 veículos, confirmando a intensidade do fluxo viário e a importância do trecho para a mobilidade regional.

Tabela 2: VMD do trecho do "Contorno do Recife":

Equipamento	Localização				VMD
	BR	KM	Município	UF	
Redutor Eletrônico de Velocidade	101	50,55	Abreu e Lima	PE	75856
Controlador Eletrônico de Velocidade	101	56,9	Recife	PE	69283
Controlador Eletrônico de Velocidade	101	60,2	Recife	PE	69233
Controlador Eletrônico de Velocidade	101	65,5	Recife	PE	98630
Controlador Eletrônico de Velocidade	101	71,2	Recife	PE	74129
Redutor Eletrônico de Velocidade	101	75,2	Recife	PE	68526
Redutor Eletrônico de Velocidade	101	80	Jaboatão dos Guararapes	PE	59910

Fonte: Brasil (2024)

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Manual do Estudo de Tráfego de 2006, o Contorno do Recife pode ser classificado como uma via de Nível de Serviço F, o que representa fluxo severamente congestionado, com demanda superior à capacidade. Essa condição tem resultado em elevados tempos de viagem, consumo excessivo de combustível e maior emissão de poluentes atmosféricos. Diante disso, este artigo tem como objetivo realizar uma análise exploratória das metodologias utilizadas na estimativa das emissões de gases poluentes geradas pelo tráfego rodoviário, com foco naquelas que possam ser adaptadas à realidade do Contorno do Recife, para dar suporte aos benefícios ambientais de uma implantação de um novo anel viário, o chamado ARCO METROPOLITANO DO RECIFE que interligará as regiões norte e sul da região metropolitana do recife. Para tanto, será realizada uma revisão sistemática da literatura voltada ao tema, com foco em métodos compatíveis com a realidade das rodovias brasileiras e aplicáveis ao planejamento de infraestrutura e meio ambiente.

2. METODOLOGIA

2.1. Busca por artigos na base de dados

A Tabela 3 objetiva apresentar a metodologia seguida. Quatro fases foram adotadas: coleta de artigos relacionados ao tema em base de dados, meta-análise, análise bibliométrica e sistemática (Aragão Júnior e Oliveira Júnior, 2021). A definição dos termos de busca considerou a necessidade de localizar estudos que tratassem especificamente da estimativa de emissões atmosféricas provenientes do tráfego de veículos em vias terrestres, com foco no contexto brasileiro. Buscou-se delimitar a pesquisa a fontes que abordassem metodologias aplicáveis à realidade nacional, especialmente em áreas urbanas com características semelhantes às do Contorno do Recife.

Tabela 3: Síntese das quatro etapas metodológicas.

Etapa	Procedimentos
Coleta na Base de Dados	Plataforma: *Scopus* e *Web of Science* (entrada permitida por meio do portal da CAPES). Foi adotada uma adaptação do protocolo PRISMA *(Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Moher *et al*., 2010), com foco nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, a fim de garantir a transparência do processo de seleção. Entretanto, não se aplicou o *checklist* completo do PRISMA, nem houve registro prévio de protocolo. Período da busca: 06/2025; Termos procurados:"*traffic emissions*" e "*vehicle*" e "*road*" e "*brazil*". Essa busca foi aplicada ao título, resumo e palavras-chave dos artigos em questão Identificação: 46 documentos foram encontrados. Triagem: Foram aplicados filtros para manter apenas artigos publicados em periódicos, com versão final, em inglês ou português. Após leitura de título e resumo, 36 artigos foram mantidos. Elegibilidade: Realizou-se a leitura integral dos textos (objetivos, metodologia e conclusões), resultando em 08 artigos considerados elegíveis. Inclusão: Os 08 artigos finais foram incluídos para análise bibliométrica e sistemática.
Meta-Análise	Os artigos passaram por divisão de tipologias de interesse extraídas: Bibliométrica e Sistemática. Na primeira, são obtidas informações bibliográficas. Enquanto isso, a segunda busca explorar os principais objetivos, metodologias e resultados/ conclusões.

Análise Bibliométrica	Foram utilizados o Microsoft Office Excel e a ferramenta Bibliometrix (vinculada ao software R studio), em prol da criação da figura as quais permitissem avaliar visualmente as informações extraídas.
Análise Sistemática	A fase de Análise Sistemática foi realizada por meio de texto e tabela, nos quais são abordados os principais objetivos, metodologia e conclusões das produções presentes no sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise Bibliométrica

A figura 1 busca evidenciar, em três cores, azul, vermelho e verde, o número de artigos publicados por ano, o total acumulado de artigos e a média para o período analisado.

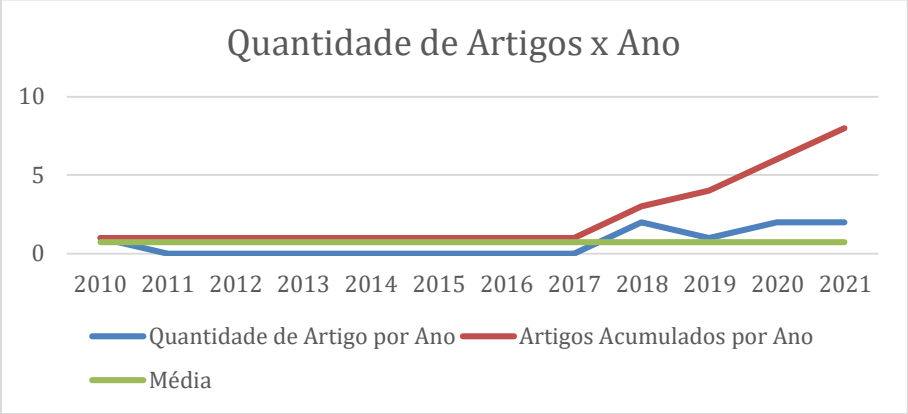


Figura 1: Panorama de Artigos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.
Fonte: Autores (2025), por meio da ferramenta Bibliometrix e do Microsoft Excel.

3.2. Análise Sistemática

A Tabela 4 evidencia uma síntese com os principais objetivos e metodologias empregados nas publicações analisadas. Em seguida, realiza-se um compilado das principais conclusões obtidas.

Tabela 4: Objetivos e metodologias adotadas nos artigos estudados

Autores	Objetivos	Metodologia
D'Angiola *et al.* (2010)	Desenvolvimento de um inventário anual de emissões veiculares com base em medições de cidades da América do Sul. As informações geradas podem subsidiar políticas locais e complementar inventários globais de emissões.	O estudo estimou as emissões veiculares na Grande Buenos Aires em 2006 usando a metodologia COPERT IV (*Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport)*, com dados detalhados de frota, combustível, quilometragem e fatores de emissão. Foram consideradas emissões quentes, frias e evaporativas, além do tratamento das incertezas conforme o IPCC *(Intergovernmental Panel on Climate Change*). A abordagem é aplicável a outras cidades com base em indicadores socioeconômicos.
dos Santos *et al.* (2021)	Avaliação das emissões de poluentes atmosféricos veiculares em Minas Gerais (2015), utilizando uma metodologia top-down.	A metodologia segue diretrizes do MMA e da CETESB para estimar o inventário de emissões veiculares, considerando escapamento, evaporação e desgaste de componentes. A frota é estimada por taxas de sobrevivência de veículos novos, e o uso ajustado pelo consumo real de combustível. São aplicados fatores de emissão para diversos poluentes, conforme tipo de veículo e combustível.
Vasques e Hoinaski (2021)	Apresentação do BRAVES, um novo software para estimativa de emissões veiculares no Brasil.	A metodologia "*bottom-up*" combina dados detalhados da frota municipal com abordagem probabilística para estimar emissões veiculares. Considera escapamento, evaporação, reabastecimento, desgaste de componentes e ressuspensão do solo, usando fontes como MMA, CETESB, ANP e guias europeus. Inclui fatores de deterioração e sucateamento, permitindo segregação por processo e categoria de frota.
Andreão *et al.* (2020)	Investigar a aplicação da estimativa de emissão de material particulado (MP) do Inventário Brasileiro de Emissões Veiculares, elaborado com abordagem *top-down* em 2012, para fins de modelagem da qualidade do ar."	O estudo avaliou o uso do inventário brasileiro de emissões veiculares de MP (2012) para modelar a qualidade do ar com o modelo WRF-Chem. As emissões foram distribuídas espacialmente em 5557 municípios com base na população e na frota, usando a ferramenta PREP-CHEM-SRC. A modelagem para agosto de 2015 em quatro regiões metropolitanas foi comparada ao inventário global EDGAR e validada com dados de monitoramento.
Maes *et al.* (2019)	O presente trabalho propõe um método para desenvolver e avaliar inventários de alta resolução (espaciais e temporais) para as emissões do transporte rodoviário em áreas metropolitanas.	O estudo propõe uma metodologia "*bottom-up*" para inventários de emissões veiculares de alta resolução na RM de Florianópolis, usando dados do TransCAD, RENAVAM e ABRACICLO. As emissões foram espacializadas na rede viária e baseadas em fatores de emissão da CETESB. Um cenário hipotético mostrou que a renovação da frota pode reduzir significativamente a poluição.

Policarpo *et al.* (2018)	Estimar as emissões de poluentes das principais frotas de veículos rodoviários de Fortaleza e sua região metropolitana, utilizando um método de macrosimulação, *bottom-up*, entre 2010 e 2015.	O estudo aplica uma macrosimulação "*bottom-up*" para estimar emissões veiculares na RM de Fortaleza (2010–2015), usando dados do DETRAN-CE sobre frota e da CETESB sobre intensidade de uso e fatores de emissão. As emissões de CO, NMHC, RCHO, NOx e MP são calculadas com base no consumo estimado pela ANP. A metodologia considera deterioração veicular e é validada por inventários e medições reais.
Teixeira *et al.* (2020)	Avaliar a dispersão atmosférica de MP de caminhões pesados rodoviários em 12 cidades do estado de São Paulo, avaliando os impactos da substituição de toda a frota movida a diesel por GNL e os efeitos sobre a saúde da população local.	O estudo avaliou os impactos na saúde da substituição do diesel por GNL em caminhões pesados, analisando concentrações de PM10 e PM2.5 com o modelo AERMOD. Foram usados dados de tráfego, meteorologia, fatores de emissão e receptores, além de cálculos da taxa de emissão diária. Os efeitos na saúde foram estimados com base na metodologia da OMS e análise de Monte Carlo.
Ibarra *et al.* (2018)	Desenvolver um modelo de inventário de emissões veiculares com resolução espacial e temporal, denominado modelo de Inventário de Emissões Veiculares (VEIN).	O VEIN v0.2.2 é um modelo de código aberto em R que estima inventários de emissões veiculares de alta resolução, utilizando uma abordagem de baixo para cima. Ele processa dados de tráfego e composição veicular, seleciona fatores de emissão (com deterioração) e calcula emissões de escape quente, partida a frio e evaporativas. O modelo também realiza especiação química e alocação espacial, gerando dados para modelos atmosféricos e planejamento ambiental.

D'Angiola *et al*. (2010) destacaram que a cidade de Buenos Aires registrou os maiores índices de emissão em comparação com outras regiões. Essa constatação sublinha a correlação direta entre a alta densidade de tráfego e a concentração de atividades urbanas e os elevados níveis de poluentes. Seguindo necessidades em comum Santos *et al*. (2021) enfatizaram que o tráfego veicular continua sendo uma fonte importante de partículas finas devido ao desgaste físico dos pneus, contribuindo para a má qualidade do ar. Vasques e Hoinaski (2021) evidenciam que com exceção do CO2eq e do MP, todas as emissões veiculares diminuíram de 2013 a 2018, indicando um possível efeito positivo dos programas de controle de emissões veiculares no Brasil.

Ademais, Andreão *et al.* (2020) consideram que uma comparação direta entre os inventários de emissões deve ser feita com cautela, considerando as diferenças relacionadas às metodologias com abordagens de cima para baixo e de baixo para cima. A primeira é baseada em composição de veículos, velocidades de tráfego e equilíbrio de países, resultando na emissão total de uma região. A segunda é mais refinada, utilizando dados detalhados sobre cada veículo, fontes de emissão, como veículos rodoviários e fornecer a emissão por segmento de estrada. Por conseguinte, Maes *et al.* (2019) evidenciaram que veículos recentemente fabricados apresentaram valores de emissões de poluentes até vinte vezes menores que os dos veículos antigos.

Por sua vez, Policarpo *et al.* (2018) recomenda a promoção de políticas que incentivem a mudança modal para o transporte público devido à sua maior capacidade de mobilidade por veículo. Em outro âmbito, Teixeira *et al.* (2020) indica que a substituição de frotas (diesel para GNL) reduz em 100% a chance de uma morte por doenças respiratórias em crianças, considerando apenas o PM primário. Isso demonstra a necessidade de medidas adicionais para reduzir as emissões de PM, como mudar o tráfego local para veículos menos poluentes e implementar políticas públicas em outros setores (construção civil, indústria e agricultura). Nesse contexto, Ibarra *et al.* (2018), evidenciaram que o VEIN mostra que as emissões de CO são fortemente concentradas em poucas ruas com alto volume de tráfego. As emissões EDGAR não fornecem este nível de detalhe e são inferiores às estimativas do VEIN.

4. CONCLUSÃO

A revisão dos artigos encontrados, reforça a aplicação de metodologias eficazes para a medição e controle dessas emissões, especialmente em áreas de alta densidade de tráfego. No caso específico do Contorno do Recife, onde há congestionamentos severos e, consequentemente elevadas emissões de poluentes atmosféricos, é imperativo que haja uma metodologia de medição de emissão de poluentes. O artigo revisou diversas abordagens para estimativa de emissões veiculares, como as metodologias *top-down* e *bottom-up*, e softwares como o BRAVES e o VEIN, que podem ser adaptados para a realidade das rodovias pernambucanas. A aplicação dessas metodologias dará subsídio a políticas públicas e intervenções mais assertivas.

Além da medição de emissão de poluentes, a implementação de outras soluções também é necessária. A experiência de outras regiões indica que a renovação da frota veicular e a promoção de políticas que incentivem a mudança do modo rodoviário para o transporte público são medidas importantes. Contudo, para o Contorno do Recife, a criação de uma via alternativa, como o ARCO METROPOLITANO DO RECIFE, o anel viário citado no artigo, emerge como uma solução estrutural de grande potencial. Tal medida não só desafogaria o tráfego intenso na BR-101, reduzindo congestionamentos e emissões, mas também contribuiria para uma

melhor distribuição do fluxo veicular na Região Metropolitana do Recife, promovendo um desenvolvimento urbano e rodoviário mais sustentável.

Como trabalho futuro, recomenda-se a aplicação prática das metodologias identificadas neste estudo ao trecho do Contorno do Recife, especialmente por meio da elaboração de inventários de emissões. Além disso, sugere-se a realização de estudos de simulação de cenários comparativos, com e sem a implantação do Arco Metropolitano do Recife, a fim de estimar os impactos potenciais dessa infraestrutura sobre a distribuição do tráfego e a redução das emissões atmosféricas. Esses estudos podem oferecer subsídios técnicos relevantes para o planejamento urbano sustentável da Região Metropolitana do Recife e a priorização de investimentos públicos em mobilidade e meio ambiente.

REFERÊNCIAS

Andreão, W. L.; Alonso, M. F.; Kumar, P.; Pinto, J. A.; Pedruzzi, R.; Albuquerque, T. T. de A. (2020) Top- down vehicle emission inventory for spatial distribution and dispersion modeling of particulate matter. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, p. 35952–35970. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-020-08476-y.

Aragão Júnior, W. R.; Oliveira Júnior, A. I. de. Internet das coisas na gestão de resíduos sólidos: revisão sistemática com análise bibliométrica da literatura. Journal of Environmental Analysis and Progress, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 194–209, 2021. DOI: 10.24221/jeap.6.3.2021.4245.194-209.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Informações sobre equipamentos de fiscalização eletrônica – Dados de 2024, adaptados. Brasília: DNIT, 2024. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/multas/informacoes/equipamentos-fiscalizacao. Acesso em: 23 jun. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de estudo de tráfego. Brasília: DNIT, 2006.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Secretaria Nacional de Trânsito. Estatísticas da frota de veículos – SENATRAN. Disponível em: : https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran Acesso em: 23 jun. 2025.

CNN BRASIL. Brasil passa Espanha e volta a ter 8ª maior produção de veículos do mundo, diz Anfavea. 14 jan. 2025. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/economia/mercado/brasil-passa-espanha-e-volta-a-ter-oitava-maior-producao-de-veiculos-do-mundo-diz-anfavea. Acesso em: 29 jun. 2025.

D'Angiola, A.; Dawidowski, L. E.; Gómez, D. R.; Osses, M. (2010) On-road traffic emissions in a megacity. Atmospheric Environment, v. 44, p. 483–493. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.11.004.

Figliozzi, MA, 2017. Modelagem do ciclo de vida e avaliação das emissões de CO2e de veículos aéreos não tripulados (Drones). Transporte. Res. Transporte Ambiental. 57, 251–261. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.011.

Ibarra Espinosa, S.; Ynoue, R.; O'Sullivan, S.; Pebesma, E.; Andrade, M. F.; Osses, M. (2018) VEIN v0.2.2: an R package for bottom–up vehicular emissions inventories. Geosci. Model Dev., v. 11, p. 2209-2229. Disponível em: https://doi.org/10.5194/gmd-11-2209-2018.

Maes, A. de S.; Hoinaski, L.; Meirelles, T. B.; Carlson, R. C. (2019) A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: Evaluating the effect of automotive technologies improvement. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 77, p. 303–319. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.007.

Policarpo, N. A.; Silva, C.; Lopes, T. F. A.; Araújo, R. S.; Cavalcante, F. S. Á.; Pitombo, C. S.; Oliveira, M. L. M. de. (2018) Road vehicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 58, p. 172–185. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.004.

Santos, F. S. dos; Andreão, W. L.; Miranda, G. A.; Carvalho, A. N. M.; Pinto, J. A.; Pedruzzi, R.; Carvalho, V. S. B.; Albuquerque, T. T. de A. (2021) Vehicular air pollutant emissions in a developing economy with the widespread use of biofuels. Urban Climate, v. 38, 100889. DOI: https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100889.

Teixeira, A. C. R.; Borges, R. R.; Machado, P. G.; Mouette, D.; Ribeiro, F. N. D. (2020) PM emissions from heavy-duty trucks and their impacts on human health. Atmospheric Environment, v. 241. Artigo 117814. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117814.

Vasques, T. V.; Hoinaski, L. (2021) Brazilian vehicular emission inventory software – BRAVES. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 100, 103041. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103041.

MODELOS DE CONTRATAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO: UMA REFLEXÃO SOBRE PRODUTIVIDADE, QUALIDADE E PRAZOS

Daniel Marx Couto, Rômulo Dante Orrico Filho
Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

RESUMO
O setor de transporte urbano no Brasil enfrenta desafios para garantir a sustentabilidade econômica e regulatória na prestação dos serviços de transporte coletivo - TPC. A cidade de Belo Horizonte apresenta um cenário peculiar por ter vivenciado dois processos distintos de licitação dos serviços de transporte, refletindo os dois principais modelos de contratação utilizados no Brasil. Entretanto, os dois contratos vigentes entre 1998 e 2008 e entre 2008 e 2028 (em andamento) sofreram alterações em suas variáveis regulatórias ao longo de suas execuções, impactando a produtividade e a qualidade dos serviços. Este estudo analisa as implicações regulatórias e operacionais desses contratos e os ajustes realizados, sugerindo que prazos mais curtos e modelos flexíveis podem favorecer a sustentabilidade regulatória. O objetivo é compreender os fatores que possam ter motivado as mudanças nas variáveis regulatórias, utilizando-se da evolução da produtividade e da qualidade, e contribuir para a evolução de boas práticas regulatórias.

1. INTRODUÇÃO

A diversidade dos contratos de TPC no Brasil reflete as diferenças e necessidades locais, demonstrando que não há uma solução universal para todas as cidades. Cada modelo apresenta vantagens e desafios, e a escolha depende do contexto local, da estrutura do gestor público, das diretrizes políticas e da infraestrutura disponível (COUTO, 2011). Assim, o ponto central do Poder Público é garantir o controle do serviço e que os objetivos estabelecidos no Plano Nacional de Mobilidade Urbana sejam alcançados de forma eficaz e sustentável.

A constante atualização dos estudos e debates sobre regulamentação é crucial para o Poder Público, dado o dinamismo das condições de mercado e a possibilidade de diretrizes anteriormente ideais se tornarem obsoletas (Barboza *et al*., 2003). Hensher e Stanley (2010) destacam a incompletude inerente dos contratos, considerando que nem todas as obrigações podem ser plenamente definidas de antemão devido à racionalidade limitada dos agentes e à complexidade intrínseca dos serviços de transporte. Também destacam a importância de integrar disposições *ex ante* e *ex post*, enfatizando a negociação contínua como elemento central para contratos promissores. Em apoio a essa abordagem, Stumpf et al. (2024) introduzem um modelo de opções reais que mitiga riscos nos contratos de concessão de ônibus, ampliando sua flexibilidade e resiliência. Hensher (2015), Ardila-Gomez e Darido (2025) completam essa perspectiva ao reafirmar que os contratos futuros devem priorizar a melhoria da experiência do usuário e incentivar uma maior participação do setor privado com maior competitividade e mecanismos de controle do desempenho operacional.

Considerando as características e desafios encontrados no equilíbrio da regulação do transporte público, este artigo discute as estruturas regulatórias do transporte coletivo por ônibus em Belo Horizonte - MG, analisando, de forma documental e quantitativa, suas principais variáveis e os impactos sobre o desempenho econômico e operacional dos serviços. Isso oferece uma análise crítica das mudanças nas delegações de serviço ao longo do tempo, contribuindo para a disseminação do conhecimento público e o aperfeiçoamento das medidas regulatórias para futuras contratações.

1.1. Aspectos contratuais e variáveis regulatórias

As variáveis regulatórias, conforme Barboza *et al.* (2003), Gomide (2004), Comunidade Europeia (2008) e Carvalho (2015), abrangem formas de entrada, organização da oferta, prazos de delegação, modelos de remuneração, cálculo tarifário, incentivos à qualidade, riscos, planejamento operacional, financiamento, tecnologia e participação social.

A forma de entrada no mercado afeta as tarifas. A maior oferta pode elevá-las devido ao pagamento ao governo, enquanto a menor tarifa pode reduzir custos, mas requer regulação eficaz para evitar práticas oportunistas. Os serviços de ônibus urbanos podem ser organizados por linhas ou áreas. No modelo por linhas, o planejamento é do Poder Público; por áreas, as empresas têm mais liberdade e o governo define a qualidade e integração. O prazo de contrato deve alinhar-se aos investimentos, com prazos de cinco anos adequados para operações sem

ativos imobilizáveis (Orrico Filho *et al*., 1996), e até vinte anos para grandes investimentos em infraestrutura. O prazo deve garantir a recuperação de capital, mas permitir competição. As operadoras podem ser remuneradas direta ou indiretamente. Enquanto a remuneração direta facilita a administração pública, a remuneração indireta permite melhor planejamento, mas pode causar desequilíbrios financeiros (Carvalho, 2015). A definição de preço pode seguir custos médios ou licitações pela menor tarifa, como na metodologia GEIPOT. O método de Fluxo de Caixa e a Taxa Interna de Retorno (TIR) ajudam a preservar o equilíbrio econômico. Modelos regulatórios devem incluir incentivos para manter a qualidade. A Lei 12.587/2012 exige metas e instrumentos de controle, com incentivos baseados em bônus e pesquisas de usuário, focando em conforto e segurança. Para otimizar custos, riscos devem ser atribuídos a quem pode melhor suportá-los. Nos contratos com remuneração baseada em custos, o planejamento é do poder público; se baseado em receita, concessionários têm mais flexibilidade. O financiamento de transporte é majoritariamente via tarifas, mas contou com mais apoio público pós-COVID-19. Subsídios podem focar em operadoras ou usuários, e o governo pode subsidiar infraestrutura. Por fim, desde os anos 2000, os sistemas de bilhetagem eletrônica melhoraram o controle operacional, mas os contratos não evoluíram tanto. A Lei 12.587/2012 garante participação dos usuários no planejamento e avaliação dos serviços por meio de diversos mecanismos.

1.2. Os modelos de contratos de Belo Horizonte

Diversos municípios brasileiros realizaram licitações para contratar operadores privados de transporte urbano, contribuindo para formar uma base de conhecimento sobre novos modelos regulatórios. Esses processos oferecem informações comparativas valiosas sobre as transformações e tendências nesse setor. O Município de Belo Horizonte possui experiência com duas licitações para transporte coletivo urbano, realizadas em 1997 e 2008. A primeira licitação, em 1997, com duração de 10 anos envolveu lotes de veículos equivalentes, 46 empresas vencedoras e uma arrecadação de R$ 69 milhões para o município. No entanto, o modelo de remuneração adotado, baseado no custo por quilômetro e câmera de compensação tarifária, afetou a eficiência do serviço e levou a um déficit de R$ 500 milhões, pagos pelo Município ao final da concessão. Além disso, os recursos auferidos com a outorga, inicialmente planejados para investimentos em infraestrutura do sistema, foram usados para manter o equilíbrio econômico nos primeiros anos. Ainda no final da primeira metade do período contratual, entre 2003 e 2008, foram introduzidas alternativas ao modelo de remuneração original, incorporando critérios de produtividade e metas de desempenho financeiro. Para cada linha do sistema foram atribuídas metas de resultados (Resultado = Receita - Custo), com bonificações para as empresas que superassem as metas e penalizações para aquelas que as não atingissem. Essa abordagem resultou em economia de 4,5% nos custos operacionais ao longo de 5,5 anos, bem como estancou novos déficits, conforme registros do órgão gestor municipal.

A segunda licitação ocorreu em 2008, com prazo de 20 anos e alterações estruturais. A remuneração se baseou na receita tarifária e as tarifas apuradas pela variação de índices econômicos públicos, em vez de custos operacionais estruturados em planilhas. A operação de cada uma das quatro concessionárias vencedoras é feita por regiões da cidade, sendo que a região Centro-Sul é comum a todas. As concessionárias passaram a ser responsáveis pelo planejamento operacional, enquanto o Poder Público se encarrega da regulação e fiscalização. O modelo de definição de tarifa também foi renovado, eliminando as planilhas de custos antigas. Essas mudanças exigiram controle eficaz da oferta programada e realizada; entretanto, reduziram esforços com o acompanhamento rotineiro dos custos. Os contratos de concessão incluíram requisitos de qualidade, como intervalos máximos entre viagens, índices de lotação e acessibilidade à rede de transportes. O planejamento operacional, incluindo itinerários e quadros de horários, ficou a cargo dos concessionários. Os primeiros quatro anos de operação apresentaram resultados econômicos positivos, mas, a partir de 2013, como ocorreu na maioria das capitais brasileiras, a demanda começou a cair e, mesmo com ajustes operacionais na oferta e desonerações de impostos e taxas (ISS, PIS, COFINS, CGO), a crise instaurada se agravou com os impactos da pandemia do COVID-19. A partir de 2023, os contratos foram alterados no método de remuneração, no cálculo tarifário e na responsabilidade dos agentes. A remuneração voltou a considerar o cálculo de custos através de planilha (ANTP), foram incorporados subsídios tarifários à remuneração, como forma de manter as tarifas em patamar abaixo da tarifa técnica e o Poder Público retomou as funções de planejamento operacional dos serviços, definindo itinerários, quadros de horários e frota.

2. MÉTODO

A estratégia metodológica utilizada neste estudo baseou-se em pesquisa documental, disponível no acervo

público do órgão gestor municipal - SUMOB e análise descritiva de dados administrativos disponíveis no portal de serviços do município de Belo Horizonte. A investigação abarcou aspectos da legislação vigente, processos licitatórios, contratos de concessão, modelos de remuneração aplicados e estrutura regulatória. As análises foram centradas na comparação dos dois modelos licitatórios implementados em 1998 e 2008, com ênfase nas mudanças estruturais e nas variáveis regulatórias ocorridas antes do término de vigência das duas concessões registradas nos termos aditivos aos contratos. A partir dessa análise documental, foram sintetizadas pelos autores as principais variáveis regulatórias de cada contrato, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis regulatórias para o serviço de transporte público coletivo de Belo Horizonte

	Contrato 1998 - 2008	**Contrato 2008 - 2028**
Formas de entrada	Maior outorga para poder público	Menor remuneração (TIR) para operadora
Organização da oferta	Linhas com lotes de veículos alocados pelo poder público	Rede de transporte e serviços regionalizado e níveis de serviços estabelecidos
Prazo de delegação	10 anos sem renovação	20 anos sem renovação
Modelo de remuneração	Indireta: Produção (km e frota)	Direta: Receita tarifária e serviços
Cálculo tarifário	Planilha de Custos	Fórmula Paramétrica
Incentivos à qualidade e produtividade	Índice de desempenho com redistribuição de 1% das receitas para operadoras com melhor desempenho	Revisão tarifária quadrienal com repasse de 50% dos ganhos às operadoras e 50% à modicidade tarifária
Riscos envolvidos	Político, déficits tarifários	Queda de demanda, redução velocidade
Planejamento Operacional	Poder público	Operadoras
Modelo de Financiamento	Receita tarifária com Câmara de Compensação Tarifária	Receita tarifária - A demanda define a oferta entre cada Rede de Transporte e Serviço
Tecnologia aplicada	Operadora contrata Bilhetagem eletrônica (aditamento contratual)	Operadora contrata bilhetagem eletrônica, controle da operação e informação ao usuário (edital)
Participação Social	Consultivo (Comissões regionais e Conselho Municipal de Transporte e Trânsito)	Consultivo (Comissões regionais e Conselho Municipal de Mobilidade)

Para compreender os ajustes nas variáveis regulatórias e seus impactos na produtividade e na percepção dos usuários, serão analisados dados sobre a evolução do Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK) e os registros de manifestações de usuários disponibilizados pelo poder público municipal.

3. RESULTADOS

A figura 1 e a tabela 2 ilustram a variação da produtividade, medida pelo IPK, e as variações de demanda e quilometragem, representando as variações econômicas e operacionais dos distintos contratos.

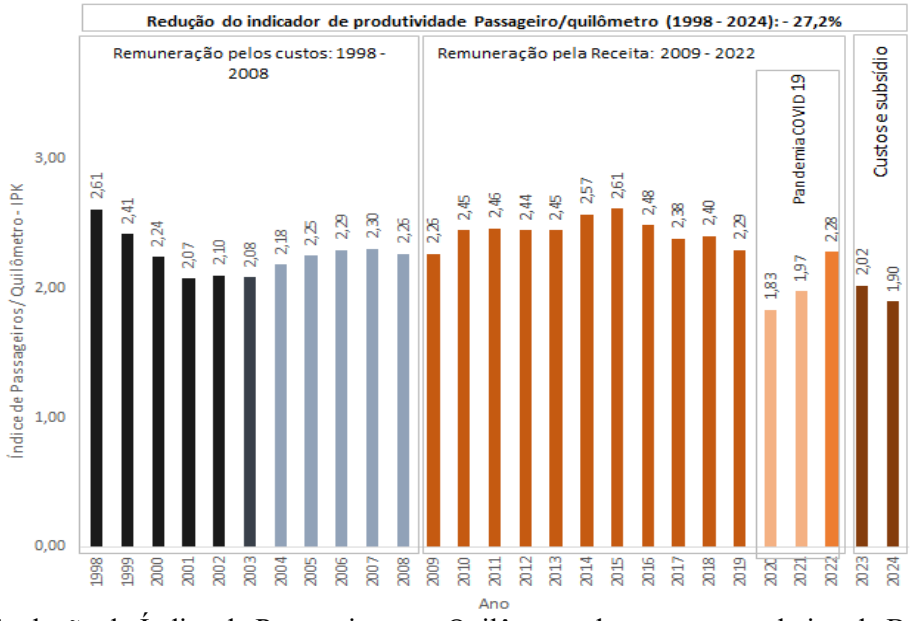


Figura 1: Evolução do Índice de Passageiros por Quilômetro do transporte coletivo de Belo Horizonte

Tabela 2: Variação da demanda, quilometragem e produtividade por ciclo de 5 anos

	Demanda	Quilometragem	IPK
1998 – 2003 (1º fase - custos)	- 22,3%	- 2,7	- 20,1%
2003 – 2008 (2ª fase - custos e incentivos)	+ 8,0%	- 0,6%	+ 8,6%
2008 – 2014 (1ª fase – receitas, crescimento econômico)	+ 3,0%	- 9,3%	+ 13,5%
2014 – 2019 (2º fase – receitas, crise econômica)	- 21,2%	- 11,7%	- 10,8%
2019 – 2024 (3ª fase – receitas, COVID e subsídio)	- 22,2%	-6,0%	- 17,2%

Fonte: autores a partir de SUMOB (2025)

Ao analisar a eficiência operacional medida pelo IPK, entre 1998 e 2003, observa-se uma queda contínua nos quatro primeiros anos, seguida por estabilização de 2001 a 2003. Houve uma redução de produtividade de 20,1%, acompanhando uma queda de demanda de 22,3%. Esse cenário revela uma tendência do modelo de remuneração baseado em custos, evidenciando pouca preocupação com a eficiência operacional, pois a remuneração estava diretamente ligada à oferta de serviços (frota e quilometragem). No entanto, entre 2004 e 2008, com a introdução de remuneração por incentivos e desempenho, ocorreu uma recuperação de demanda de 8,0% e um aumento da eficiência operacional de 8,6%, indicando um foco renovado na eficiência operacional. Já nos contratos com vigência entre 2008 a 2028, observa-se uma tendência de foco na eficiência operacional com aumento do IPK de 13,5%, muito às custas da redução da produção quilométrica que reduziu 9,3% mesmo com um aumento de demanda de 3,5%. Já no período de crise econômica que antecedeu a pandemia do COVID 19 (2014 – 2019) observa-se uma redução de IPK de 10,8%, mesmo com uma redução de demanda de 21,2%. Este cenário já demonstra um esgotamento do modelo quando a "demanda define a oferta", agravado com os serviços de transporte individual por aplicativos (uber, 99, etc.) visto que a oferta dos serviços já se mostrava nos limites mínimos contratuais com mais uma redução de 11,7%. Já no período pandêmico (2019–2024), uma nova redução de 22,2% na demanda acarreta uma queda de 17,2% no IPK. Analisando a figura 1, observa-se que parte da queda do IPK já reflete um novo modelo de remuneração implantado a partir do ano de 2023, quando as concessionárias passam a ser remuneradas pelos custos do sistema com cobertura pela receita tarifária acrescida de subsídios públicos. Apesar do IPK no ano de 2022 chegar a 2,28 passageiros/km, em 2024 ele chega ao patamar de 1,90 passageiro/km. A tabela 3 sintetiza os resultados e os impactos das alterações nos dois contratos de transporte público analisados.

Tabela 3: Impactos e alterações nas variáveis regulatórias dos contratos de transporte de Belo Horizonte

	Contrato 1998 - 2008	Contrato 2008 - 2028
Tarifa (% de aumento acima do INPC)	97,43%	20,36% (até dez/2018)
IPK – Índice de passageiros por km	- 13,2% (- 20,1% até 2003)	- 16,2% (+ 1,2% até 2019)
Reclamações de usuários (média mensal BHTRANS/SUMOB)	1392	1831 (+ 31,5%)
Percepção da qualidade (% médio – Pesquisa de satisfação BHTRANS/SUMOB)	36% (ótimo + bom)	11% (ótimo + bom)
Subsídio tarifário	Infraestrutura (municipal), déficits acumulados pagos ao final dos contratos (R$500 milhões)	Infraestrutura (municipal), acrescido de 30% de subsídio à operação (a partir de 2022) e cobertura de novas gratuidades
Mecanismo de incentivo à produtividade	Pouco efetivo	Pouco efetivo
Modelo de remuneração	Indireto (incentivos por produtividade a partir de 2003)	Direto (subsídios a partir de 2022)
Modelo de financiamento	Tarifa + Indenização ao final do contrato (déficits acumulados)	Tarifa + subsídio (a partir de 2022)
Cálculo tarifário	Planilha de custos (acrescido de produtividade a partir de 2003)	Fórmula paramétrica (planilha de custos a partir de 2022)
Planejamento Operacional	Poder Público (Concessionário a partir de 2003)	Concessionário (Poder Público a partir de 2022)

Entre 1998 e 2008, comparado com o período 2008 – 2028, os contratos mostraram maior média de reajuste tarifário (97,4% acima do INPC), menor produtividade operacional (redução de IPK), entretanto observou-se menor número de reclamações (31,5% a menor), melhor percepção do serviço (36% de ótimo/bom) e indenizações de cerca de 6,5% em déficits pagos pelo poder público ao final do contrato. Já entre 2008 e 2028 (analisados até 2024), observaram-se reajustes tarifários menores (20,36% acima do INPC) e maior foco na

eficiência operacional. Contudo, contratos com remuneração direta tiveram mais reclamações e a satisfação dos usuários foi três vezes menor. Subsídios tarifários, iniciados em 2022, agora cobrem mais de um terço dos custos operacionais. Esse aumento em subsídios se deve, em parte, aos reajustes não concedidos desde 2017, ao impacto da pandemia de COVID-19, mas também ao novo modelo de remuneração, introduzido em 2023, que reduziu o foco na eficiência operacional ao retornar com remuneração pelos custos operacionais.

4. CONCLUSÕES

A experiência de Belo Horizonte com dois modelos distintos de concessão e gestão do TPC revela importantes lições sobre governança, controle operacional e regulação aplicáveis em qualquer porte de município. O primeiro modelo, embora sem metodologia explícita para o cálculo tarifário, resultou em aumentos superiores à inflação (INPC), também impulsionados pela falta de incentivos à eficiência operacional nos contratos originais. Ajustes feitos a partir de 2003 incluíram um novo modelo de remuneração que integrou incentivos, revertendo tendências de desequilíbrio econômico. Além disso, o modelo mostrou resultados favoráveis na percepção dos usuários, conforme pesquisas de qualidade e índices de reclamação indicaram. O segundo processo licitatório marcou um avanço significativo, incorporando gestão por desempenho, metas de eficiência e sistemas inteligentes de informação. No entanto, houve um aumento nas reclamações, deterioração nas percepções positivas dos usuários, e um esgotamento estrutural devido à redução contínua da demanda, sem medidas de ajuste suficientes para manter o equilíbrio contratual, o que resultou em uma nova reformulação contratual no ano de 2023, cinco anos antes do término contratual.

Os ciclos quinquenais de revisões estruturais nas regulamentações vivenciadas em Belo Horizonte sugerem a necessidade de reavaliar prazos contratuais, reduzindo sua duração, já que modelos demandam revisões contínuas e contratos prolongados podem levar ao esgotamento das condições contratuais originais.

Embora não exista um modelo contratual perfeito para cidades brasileiras, princípios universais como eficiência econômica, equidade social e efetividade são essenciais. Fatores mercadológicos, econômicos, fiscais, ambientais e sociais afetam a configuração regulatória ideal, exigindo adaptação dos instrumentos contratuais às particularidades regionais. A gestão pública deve perseguir transferências regulatórias que minimizem os desafios locais, melhorem a experiência do usuário e evoluam para uma regulação mais responsiva, considerando principalmente contratos por desempenho com indicadores e metas objetivas.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao apoio da CAPES, CNPQ e disponibilização de dados pela BHTRANS e SUMOB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDILA-GOMEZ, Arturo; DARIDO, Georges. Public Transport Reform in Developing Countries: lessons from experience. Transportation Research Procedia, [S.L.], v. 82, p. 2737-2749, 2025. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.216.

BARBOZA, K. F. F.; ORRICO FILHO, R.; SANTOS, E. M. Diretrizes para o aperfeiçoamento dos regulamentos do transporte público urbano de passageiros: o confronto de três estudos. Revista Transportes, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes, dezembro 2003.

CARVALHO, C. H. R. Estruturas Regulatórias dos Serviços de Ônibus Urbanos no Brasil, 2015

GOMIDE, A. A. (coord.) Regulação e organização do transporte público urbano em cidades brasileiras: estudos de caso. Brasília: Ipea-MCidades (Relatório de pesquisa), 2004.

HENSHER, David A.; STANLEY, John. Contracting regimes for bus services: what have we learnt after 20 years?. Research In Transportation Economics, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 140-144, jan. 2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2010.07.018.

HENSHER, David A. Customer service quality and benchmarking in public transport contracts. Int J Qual Innov 1, 4, mai. 2015. https://doi.org/10.1186/s40887-015-0003-9. Acesso em 23 jan 2025.

ORRICO FILHO, Rômulo Dante. ônibus urbano: regulação e mercados. Rio de Janeiro: Lge-Ler, 1996. 304 p.

STUMPF, Gabriel; MARQUES, Rui Cunha; GEDDES, R. Richard; SILVA, Rafael Igrejas da. Risk mitigation in urban bus concession contracts: overcoming uncertainties with a real options model. **Transport Policy**, [S.L.], v. 154, p. 73-83, ago. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.05.027.

Autores: *Daniel Marx Couto* – daniel.marx@pet.coppe.ufrj.br - PET/COPPE/UFRJ
Rômulo Dante Orrico Filho – romulo@pet.coppe.ufrj.br – PET/COPPE/UFRJ
Av. Horácio Macedo, 2030 - Bloco H - Sala 106 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-914

O REGIME JURÍDICO DAS DEBÊNTURES INCENTIVADAS DE INFRAESTRUTURA E SEUS EFEITOS NOS CONTRATOS DE CONCESSÃO FERROVIÁRIA

Francisco Gildemir F. Silva[1], **Thaís de Aragão Oliveira Araripe Palmeiras Dias**[2], **Raphael Vieira dos Santos**[3],
[1] Universidade Federal do Ceará – UFC/Universidade de Brasília – UnB,
[2] Universidade Federal do Ceará - UFC, [3] Universidade de Brasília – UnB

RESUMO
Este artigo examina, em perspectiva jurídica e regulatória, os desafios e as contradições que emergem da incorporação das debêntures incentivadas de infraestrutura aos contratos de concessão ferroviária, conforme disciplinado pela Lei nº 14.801/2024. Ao potencializar a captação privada com custos de capital sensivelmente reduzidos, esses instrumentos expõem lacunas na capacidade estatal de monitorar ganhos extraordinários e garantir que tais benefícios não se convertam em assimetrias contratuais duradouras. Com base na evolução normativa do WACC regulatório da ANTT e nas orientações recentes do Tribunal de Contas da União, propõe-se uma metodologia de aferição estruturada em critérios objetivos que orientam revisões contratuais sempre que identificadas distorções relevantes. Mais que uma contribuição técnica, este estudo sugere que a sofisticação dos mecanismos financeiros exige um novo patamar de governança, capaz de conciliar eficiência alocativa, modicidade tarifária e integridade regulatória no setor ferroviário brasileiro.

Palavras-Chave: Debêntures Incentivadas; Regulação Ferroviária; WACC Regulatório; Equilíbrio Contratual; Governança Econômica

1. INTRODUÇÃO

A literatura sobre concessões de infraestrutura, no Brasil e no contexto internacional, tem atribuído relevância crescente ao papel da regulação econômica por incentivos como estratégia de alinhamento entre os objetivos do poder público e os interesses das concessionárias. De Oliveira Sales & Aguiar Esteves (2021) destacam que esse modelo regulatório oferece instrumentos capazes de compatibilizar eficiência operacional e modicidade tarifária, por meio da previsão de cláusulas contratuais que penalizam desempenhos insatisfatórios e premiam práticas eficientes. No caso dos contratos de concessão ferroviária e rodoviária, tais mecanismos têm se associado à necessidade de cláusulas robustas de reequilíbrio econômico-financeiro, capazes de recompor a viabilidade contratual diante de eventos imprevisíveis ou de capturar benefícios extraordinários obtidos pelo concessionário (Mattos, 2018). Ainda assim, diversos autores alertam que tais instrumentos dependem de marcos normativos claros, autonomia decisória das agências reguladoras e capacidade técnica consolidada, sob pena de ampliação dos riscos de captura institucional e comprometimento dos princípios de transparência e interesse público (Ragazzo & Gomes Cuesta, 2021).

Autores como Valiati (2019) e Marques Neto (2019) enfatizam que o modelo brasileiro de regulação em infraestrutura caracteriza-se pela convivência entre a regulação por contrato (que estabelece direitos e obrigações originárias) e a regulação por agência (responsável por atualizar parâmetros), fiscalizar a execução e dirimir controvérsias. Esse arranjo institucional, embora propicie maior previsibilidade e estabilidade, também cria tensões em torno da definição de parâmetros sensíveis, como o custo médio ponderado de capital (*Weighted Average Cost of Capital* – WACC). A revisão recente da metodologia de cálculo do WACC regulatório ferroviário, materializada na Resolução ANTT nº 6.035/2024, reflete essa complexidade ao incorporar percentis de risco e cronogramas de atualização periódica. Entretanto, estudos como o de Saab & Silva (2022) evidenciam que a qualidade técnica das Análises de Impacto Regulatório (AIR) ainda apresenta fragilidades relevantes, especialmente quanto à comparação sistemática de alternativas e à mensuração dos custos e benefícios associados a parâmetros econômicos centrais, comprometendo o potencial da regulação baseada em evidências.

Apesar dos avanços normativos e metodológicos relacionados à regulação econômica e aos incentivos contratuais, observa-se uma lacuna específica na literatura quanto à interação entre a emissão de debêntures incentivadas de infraestrutura e o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão. Embora Ragazzo tenha estudos que examinam, de forma articulada, como a redução do custo efetivo de capital obtida via emissões com benefício fiscal podem impactar o risco de demanda sobre a precificação de cláusulas de saída, são escassos os estudos que examinam, de forma articulada, como a redução do custo efetivo de capital obtida via emissões com benefício fiscal pode gerar ganhos econômicos relevantes para o concessionário, sem

mecanismos contratuais claros de captura ou compartilhamento desses benefícios com o poder concedente. A proposta metodológica apresentada neste artigo busca preencher essa lacuna ao introduzir um modelo de análise de reequilíbrio financeiro dinâmico, ancorado em parâmetros objetivos e inspirado nas experiências regulatórias setoriais, com vistas a alinhar os avanços normativos trazidos pela Lei nº 14.801/2024 aos princípios de modicidade tarifária, eficiência alocativa e segurança jurídica.

2. O REGIME JURÍDICO DAS DEBÊNTURES DE INFRAESTRUTURA: FUNDAMENTOS LEGAIS E EFEITOS NA ESTRUTURA FINANCEIRA DAS CONCESSIONÁRIAS

A Lei nº 14.801/2024 instituiu um marco jurídico renovado para as debêntures de infraestrutura, consolidando a experiência normativa iniciada pela Lei nº 12.431/2011 e aprofundando os incentivos fiscais voltados à ampliação do mercado de capitais como fonte de financiamento de projetos logísticos de longa maturação. Entre as principais inovações, destaca-se a previsão de emissão de debêntures incentivadas vinculadas a projetos qualificados, como prioritários pela autoridade competente, conforme estabelece seu artigo 2º. O instrumento oferece, como contrapartida ao investidor pessoa física, a isenção do imposto de renda incidente sobre os rendimentos auferidos, gerando, na prática, um benefício fiscal indireto à empresa emissora ao permitir a captação a taxas mais competitivas. Como observam Ragazzo & Gomes Cuesta (2021), esse desenho normativo busca superar restrições fiscais e estimular uma maior participação do investidor privado no financiamento de infraestruturas críticas, reforçando a lógica de corresponsabilização entre Estado e mercado. Essa política se articula diretamente com as disposições da Lei nº 6.404/1976 (Lei das Sociedades por Ações), que regula os aspectos essenciais da emissão de debêntures, incluindo natureza jurídica, garantias, assembleia de debenturistas e hipóteses de vencimento antecipado, compondo um arcabouço legal que confere segurança e previsibilidade ao emissor e aos investidores.

A adoção das debêntures de infraestrutura tem impactos profundos sobre a estrutura financeira das concessionárias, uma vez que amplia a capacidade de captação de recursos de longo prazo em condições mais favoráveis e, potencialmente, reconfigura o custo médio ponderado de capital (WACC) aplicável ao projeto. Essa característica híbrida (instrumento privado na forma, mas público na finalidade) confere aos títulos uma natureza jurídica singular, que demanda atenção redobrada dos órgãos reguladores e do poder concedente na aferição de seus reflexos sobre o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos. Costa & Rocha (2021) assinalam que mecanismos contratuais que não considerem a redução efetiva do custo de *funding* podem criar assimetrias econômicas e distorções concorrenciais, especialmente em mercados marcados pela concentração societária. Nesse sentido, autores como Justen Filho (2023) e Valiati (2019) enfatizam que cabe à Administração Pública zelar pela compatibilidade entre os benefícios privados derivados da captação incentivada e os princípios da modicidade tarifária, isonomia entre os concessionários e eficiência na alocação de recursos públicos. Tal desafio se intensifica à medida que as debêntures incentivadas se consolidam como possível fonte significativa de financiamento de projetos ferroviários, exigindo, por consequência, a evolução dos instrumentos de monitoramento contratual e regulação responsiva.

Sob a perspectiva contratual, a emissão de debêntures incentivadas implica a necessidade de observância de deveres acessórios de comunicação, transparência e cooperação entre as partes, previstos nos artigos 113 e 422 do Código Civil brasileiro. A ausência de notificação formal à Administração Pública sobre a alteração substancial da estrutura de financiamento pode comprometer a governança contratual, inviabilizar a aferição tempestiva dos impactos sobre a remuneração do capital e obstaculizar o uso de instrumentos corretivos, como o reequilíbrio ou a revisão contratual. Além disso, a literatura sobre regulação econômica por incentivos evidencia que contratos sem mecanismos expressos de compartilhamento de ganhos financeiros ou cláusulas de revisão periódica do WACC tendem a acentuar riscos de distorção alocativa e captura de valor privado em detrimento da modicidade tarifária (De Oliveira Sales & Aguiar Esteves, 2021; Mattos, 2018). Nesse contexto, a consolidação das debêntures incentivadas como fonte predominante de *funding* de longo prazo torna premente a evolução dos contratos e das práticas regulatórias, de modo a contemplar cláusulas claras de monitoramento e captura de ganhos que preservem a equidade e a legitimidade do regime jurídico das concessões ferroviárias.

3. PARÂMETROS DE REMUNERAÇÃO DO CAPITAL NAS CONCESSÕES FERROVIÁRIAS E O PAPEL REGULADOR DA ANTT: ASPECTOS JURÍDICOS E NORMATIVOS

A regulação da remuneração do capital investido nas concessões ferroviárias brasileiras é competência central

da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), prevista nos artigos 22 a 25 da Lei nº 10.233/2001. A metodologia de definição do custo médio ponderado de capital (WACC), elemento crítico para assegurar o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos, foi inicialmente disciplinada pela Resolução nº 5.337/2017 e, posteriormente, atualizada pela Resolução nº 5.946/2021. Nessas versões anteriores, adotou-se como base o *Capital Asset Pricing Model* – CAPM para estimar o custo do capital próprio, mantendo-se uma estrutura ótima de capital fixada em 60% de dívida e 40% de capital próprio como parâmetro único e uniforme aplicável a todos os projetos ferroviários. A jurisprudência do Tribunal de Contas da União, consolidada no Acórdão nº 2394/2022, reforçou a necessidade de revisão periódica e de maior sofisticação metodológica na apuração do WACC. O Tribunal determinou à ANTT que realizasse estudos técnicos para avaliar a periodicidade de atualização dos parâmetros e incorporasse critérios mais dinâmicos de segmentação de risco. Entre os pontos destacados, figuram a necessidade de definição de percentis de risco que reflitam o grau de incerteza setorial, a atualização das séries históricas de dados e a previsão de ampla participação social, em conformidade com a Lei nº 13.848/2019. Essas orientações evidenciam uma transição para práticas de regulação responsiva, que dialogam com tendências observadas em outros setores de infraestrutura e se baseiam na Análise de Impacto Regulatório como instrumento de legitimação das decisões administrativas (Marques Neto, 2019).

Em atendimento às determinações do TCU e às contribuições colhidas na Audiência Pública nº 10/2023, a ANTT editou a Resolução nº 6.035/2024, que promoveu mudanças significativas na metodologia. A norma abandonou a fixação da estrutura ótima de capital em 60/40 como padrão obrigatório, passando a admitir ajustes calibrados conforme a natureza do projeto (*greenfield* ou *brownfield*) e o seu nível de risco. A resolução ainda institui a segmentação do WACC por faixas de risco, a atualização periódica da Taxa de Longo Prazo (TLP) como referência do custo da dívida e a possibilidade de revisão dos parâmetros a cada ciclo contratual. Ao permitir maior aderência do cálculo às condições contemporâneas do mercado de crédito e à heterogeneidade dos projetos, a nova metodologia busca reduzir distorções que poderiam resultar em "sobre-remuneração" ou "sub-remuneração" do capital, reforçando a efetividade do princípio da modicidade tarifária previsto na Lei nº 8.987/1995 e consolidando um ambiente regulatório mais transparente e responsivo (Villar & Vassallo, 2014).

4. METODOLOGIA DE ANÁLISE DE REEQUILÍBRIO DINÂMICO FINANCEIRO

A proposta metodológica delineada neste estudo parte do reconhecimento de que a recente revisão normativa operada pela Resolução ANTT nº 6.035/2024, embora tenha introduzido avanços como a segmentação do WACC regulatório por faixas de risco e a possibilidade de revisões periódicas, ainda não resolve integralmente os desafios decorrentes da utilização de debêntures incentivadas como fonte de financiamento. Conforme discutido em outros contextos na literatura (Costa & Rocha, 2021; Ragazzo & Gomes Cuesta, 2021), a redução significativa do custo efetivo de capital, proporcionada pela captação em mercado com benefícios fiscais, pode gerar desequilíbrios positivos em favor das concessionárias, comprometendo tanto a isonomia contratual quanto o princípio da modicidade tarifária previsto na Lei nº 8.987/1995. Apesar do esforço institucional para modernizar parâmetros regulatórios, a ausência de um instrumento sistemático de aferição dessas distorções evidencia uma lacuna metodológica relevante. Nesse contexto, a metodologia ora apresentada busca preencher esse vazio ao propor uma ferramenta técnico-jurídica capaz de verificar, de maneira objetiva, a magnitude e a materialidade da diferença entre o WACC regulatório e o WACC efetivo, ancorada nos princípios da Análise de Impacto Regulatório (AIR) previstos no Decreto nº 10.411/2020. Trata-se de oferecer subsídios claros e previsíveis para fundamentar decisões de revisão contratual, mitigar riscos de captura econômica e fortalecer a governança pública sobre contratos de alta complexidade financeira.

A **Tabela *1*** consolida um *checklist* de verificação, estruturado em itens que contemplam aspectos substantivos (como a diferença percentual entre os custos de capital e a existência de cláusulas de captura de ganhos) e elementos procedimentais ligados à transparência e participação institucional. Atribuem-se pesos diferenciados conforme a relevância jurídico-regulatória de cada item, permitindo que a soma dos pontos funcione como critério objetivo para recomendar a reavaliação contratual sempre que se ultrapassar o limite de 7 pontos. Esse modelo inspirou-se em metodologias já aplicadas pela ANEEL na revisão da Taxa Reguladora de Remuneração de Capital (2020) e pela própria ANTT nos regulamentos setoriais rodoviários (Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2024, 2025), adaptando-as às especificidades do setor ferroviário

e à complexidade adicional trazida pelos instrumentos de dívida com benefício fiscal.

Tabela 1: Metodologia de análise jurídica e contratual de pontuação para reequilíbrio dinâmico

Item de verificação	Resultado Possível	Pontuação	Ação recomendada
Diferença entre o WACC efetivo (ex: via debêntures) e o WACC regulatório > 2%	Sim/Não	3	Se Sim → Reavaliação obrigatória
Existência de cláusula contratual de captura de ganhos financeiros	Sim/Não	3	Se Não → Alteração contratual recomendada
Existência de cláusula de revisão periódica do WACC no contrato	Sim/Não	2	Se Não → Alteração contratual recomendada
Comunicação formal da concessionária sobre novo modelo de financiamento	Sim/Não	2	Se Não → Determinar providências administrativas
Previsão de faixas de risco no contrato alinhadas à Resolução 6.035/2024b	Sim/Não	2	Se Não → Recomendação de atualização contratual
Participação prévia da agência reguladora no processo de mudança de estrutura	Sim/Não	1	Se Não → Recomendar notificação e ajuste
Existência de impactos mensuráveis no equilíbrio da TIR contratual	Sim/Não	3	Se Sim → Avaliação de reequilíbrio obrigatória

A sistemática apresentada busca responder a um ponto crítico identificado na literatura especializada: a inexistência de instrumentos capazes de monitorar de forma contínua e parametrizada os impactos da redução do custo de *funding* sobre a equação econômico-financeira dos contratos. Atribuir pontuação diferenciada aos itens de verificação, com pesos que reflitam sua relevância para a preservação do equilíbrio contratual, permite ao regulador adotar decisões proporcionais à magnitude da distorção constatada. Assim, situações em que se verifique, por exemplo, uma diferença superior a 2% entre o WACC regulatório e o WACC efetivo ou a ausência de cláusulas de captura de ganhos financeiros ensejam resposta mais incisiva, como a reavaliação obrigatória do contrato. Já fatores de natureza procedimental (como a comunicação formal da concessionária ou a participação prévia da agência reguladora) assumem caráter instrumental, sem perder seu valor para a transparência e a boa-fé objetiva que regem a execução contratual.

Além de seu potencial normativo, a metodologia proposta guarda relevância prática por criar uma referência objetiva que pode ser incorporada em futuros editais e minutas contratuais, contribuindo para qualificar o ambiente regulatório e reduzir custos de transação associados a disputas interpretativas. Ao antecipar critérios e estabelecer parâmetros claros, o *checklist* fortalece o poder discricionário vinculado do Estado, ampliando a previsibilidade e a legitimidade das decisões de reequilíbrio econômico-financeiro. Sob esse prisma, a ferramenta não apenas preenche uma lacuna regulatória identificada pela doutrina e pela jurisprudência recente do TCU, mas também dialoga com a necessidade de dotar a ANTT de instrumentos mais sofisticados para acompanhar a evolução dos mecanismos de financiamento. Trata-se, em última instância, de alinhar inovação financeira e integridade regulatória no contexto de um setor que se projeta como eixo estratégico da infraestrutura brasileira.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise jurídica e regulatória empreendida neste estudo demonstra que a crescente utilização de debêntures incentivadas como instrumento de financiamento nas concessões ferroviárias impõe desafios inéditos à preservação do equilíbrio econômico-financeiro contratual. A redução efetiva do custo de capital decorrente da emissão desses títulos, associada à ausência de cláusulas contratuais específicas de captura de ganhos, cria riscos de distorções que podem comprometer a modicidade tarifária e a isonomia entre os agentes do setor. Nesse contexto, a recente edição da Resolução ANTT nº 6.035/2024, em resposta às determinações do Tribunal de Contas da União, revela um esforço institucional consistente para atualizar as metodologias de precificação do WACC, incorporar faixas de risco diferenciadas e promover maior aderência regulatória às condições contemporâneas de financiamento, conforme recomendado pela literatura especializada (De Oliveira Sales & Aguiar Esteves, 2021; Ragazzo & Gomes Cuesta, 2021). A proposta metodológica aqui apresentada, ancorada nos princípios da Análise de Impacto Regulatório e na quantificação objetiva de distorções financeiras, visa contribuir para o aperfeiçoamento da governança contratual e para a evolução do modelo regulatório brasileiro no setor ferroviário. Ao estabelecer parâmetros claros e verificáveis de aferição da diferença entre o WACC regulatório e o WACC efetivo, o *checklist* proposto consolida-se como um instrumento técnico-jurídico que

reforça a capacidade do Estado de atuar de maneira preventiva e responsiva, mitigando ganhos excessivos por parte das concessionárias e assegurando o alinhamento dos contratos com o interesse público. Essa perspectiva se mostra compatível com o novo ciclo de investimentos em logística e transporte no Brasil, que demanda soluções regulatórias inovadoras e comprometidas com a transparência, a eficiência e a sustentabilidade econômica dos projetos de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). *Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 2/2020 – SRM. Aprimoramento da regulação relacionada à classificação das instalações, condições de acesso e conexão ao sistema de transmissão.*

Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2024). *Relatório de Análise de Impacto Regulatório - Regulamento das Concessões Rodoviárias (RCR 4)*. ANTT.

Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2025). *Relatório de Análise de Impacto Regulatório - Regulamento das Concessões Rodoviárias (RCR 5)*.

Costa, F. do A., & Rocha, C. H. (2021). Risco de demanda e abandono contratual: uma análise por opções reais da concessão da rodovia BR-381/262/MG/ES. *TRANSPORTES*, *29*(4). https://doi.org/10.14295/transportes.v29i4.2371

De Oliveira Sales, S. B., & Aguiar Esteves, M. (2021). Regulação econômica por incentivos e seus reflexos nas agências reguladoras. *Revista Eletrônica Direito e Política*, *16*(1), 306–323. https://doi.org/10.14210/rdp.v16n1.p306-323

Justen Filho, M. (2023). *Comentários à Lei de Licitações e Contratações Administrativas* (2º ed). Thomson Reuters.

Marques Neto, F. P. de A. (2019). Do contrato administrativo à administração contratual. *Revista de Direito Administrativo e Infraestrutura - RDAI*, *3*(9), 341–352. https://doi.org/10.48143/rdai/09.fmn

Mattos, C. C. A. de. (2018). Road Infrastructure in Brazil and regulatory economic incentives. *Revista de Direito Administrativo e Infraestrutura - RDAI*, *2*(5), 49–76. https://doi.org/10.48143/rdai/05.ccam

Ragazzo, C. E. J., & Gomes Cuesta, K. S. (2021). Governança Regulatória para Incentivos Fiscais: Prevenção à Corrupção. *Direito Público*, *18*(98). https://doi.org/10.11117/rdp.v18i98.3970

Saab, F., & Silva, S. de A. M. e. (2022). What is the quality of the regulatory impact analysis prepared by Brazilian regulatory agencies? *Revista de Administração Pública*, *56*(4), 529–549. https://doi.org/10.1590/0034-761220220111x

Valiati, T. P. (2019). O sistema duplo de regulação no Brasil: a regulação por contrato complementada pela regulação por agência. *Revista de Direito Administrativo e Infraestrutura - RDAI*, *3*(8), 23–58. https://doi.org/10.48143/rdai/08.tpv

Villar, P. P. De, & Vassallo, J. M. (2014). Optimal safety incentives in road concession contracts. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. https://doi.org/10.18757/EJTIR.2014.14.4.3044

Francisco Gildemir Ferreira da Silva (gildemir@ufc.br)
Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Exatas (ICE), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Programa de Pós-Graduação em Transporte, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil.
Universidade Federal do Ceará – UFC, Campus do Pici, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

Thaís de Aragão Oliveira Araripe Palmeira Dias (thais.araripe@agrespi.gov.br)
Agência Reguladora dos Serviços Públicos Delegados do Estado do Piauí (Agrespi). Rua Jaicós, 1435, Teresina, PI, Brasil.
Universidade Federal do Ceará – UFC, Campus do Pici, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

Raphael Vieira dos Santos (raphael.vieira@infrasa.gov.br)
INFRA S.A. Setor de Autarquia Sul (SAUS), Quadra 01, Bloco G, Lotes 3 e 5, Asa Sul, Brasília, DF, Brasil.
Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Exatas (ICE), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Programa de Pós-Graduação em Transporte, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil.

PONTOS DE PARADA E DESCANSO PARA CAMINHONEIROS EM RODOVIAS FEDERAIS CONCEDIDAS: ANÁLISE DA ATUAÇÃO REGULATÓRIA DA ANTT

Alan Medeiros Otani[1], Sérgio Ronaldo Granemann[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
A construção de pontos de parada e descanso (PPDs) para caminhoneiros pelas concessionárias de rodovias é uma obrigação estabelecida pela Lei nº 13.103/2015. Mas em uma década, somente oito estruturas foram criadas em rodovias federais concedidas, e a regulamentação desses locais de repouso pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) demorou quase dez anos. O objetivo desse artigo é identificar riscos e avanços do novo regulamento dos PPDs, investigando o processo regulatório à luz da Teoria da Regulação Responsiva, incorporada pela ANTT. Trata-se de um estudo de caso ao nível regulatório no Brasil, baseado em revisão bibliográfica e documental sobre regulação responsiva e atuação da ANTT. Nas análises, a proposta normativa é confrontada com a falha regulatória apontada como causadora do atraso na implantação dos PPDs, e são demonstradas semelhanças, diferenças e ausências entre o processo de regulamentação dos PPDs e as características da regulação responsiva.

1. INTRODUÇÃO

A construção de pontos de parada e descanso (PPDs) para caminhoneiros por concessionárias de rodovias foi estabelecida pelo Art. 10 da Lei nº 13.103/15. Entende-se por PPDs as instalações existentes nas rodovias para paradas de caminhões, com estacionamento, onde os caminhoneiros podem se alimentar, tomar banho, dormir, além de utilizar outras comodidades (Krasniuk *et al*., 2024). O Decreto Presidencial n° 8.433/15 determinou que compete à ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) a regulamentação das disposições do Art. 10 referentes aos PPDs em rodovias federais concedidas.

Decorridos dez anos depois das publicações da lei e do decreto, somente oito pontos de parada e descanso foram construídos por concessionárias em rodovias federais em todo o Brasil, somando 804 vagas de estacionamento para caminhões (Ministério dos Transportes, 2025a), diante de um cenário atual com 31 concessões rodoviárias (Ministério dos Transportes, 2025b). A distribuição de opções de descanso para caminhoneiros é esparsa em partes do Brasil e uma restrição ao setor de transportes (Mayerle *et al*., 2020).

Em dez anos, a ANTT atuou para a implantação de PPDs com diferentes instrumentos, mas só os regulamentou, de fato, a partir da Resolução nº 6.054/2024. Além disso, em 2021 foi incluída no mapa estratégico da ANTT para o Ciclo do Planejamento Estratégico 2020-2030 a atuação responsiva, definida como conceito moderno que abrange melhores práticas regulatórias conforme a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, tendo como foco o resultado (Antt, 2021). A atuação responsiva fornece iniciativas políticas para soluções mais adequadas de acordo com o contexto, a cultura da regulação e a sua história (Ayres e Braithwaite, 1992, p.5). Tais iniciativas emergem no espaço da interação entre regulação do Estado e do setor privado e da influência mútua entre eles (Aranha, 2025, p. 123), e o Estado deve utilizar da persuasão e resguardar a punição, pois quanto menores forem as evidências das técnicas de controle à conformidade, maiores serão as chances de que o regulado internalize a norma em seu comportamento (Aranha, 2025, p. 141-142).

Diante das dificuldades das concessionárias para a construção desses espaços, visando à adequação à legislação e em meio à mudança normativa da ANTT, o objetivo deste artigo é identificar riscos e avanços da nova regulamentação dos PPDs à luz da Teoria da Regulação Responsiva, investigando se o novo regulamento tem potencial de efetivar a política pública de pontos de parada ainda deficitária nas rodovias federais concedidas.

2. MÉTODOS

Trata-se de um estudo de caso ao nível regulatório no Brasil, baseado em revisão bibliográfica e documental sobre regulação responsiva e atuação da ANTT. Primeiramente, investiga-se o histórico de atuação da ANTT ante à Lei n°13.103/15, no que se refere à implantação dos PPDs pelas concessionárias de rodovias, identificando a falha regulatória que culminou no atraso da implantação plena da política pública e o que houve de avanço no modelo regulatório no decorrer de uma década. Em seguida, são comparados os principais dispositivos da resolução que finalmente regulamentou os PPDs às características de relevância da teoria da regulação responsiva. A análise busca semelhanças, diferenças e ausências entre o processo de regulamentação pela Agência sobre os pontos de parada e descanso e as características da regulação responsiva.

3. O ATRASO NA ENTREGA DOS PPDS E A FALHA REGULATÓRIA

A Lei nº13.103/15 determinou prazo máximo de cinco anos a partir de sua publicação para que o poder público adotasse as medidas necessárias visando à expansão de áreas de repouso para os motoristas profissionais do transporte rodoviário de cargas e de passageiros. A legislação previa também a inclusão obrigatória de cláusulas em contratos de concessão de rodovias futuros e a revisão das concessões em vigor, de modo a definir "a construção de pontos de parada e descanso, respeitando o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos". No entanto, até 2021, os estacionamentos disponibilizados para caminhoneiros em rodovias federais concedidas limitavam-se a pátios de postos de combustíveis certificados como pontos de parada pelo então Ministério da Infraestrutura com o apoio da ANTT (Ministério dos Transportes, 2021).

Os dois primeiros PPDs construídos em rodovia federal a partir de um contrato de concessão foram entregues em setembro de 2022 pela Ecovias do Araguaia e estão localizados na BR-153, um em Uruaçu (GO) e outro em Talismã (TO) (Ministério dos Transportes, 2022). Já a primeira resolução da ANTT com dispositivos reguladores visando à construção dos PPDs é de dezembro de 2022, portanto, posterior à entrega dos primeiros PPDs. A Resolução nº 6.000/2022 estabeleceu que as concessionárias deverão fomentar e priorizar a implantação de PPDs, mediante celebração de projeto de interesse de terceiro ou com a inclusão de obrigação mediante recomposição do equilíbrio econômico-financeiro no contrato.

A resolução foi publicada após a ANTT ser diligenciada pelo Tribunal de Contas da União (TCU) pela inobservância da obrigatoriedade da construção de PPD no Edital de Concessão 4/2021, da BR-381/262, entre Minas Gerais e Espírito Santo, como consta no relatório de análise de impacto regulatório SEI nº 17815644 (Antt, 2024b) sobre pontos de parada e descanso. Nesse mesmo documento, a Agência afirma existir uma legislação sobre os PPDs "esparsa, coexistindo normativos editados pelo Ministério dos Transportes, pelo então Ministério da Economia e pela própria ANTT" e que, diante disso, são necessários melhores critérios para uma regulação específica que possa ampliar a implementação de PPDs (Antt, 2024b). A coexistência ou sobreposição de regulamentações pode gerar problemas à regulação ao tornar obscuros objetivos da política pública e gerar dificuldade ao desenvolvimento eficaz de regulamentações (Robb *et al.,* 2023).

O relatório de análise de impacto regulatório tornou-se público em março de 2024, na relação de documentos técnicos apresentados pela ANTT a propósito da Audiência Pública n°2/2024. A proposta da Agência era reunir contribuições de concessionárias de rodovias, entidades representativas do setor de transporte rodoviário de cargas e de defesa dos caminhoneiros para a "minuta de resolução que aprova o Regulamento dos Pontos de Parada e Descanso sob competência da ANTT" (Antt, 2024b). Assim, a Agência atuou para definir uma efetiva regulamentação sobre o tema, ampliando as diretrizes da Resolução n° 6.000/2022.

Para a ANTT, o principal problema à implantação de PPDs tinha relação com as especificidades de modelos de exploração das faixas de domínio e dos bens da União nas rodovias federais concedidas, critérios que não estão indicados na lei nem no decreto publicados pelo governo (Antt, 2024b). Era preciso um detalhamento às concessionárias no sentido de propor modelos de negócio que estimulem o desenvolvimento de PPD e promovam a segurança viária e das cargas, como também a oferta de "outros serviços para os usuários-consumidores nas rodovias federais concedidas" (Antt, 2024b). Diante dessa percepção, a Agência afirmou existir uma insegurança jurídica para as concessionárias e uma falha regulatória (Antt, 2024b).

Sob o aspecto da entrega de benefícios aos caminhoneiros, o atraso da regulamentação dos PPDs adiou a prestação de serviço que se pretendia atingir com a lei no que se refere à saúde e à segurança viária desejáveis (Antt, 2024b). Pesquisadores na área do transporte no Brasil, como Soliani *et al.* (2025), identificaram a necessidade da melhora de políticas públicas para os caminhoneiros diante de condições consideradas extremas da categoria, como o descanso inadequado entre jornadas de trabalho.

Essa demora na regulamentação dos PPDs fica evidente diante do atraso das entregas de PPDs já previstos em contratos de concessão e da não observância da obrigatoriedade em outros, conforme mostra o relatório de análise de impacto regulatório (Antt, 2024b). Para complementar esse relatório, a ANTT solicitou informações às concessionárias que detém PPD instalado ou pelo menos a previsão de estudo para implantação. A Concessionária Via Brasil, com contrato de concessão do trecho da BR-163/MT/PA e BR-230/PA, deveria

entregar dois PPDs até maio de 2024 e, até então, não havia entregado nenhum; a CCR Via Costeira, a CCR Via Sul e a CCR RioSP limitaram-se a informar que não possuíam PPDs e deram sugestões sobre pavimento dos estacionamentos; a EcoRioMinas disse ter encaminhado estudos locacionais sobre dois PPDs em 2023; a Ecovias do Araguaia, única concessionária que havia entregue PPDs até então, deu detalhes sobre a infraestrutura dos locais (Antt, 2024b).

Com efeito, até julho de 2025, oito PPDs foram construídos em rodovias federais (Ministério dos Transportes, 2025a). Além dos dois pontos de parada e descanso implantados pela Ecovias do Araguaia em 2022, foram entregues PPDs pelas concessionárias: Arteris, na BR-101 em Palhoça (SC); CCR RioSP, na BR-116, sendo um em Pindamonhangaba (SP) e outro em Itatiaia (RJ); EcoRioMinas, na BR-116, sendo um em Seropédica (RJ) e outro em Ubaporanga (MG); e Via Brasil, na BR-163 em Novo Progresso (PA). Dos oito PPDs, três foram entregues após a publicação da Resolução nº6.054/2024, resultado da Audiência Pública nº2/2024 da ANTT. Há ainda mais oito PPDs em construção e outros 13 previstos (Ministério dos Transportes, 2025a).

4. COMPARANDO A RESOLUÇÃO N°6.054/2024 COM A TEORIA DA REGULAÇÃO RESPONSIVA

O principal problema regulatório relacionados aos PPDs, segundo a ANTT, foi a falta de critérios na regulação a partir de modelos de negócio que ofereçam segurança e conforto aos motoristas profissionais e que possibilitem também a geração de receitas não-tarifárias às concessionárias a partir de serviços adicionais não gratuitos (Antt, 2024b). De fato, tradicionalmente as concessões rodoviárias são classificadas como empreendimentos financiados pelo pagamento de pedágio por usuários das rodovias (Freitas, 2017). No âmbito regulatório, é perante falhas recorrentes que a regulação responsiva se apresenta como uma prescrição política para buscar novas estratégias (Braithwaite, 2014).

Nesse sentindo, a Resolução nº 6.054/2024, que regulamenta os PPDs sob competência da ANTT, apresentou três modelos de PPDs como forma de "fomentar a receita não tarifária de forma responsiva" (Antt, 2024a). No modelo básico, são propostos serviços essenciais mínimos, com investimentos e despesas de operação pagos pela tarifa de pedágio; o modelo com parceria prevê geração de receitas não tarifárias e autoriza prestações de serviços adicionais não gratuitas, com investimentos e despesas subsidiados por parceiro da concessionaria, sendo a administração do PPD por gestão de condomínio; o terceiro modelo é chamado empreendedor e concebido como "obra de grande vulto em projeto gerador de receitas não tarifárias", em que "o projeto estável financia tanto os investimentos como as despesas operacionais, por subsidiária integral da concessionária ou projeto associado, autorizado o fornecimento de serviços adicionais não gratuitos" (Antt, 2024b).

Assim, a regulação inova ao possibilitar o uso de receita não-tarifária para garantir saúde, segurança e bem-estar aos caminhoneiros (Antt, 2024b). No entanto, Aranha (2025, p. 132) afirma que "não se deve confundir uma abordagem responsiva com o culto pela recompensa". Por outro lado, a ANTT argumenta que a captação de receita complementar mostra-se uma inovação do poder regulador perante às concessões, desde que feita "de forma cautelosa e responsiva", com discussões envolvendo a Agência e os agentes externos (Antt, 2024b).

Braithwaite (2021) diz que o regulador responsivo deve ser um ouvinte que persista em busca da resolução do problema até que o objeto em discussão não seja mais um problema. Sob esse prisma, a resolução que regulamenta os PPDs prevê o envolvimento de partes interessadas. Conforme o Art. 3° (Antt, 2024a), entidades que representam os caminhoneiros poderão analisar os estudos locacionais das concessionárias que antecedem a definição de qual modelo de PPD será implantado. O Art. 25 determina que a ANTT deverá firmar parceria para que a qualidade e a disponibilidade dos PPDs sejam avaliadas por entidade setorial de transporte, e a regulamentação responsiva aguarda, incentiva e, por vezes, exige melhoria contínua (Braithwaite, 2021).

O Art. 24 estabelece a necessidade à concessionária de realizar pesquisa de satisfação sobre os serviços oferecidos nos pontos de parada e descanso. O dispositivo aqui pressupõe a exigência de que a empresa internalize custos de aferição da qualidade a partir da verificação da observância das normas, uma característica apontada por Aranha (2025, p.171) como elemento da autorregulação regulada da teoria responsiva.

Para fortalecer motivações voltadas à transformação, é dever dos reguladores responsivos se concentrar nas declarações dos regulados e ressaltar o diálogo sobre mudanças nessas declarações (Braithwaite, 2021). Nesse sentido, o processo de audiência pública que antecedeu a regulamentação dos PPDs dialogou com

concessionárias de rodovias e com a ABCR (Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias), além de associações que representam caminhoneiros e usuários de rodovias (ANTT, 2024b). Foram apresentadas 64 contribuições à minuta de resolução dos PPDs, sendo 13 delas acolhidas totalmente e 10 parcialmente.

No que pese as contribuições acolhidas, a resolução, no entanto, criou um conflito entre normativos. Isso porque a Portaria nº 387/2024 (Ministério dos Transportes, 2024b) afirma que "deverão ser previstas a implantação e a operação de no mínimo um PPD nos contratos de concessão vigentes", objetivando o início das operações no PPD em 2025. Por outro lado, a ANTT fixou prazo diferente para o início de operação de novos PPDs, sendo nos primeiros três anos, quando se tratar de PPD básico, e nos primeiros cinco anos, se forem PPDs construídos e operados com parcerias (Antt, 2024a). Ou seja, há divergências entre os dois normativos quanto à obrigatoriedade da prestação de serviços relativa aos PPDs, o que pode não ser positivo para a regulação, pois o gestor e as partes envolvidas terão maior segurança jurídica sobre um caso concreto quanto maior for a clareza a respeito de qual norma incide e regula determinada situação, sem sobreposição de regras e permanência de outras já superadas (Brasil, 2024, p.59).

Ademais, consta no relatório de análise de impacto econômico a prerrogativa de que o não cumprimento de requisitos para a implementação dos PPDs pode resultar em penalidades contratuais e administrativas às concessionárias com custos que podem variar significativamente em multas e sanções impostas pela Agência (Antt, 2024b). Entretanto, a resolução afirma somente que os PPDs "devem seguir as regras estabelecidas nos contratos de concessão, cabendo ainda observar o disposto nesta resolução nos casos de omissão ou disciplina insuficiente da matéria, desde que não contrarie cláusula contratual" e que a Agência irá "verificar a conformidade da oferta de serviços dos PPDs" conforme a norma (Antt, 2024b).

Nessa perspectiva, a ausência de dispositivos na resolução que estabeleçam penalidades ou punições em casos de omissão parece não suprir uma função do regulador responsivo, a de transmitir aos entes regulados descumpridores que sofrerão persecução perante as normas que não adotarem (Aranha, 2025, p. 140). Ainda assim, a regulação responsiva reserva espaço ao diálogo no sentido de regular a conduta à solução por consenso, com medidas de correção que não necessariamente antecedam punição, pois a teoria reserva essas medidas "ao regulado merecedor do tempo e esforço do regulador em cooperar" (Aranha, 2025, p.179).

5. CONCLUSÃO

É possível constatar que a ANTT superou a falha regulatória. A definição de modelos de PPDs, com uso de faixas de domínio e possibilidade de geração de receitas não-tarifárias, distancia a insegurança jurídica das concessionárias, fator considerado como principal entrave para a construção de pontos de parada e descanso. Esse é um elemento potencial para incentivar a implantação de estacionamentos com prestações de serviço aos motoristas profissionais e, ainda, gerar lucro às concessionárias, representando de fato um avanço regulatório.

A definição dos modelos não gerou transtornos às concessionárias que implantaram PPDs antes da regulamentação porque as estruturas estão suscetíveis a avalições e melhorias conforme prevê a regulamentação. A Agência criou ambiente de interação profícuo e transparente com regulados e representantes de usuários, envolvendo efetivamente as partes interessadas, o que significa outro avanço.

No tocante aos prazos para execução dos PPDs, a ANTT divergiu do Ministério dos Transportes, o que pode gerar questionamentos por parte dos regulados, assim como a ausência na resolução de sanções em eventuais descumprimentos pelas concessionárias. Esses são dois riscos para a plenitude da política pública.

Ainda assim, após a regulamentação, três PPDs foram entregues, oito novos estão em obras e há previsão de outros 13. Dessa forma, existe então uma lacuna para estudos futuros analisarem resultados dessa regulamentação quanto às implementações dos PPDs, aos prazos estabelecidos, à avaliação dessas estruturas ou às eventuais medidas de fiscalização e punição pela Agência em casos de descumprimento da norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2021. Atuação responsiva é incluída no mapa estratégico da ANTT. Disponível em: www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/atuacao-responsiva-e-incluida-no-mapa-estrategico-da-antt (acesso em 24/06/2025).

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2022. Resolução n°6.000/2022. Disponível em: anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=RES&numeroAto=00006000&seqAto=000&valorAno=2022&orgao=DG/ANTT/MI&cod_modulo=161&cod_menu=7796 (acesso em 24/06/2025).

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2024a. Resolução n°6.054/2024. Disponível em: anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&sgl_tipo=RES&num_ato=00006054&seq_ato=000&vlr_ano=2024&sgl_orgao=DG/ANTT/MT&cod_modulo=623&cod_menu=9230 (acesso em 24/06/2025).

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2024b. Audiência Pública 2/2024. Disponível em https://participantt.antt.gov.br/Site/AudienciaPublica/VisualizarAvisoAudienciaPublica.aspx?CodigoAudiencia=558 (acesso em 24/06/2025).

Aranha, M. I. (2025) *Manual de Direito Regulatório: Fundamentos de Direito Regulatório* (10ª. ed.). Londres: Laccademia Publishing.

Ayres, I. e J. Braithwaite (1992) *Responsive Regulation: Transcending the Deregulation Debate*. Nova Yorque: Oxford University Press.

Braithwaite, J. (2014). Evidence for Restorative Justice. *Vermont Bar Journal*, v.40, p.18-27. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282651606_Evidence_for_Restorative_Justice (acesso em 24/06/2025).

Braithwaite, J. (2021). Street-Level Meta-Strategies: Evidence on Restorative Justice and Responsive Regulation. *Annual Review of Law and Social Science*, v.17, p.205-225. DOI: 10.1146/annurev-lawsocsci-111720-013149

Brasil (2024) *Boas Práticas Regulatórias: Programa de Aprimoramento da Qualidade da Regulação Brasileira*. Brasília: Controladoria-Geral da União.

Freitas, R. V. D. (2017) O equilíbrio econômico-financeiro nas concessões de rodovias. *Revista de Direito Público da Economia (RDPE)*, v. 58, p. 199-239. Disponível em: https://editoraforum.com.br/wp-content/uploads/2017/07/equilibrio-financeiro-concessoes.pdf

Krasniuk, S.; M. K. Lemke; A. Hassoun; A. Hege e A. M. Crizzle (2024) Improving truck stop environments to support long-haul truck driver safety and health: A scoping review. *Transportation Research part A: Policy and Practice*, v.185. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104123

Mayerle, S. F.; D. M. G. Chiroli; J. N. Figueiredo e H. F. Rodrigues (2020) The long-haul full-load vehicle routing and truck driver scheduling problem with intermediate stops: An economic impact evaluation of Brazilian polic. *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, v. 140, p. 36-51. DOI: 10.1016/j.tra.2020.07.021

Ministério dos Transportes (2021). Pontos de parada e descanso certificados até abril de 2021. Disponível em: www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre_/portal-trc/arquivos/4-mapa-de-ppd-aprovados.pdf (acesso em 24/06/2025).

Ministério dos Transportes (2022). Concessionária Ecovias do Araguaia entrega o primeiro Ponto de Parada e Descanso para caminhoneiros das concessões reguladas pela ANTT. Disponível em: www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/concessionaria-ecovias-do-araguaia-entrega-o-primeiro-ponto-de-parada-e-descanso-para-caminhoneiros-das-concessoes-reguladas-pela-antt (acesso em 24/06/2025).

Ministério dos Transportes (2025a). Pontos de Parada e Descanso – PPD. Disponível em: app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjVmYWUyNmQtYmY4OC00YTYyL%20WE4MjctZTYzOTY3ZmVmNjI0IiwidCI6IjdiZjAxYzZhLWU2ZmItNDIxYS1iYmIyL%20WI5MGMzZWE4NjhmNyJ9 (acesso em 24/06/2025).

Ministério dos Transportes (2025b). Lista de Concessões Rodoviárias. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes (acesso em 24/06/2025).

Presidência da República. Decreto nº 8.433, de 16 de abril de 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/decreto/d8433.htm (acesso em 24/06/2025).

Presidência da República. Lei nº 13.103, de 2 de março de 2015. Revoga a Lei nº12.619, de 30 de abril de 2012, e altera a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, Código de Trânsito Brasileiro – CTB. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015- 2018/2015/lei/l13103.htm (acesso em 24/06/2025).

Robb, L.; T. Candy e F. Deane (2023) Regulatory overlap: A systematic quantitative literature review. *Regulation and Governance*, v. 17, p. 1131–1151. DOI: 10.1111/rego.12504

Soliani, S. R.; A. C. Lorena; A. V. B. Lopes; F. Santiago; L. B. da Silva e N. Emekwuru (2025) Risk of crashes among self-employed truck drivers: Prevalence evaluation using fatigue data and machine learning prediction models. *Journal of Safety Research*, v. 92, p. 68–80. DOI: 10.1016/j.jsr.2024.11.002

Alan Medeiros Otani (alan.jor90@gmail.com)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Avenida L3 Norte - Asa Norte – Brasília, DF, Brasil
Sérgio Ronaldo Granemann (sergiog@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Avenida L3 Norte - Asa Norte – Brasília, DF, Brasil

POTENCIAIS DE PECUÁRIA E SEU PAPEL NA ESTRATÉGIA DE FINANCIAMENTO DE INFRAESTRUTURAS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA BR-020

Joaquim José Guilherme de Aragão[1], **Ana Clara Trindade Freitas**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
O presente artigo tem por objetivo testar novas estratégias de financiamento de infraestruturas viárias por meio da inserção do investimento em uma estratégia de desenvolvimento espacial, onde potenciais produtivos ainda não mobilizados deverão produzir efeitos multiplicadores econômicos e fiscais, de forma que os últimos possam cobrir as despesas públicas relativas ao investimento. Essa hipótese é testada em um estudo de caso situado no Oeste do Estado da Bahia: trata-se de um trecho ainda não implantado da BR-020, onde se explora os potenciais de pecuária. Um cenário de crescimento da pecuária no trecho é proposto, e é calculado o valor hipotético da produção. Uma comparação desse valor com o custo da obra demonstra que essa pode ser financiada pelo desenvolvimento da pecuária ao longo do trecho a implantar.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte, ao conectar diferentes áreas e facilitar o fluxo de pessoas e mercadorias, desempenha um papel estratégico tanto na promoção do desenvolvimento regional quanto na redução das desigualdades. Sistemas de transporte eficientes e integrados contribuem para a melhoria da produtividade e da competitividade, reduzindo custos, ampliando oportunidades de negócios e fortalecendo a integração de mercados. Essa dinâmica favorece a atração de novos investimentos e a criação de empregos, gerando impactos positivos no desenvolvimento regional (Walter, 2016; Kumari e Sharma, 2017; Srinivasu e Rao, 2013). O investimento em infraestrutura de transporte, quando combinado a projetos produtivos, não apenas otimiza a circulação de bens e serviços, mas também fortalece a competitividade regional e impulsiona a geração de renda, promovendo um crescimento econômico sustentável e equilibrado e a coesão territorial, (Rodrigue, 2020).

Contudo, os investimentos em infraestrutura enfrentam diversos obstáculos, a começar com os limites orçamentários para expansão com os custos cada vez maiores de manutenção. E mesmo com o aumento da participação do setor privado no investimento em infraestrutura, as concessões têm mostrado suas limitações, dado que esses requerem resultados financeiros que são difíceis de obter quando os mercados logísticos regionais não produzem os fluxos necessários para equilibrar a equação financeira dos contratos. E isso ocorre sobretudo em regiões periféricas, embora apresentem potenciais de crescimento.

O presente artigo parte então do problema de como viabilizar os investimentos nas periferias. E a hipótese se solução é inserir o investimento em infraestrutura de forma concomitante em empreendimentos de dinamização econômica das regiões a serem atendidas; reunindo, assim, o planejamento da infraestrutura com o do desenvolvimento do território. Essa junção diversifica as fontes de receita, reduzindo os riscos, pois o negócio consiste em um complexo de projetos de investimento que apresenta um fluxo financeiro mais equilibrado, na medida em que eles se alimentam mutuamente. O objetivo do presente artigo é demonstrar que essa inserção pode produzir efeitos multiplicadores que surgem dessa sinergia e cubram as despesas públicas com o investimento viário

Tal hipótese é corroborada em literatura sobre iniciativas de desenvolvimento espacial (*Spatial Development Initiatives*), termo esse que tem sido usado como guarda-chuva para várias estratégias de zonas e eixos de dinamização, tais como zonas de processamento de exportação (ZPE's), clusters industriais (inclusive agro-industriais), tecnópoles, eixos de desenvolvimento e corredores, esses subclassificados em corredores de transporte, logístico, econômicos e de desenvolvimento (Muñoz e Vargas, 2020; Hope e Cox, 2015). No que tange a análise de multiplicadores econômicos e fiscais para testar a financiabilidade de investimentos de infraestrutura, Domański e Gwosdz (2010) fornecem uma resenha da literatura sobre efeitos multiplicadores econômicos na literatura. Já Heuer et al. (2005) e Yoshino *et al*.(2018.) focam o cálculo dos efeitos multiplicadores fiscais da implantação de infraestrutura de transportes. No âmbito brasileiro, Bracarense (2017) desenvolveu um método simplificado de cálculo dos efeitos diretos, indiretos e induzidos de uma proposta de corredor econômico para viabilizar a implantação da Hidrovia do Tocantins por meio de uma concessão patrocinada.

O presente artigo tem por caso de estudo a rodovia BR-020, que une Brasília a Fortaleza, mas encontra-se interrompida ao longo de mais de 300 quilômetros no Norte do Estado da Bahia, obrigando os fluxos logísticos

entre a regiões do Centro-Oeste e Nordeste a realizar um desvio oneroso por outras rodovias. Os municípios que situam no trecho sem rodovia estão severamente prejudicados no seu desenvolvimento, apresentando índices baixos de IDH. Como teste de hipótese foi construído um cenário onde a dinamização da pecuária nesses municípios produziria efeitos multiplicadores econômicos e fiscais suficientes para cobrir as despesas do investimento viário.

Esse artigo apresenta a seguinte estrutura: na Seção 2 oferece a metodologia adotada para testar a hipótese de dinamização territorial para cobrir despesas de investimento viário é apresentada. Na Seção 3, é apresentado o caso de estudo, e são explanados os cálculos econômicos. A Seção 5 conclui o artigo.

2. METODOLOGIA

São seguintes as etapas:

- Caracterização Territorial: delimitado o território de análise (municípios a serem atravessados pela via em tela), avalia-se a estrutura social e econômica atual, as condições naturais tais como clima e cobertura vegetal, a aptidão da terra, disponibilidade de recursos hídricos e de infraestrutura, com vistas definir com precisão as áreas mais aptas para atividades econômicas a selecionar.

- Identificação do potencial econômico do território: observam-se qual seria o potencial econômico, assim como a respectiva evolução da respectiva demanda de mercado (regional, nacional e internacional), as capacidades tecnológicas do território, selecionando-se uma ou várias atividades que possuem perspectivas positivas se serem propulsores da dinamização econômica.

- Construção de cenário de crescimento: Analisam-se as capacidades espaciais para a produção das atividades selecionadas: total de áreas disponíveis, descontadas reservas, áreas já utilizadas e urbanas; índices de produção das atividades, produção prevista (cenários pessimista, otimista e médio); preços e custos da produção, e o valor adicional (VAB) potencial conforme os cenários.

- Cálculo da Arrecadação Municipal: Com base nos cenários de produção, aplicam-se alíquotas de tributação correspondentes a cada um dos impostos incidentes sobre a comercialização do(s) produto(s) selecionado(s) gado, quais sejam, o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), contribuição ao Fundo de Assistência ao Trabalhador Rural (FUNRURAL), Imposto de Renda Pessoa Física (IRPF).

- Mapeamento de cadeias de negócio: análise dos segmentos a montante, que englobam os insumos necessários para a produção selecionada, avaliando-se a disponibilidade e qualidade dos insumos; análise de opções imediatas de beneficiamento e agregação de valor dos produtos selecionados.

- Sugestão para políticas de incentivo: Analisando os elos das cadeias dos produtos selecionados que são faltantes na região, propõem-se medidas incentivo à sua atração, adicionais à promoção das produções selecionadas.

- Análise do atingimento da meta: Com base nos resultados das etapas anteriores, compara-se a arrecadação tributária prevista com o custo do investimento da infraestrutura viária..

3. ESTUDO DE CASO

3.1 Caracterização do Território

Conformam o território de análise os municípios que seriam atravessados pelo trecho rodoviário a construir, quais sejam, os de Santa Rita de Cássia, Mansidão, Buritirama, Campo Alegre de Lourdes e Pilão Arcado, situados no estado da Bahia e que enfrentam desafios significativos decorrentes da falta de uma rodovia plenamente estruturada (ver Figura 1). O baixo dinamismo desses municípios é refletido na respectiva composição do PIB, onde predomina a Administração Pública, seguida do setor de serviços (IBGE Cidades, 2023).



Figura 1: Território de análise

A agropecuária apresenta uma participação variável no PIB dos municípios analisados, sendo uma atividade econômica presente, mas não dominante. Em algumas localidades, esse setor se mostra um importante gerador de renda, mas em outras, sua participação é relativamente baixa. Isso sugere que, embora a agricultura e a pecuária tenham potencial econômico, ainda há limitações para que esse setor se expanda e tenha maior impacto no desenvolvimento regional. O território se caracteriza também pela situação de baixa renda (renda média de 1,8 a 2.3 salários-mínimos e reduzida população ocupada (5,4% a 7,5%). O índice de Desenvolvimento Humano varia de 0,5 a 0,6). Essa situação social se reflete na alta dependência dos municípios dos Fundos de Participação (IBGE Cidades, 2023).

Com relação às condições naturais, a região analisada está situada em uma zona de transição entre os biomas Caatinga e Cerrado. Destaca-se a presença de diversas bacias hidrográficas e a influência do Rio São Francisco enquanto fatores essenciais para o abastecimento de água. A variação altimétrica é significativa, com valores entre 377,17 metros e 868,28 metros. De uma forma geral, o relevo pode ser considerado favorável para a expansão da pecuária extensiva e para o cultivo de pastagens. A precipitação é relativamente homogênea ao longo do ano, sem estiagem prolongada.

3.2 Potencial Identificado

Enquanto Santa Rita de Cássia possui uma economia agropecuária mais diversificada, possuindo o maior rebanho bovino do estado da Bahia, totalizando 188.374 cabeças no ano de 2023, além de apresentar a maior área de pastagem, totalizando 753,89 km (IBGE, 2023). Nos outros territórios analisados, a criação de bovinos foi significativamente menor, com um máximo de 41.004 cabeças por ano, o que aponta para um potencial de crescimento.

3.3 Cenário de crescimento

Usando informações do Mapbiomas Brasil, o total de área disponível para criação de gado nos quatro municípios monta a 1.662.376 ha. Adotou-se como hipótese um sistema de produção semi-intensivo, com capacidade de 3 cabeças por hectare, resultando num potencial de 4.695.200 cabeças adicionais à atual produção. Assumindo que a) 40% do rebanho estará disponível a cada ano para o abate, 1.994.851 cabeças por ano poderiam ser abatidos; b) com base nas informações da ABIEC (2023), um peso de 255,13 kg de carne por animal, montando assim a 17 arrobas por animal (1 arroba = 15 kg) e c) um preço médio da arroba em R$ 320,05, o valor médio de venda seria de R$ 5.443,62 por cabeça terminada. O total estimado de valor de venda para os cinco municípios analisados foi de R$ 10,85 bilhões por ano.

3.4 Arrecadação Fiscal

Para o cálculo da arrecadação foram assumidas seguintes premissas: o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), que incide diretamente sobre a movimentação do gado para o frigorífico, teria como alíquota de 7%, o que vem sendo praticado em diversos estados limítrofes; as contribuições para o Fundo de Assistência ao Trabalhador Rural (FUNRURAL) seriam de 1.5% sobre a receita bruta da venda do gado. No que tange o Imposto de Renda de Pessoa Física, assume-se que os produtores operam como pessoa física, sendo que a receita da venda do gado é tributada pelo regime de Lucro Presumido, onde 20% do faturamento é considerado lucro tributável e submetido à alíquota de 27,5%, resultando em um impacto efetivo de 5,5% sobre a receita bruta (Faidiga, 2023). Por fim, a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) corresponde a 9% da base presumida. O total de arrecadação da produção pecuária montaria por fim a R$ 1.520.289.512 por ano.

3.5 Cadeia de Negócios e Políticas de Incentivo

Assinala-se aqui que a instalação de um frigorífico na região analisada aumentaria consideravelmente o valor da produção. Políticas de incentivo deveriam portanto ter o investimento em frigoríficos como uma meta importante, até porque a capacidade instalada na região é insuficiente, fazendo os pecuaristas dependerem de industrias de outras regiões.

3.6 Atingimento da meta para viabilizar o investimento viário

Pelos cálculos apresentados, a potencialização da pecuária nos municípios selecionados produziria uma arrecadação anual de 1,5 bilhões de reais. Em contraste, a complementação da rodovia no trecho que os atravessa requereria um investimento de 1 bilhão de reais (Dafico, 2025).

4. CONCLUSÕES

O presente artigo insere-se em um esforço de pesquisa de busca de soluções inovadoras para o investimento viário, atualmente limitado pelas restrições fiscais e pelo limitado alcance dos modelos correntes de parceria público-privada e concessões. Nesse contexto, iniciativas de desenvolvimento espacial, onde investimentos em infraestruturas são conjugados com investimentos produtivos e políticas públicas de apoio, oferecem uma solução a ser explorada, conquanto essa junção produza efeitos multiplicadores econômicos e fiscais computáveis e apropriáveis para fins de cobertura das despesas públicas. Um tipo dessa iniciativa são corredores econômicos, onde investimentos viários são viabilizados pelos efeitos multiplicadores.

No caso do presente artigo, a hipótese de busca de um solução para financiar uma rodovia pela potencialização econômica de municípios atravessados é testada para fins da implantação e pavimentação de um trecho de cerca de 300 quilômetros da BR-020, cuja ausência tem provocado custos logísticos para o fluxo entre o Centro-Oeste e o Nordeste do País, além de manter na região um nível baixo de desenvolvimento.

O estudo relatado nesse artigo seguiu os passos descritos na Seção 2, mostrando que a promoção da pecuária na região, propícia para esse tipo de cultura, é capaz de produzir em um ano uma arrecadação que superaria 1,5 vezes o investimento na conclusão do trecho faltante. Obviamente, essa renda e arrecadação não seriam disponíveis de imediato, mais sim depois de todo um período de transformação econômica da região, que pode levar uma década. Portanto, uma estimativa realista necessitaria o cálculo de uma curva de crescimento da criação, da renda e arrecadação, a ser contraposta a uma curva de investimento na via, para daí se obter o pay-back. Além disso, há de supor que a arrecadação obtida na criação não estaria toda ela disponível para o investimento viário, na medida em que boa parte teria de ser destinada a despesas obrigatórias. Assim, os recursos disponíveis seriam bem mais modestos. Por outro lado, se na região for implantada uma indústria de carne, os resultados serão muito superior ao obtido e, possivelmente, cobrirão o fluxo de despesa da construção da via. Além disso, essa própria construção será por si só geradora de efeitos econômicos e fiscais adicionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio conferido à pesquisa da qual resultou o presente artigo

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC — Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne (2023) *Beef Report 2023. Perfil da Pecuária no*

Brasil. São Paulo: ABIEC. Disponível em: https://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2023/. Acessado em 9/2/2025

Bracarense, L. S. F. P. (2017): *Elementos para um Modelo Inovador de Parcerias Público-Privadas em Infraestrutura de Transportes: Estudo Aplicado à Hidrovia do Rio Tocantins*. Tese de Doutorado. Brasília: Universidade de Brasília. Disponível em: http://www.transportes.unb.br/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=148:elementos-para-um-modelo-inovador-de-parcerias-publico-privadas-em-infraestrutura-de-transportes-estudo-aplicado-a-hidrovia-do-rio-tocantins&id=22:teses-de-2017&Itemid=515. Acesso em 9/2/2025

Dafico, L. M. O. (2024) *Levantamento e sistematização de potenciais territoriais como estratégia de financiamento de infraestruturas: Estudo de Caso do Corredor Econômico Presidente Juscelino Kubitschek*. Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Brasília: Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Acesso em 9/2/2025

Domański, B.; Gwosdz, K. (2010) *Multiplier effects in local and regional development*. Disponível em: https://sciendo.com/pdf/10.2478/v10117-010-0012-7. Acesso em 9/2/2025

Faidiga, D. B.; Braga, J. B. (2023) A tributação da atividade pecuária é sempre pior na pessoa jurídica? *Consultor Jurídico*. Disponível em: https://www.conjur.com.br/2023-dez-08/a-tributacao-da-atividade-pecuaria-e-sempre-pior-na-pessoa-juridica/. Acesso em: 25/1/2025.

Heuer K.; Klophaus, R.; Schaper, T. (2005) *Regionalökonomische Auswirkungen des Flughafens Frankfurt-Hahn für den Betrachtungszeitraum 2003 – 2015*. Birkenfeld: Zentrum für Recht und Wirtschaft des Luftverkehrs. Disponível em: https://hahn.fluglaerm.de/fremddokumente/regionalkonomischeauswirkungen-ffhg-2003-2015.pdf. Acesso em: 25/1/2025.

Hope, A.; Cox, J. (2015) Development Corridors. Coffey International Development December 2015. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08995e5274a31e000016a/Topic_Guide_Development_Corridors.pdf. Acesso em: 25/1/2025.

Hughes, D. (2013) Policy Uses of Economic Multiplier and Impact Analysis. *Choices 18*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227364628_Policy_Uses_of_Economic_Multiplier_and_Impact_Analysis Acesso em: 25/1/2025.

IBGE. - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). *Produção da pecuária municipal 2023*. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/. Acesso em: 25/1/2025

IBGE Cidades (2023): *Cidades e Estados do Brasil*. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/ Acesso em 2/3/2025

Kumari, A.; Sharma, A. K. (2017) Infrastructure financing and development: A bibliometric review. International *Journal of Critical Infrastructure Protection* 16, pp.49 – 65. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1874548215300317. Acesso em: 25/1/2025

Muñoz, L.; Vargas, S. C. (Ed.) (2020) *Economic Corridors in Asia: Paradigm of Integration?* Departamento de Publicaciones Universidad Externado de Colombia. Disponível em: https://publicaciones.uexternado.edu.co/gpd-economic-corridors-in-asia-paradigm-of-integration-9789587903812.html. Acesso em: 25/1/2025

Rodrigue, J. -P. (2020): *The Geography of Transport Systems*, Fifth Edition. New York: Routledge. Disponível em: Disponível em: https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780429346323/geography-transport-systems-jean-paul-rodrigue. Acesso em: 25/1/2025

Srinivasu, B.; Rao, P. S. (2013) Infrastructure Development and Economic Growth: Prospects and Perspective. *Journal of Business Management & Social Sciences Research* Volume 2, No.1, January 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/24400230/Infrastructure_Development_and_Economic_growth_Prospects_and_Perspective. Acesso em: 25/1/2025

Walter, I. (2016) *The Infrastructure Finance Challenge*. Cambridge, UK: Open Book Publishers. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11647/OBP.0106. Acesso em: 25/1/2025

Yoshino, N.; Helble, M.; Abidhadjaev, U. (2018) Impact of Infrastructure Investment on Tax: Estimating the Spillover Effects of the Kyushu High-Speed Rail Line in Japan on Regional Tax Revenues in: *Financing Infrastructure in Asia and the Pacific Capturing Impacts and New Sources*. Tokyo: Asian Development Bank Institute. Disponível em: https://www.adb.org/publications/financing-infrastructure-asia-capturing-impacts-and-new-sources. Acesso em: 25/1/2025

Joaquim José Guilherme de Aragão (joaquim.jg.aragao@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Universitário. Asa Norte, Brasília, DF
Ana Clara Trindade Freitas (aninhactfreitas@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Universitário. Asa Norte, Brasília, DF
Yaeko Yamashita (yaekoyamashita@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Universitário. Asa Norte, Brasília, DF

SOLUÇÕES DE PAVIMENTAÇÃO PARA ESTRADAS RURAIS DE BAIXO VOLUME: COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA EM ESTRADA DO MUNICÍPIO DE MISSAL-PR

Daniela Kunz[1], **Priscila Reis**[2], **Jean Mateus Goltz**[1]
[1]Faculdade Uniguaçu, [2]Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA

RESUMO
Este artigo teve como objetivo realizar uma análise comparativa da viabilidade técnica e econômica entre os pavimentos asfáltico e poliédrico aplicados em uma estrada rural no município de Missal–PR. A metodologia adotada baseou-se em pesquisa bibliográfica, levantamento de dados em campo e elaboração de orçamentos com base nas composições do SINAPI e do DER/PR. Os dimensionamentos estruturais foram realizados conforme as diretrizes do DNIT para o pavimento asfáltico e do DER/PR para o pavimento poliédrico. Os resultados indicaram um custo estimado de R$ 46,35/m² para o pavimento poliédrico e R$ 138,68/m² para o asfáltico. Embora o pavimento asfáltico proporcione maior conforto e desempenho, a solução poliédrica mostrou-se mais viável para vias rurais de baixo volume de tráfego, considerando aspectos técnicos, econômicos e sociais. A escolha do tipo de pavimento deve considerar as condições regionais, promovendo o uso eficiente dos recursos públicos em projetos de infraestrutura viária rural.

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação é um elemento essencial da infraestrutura, contribuindo diretamente para a integração territorial e o desenvolvimento socioeconômico (Hasheminezhad; Ceylan e Kim, 2024). As rodovias, principal meio de transporte terrestre no Brasil, exercem papel estratégico ao viabilizar o deslocamento de pessoas e o escoamento de mercadorias entre diferentes regiões do país (Brasil, 2018). Contudo, segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT), apenas cerca de 12,4% da malha rodoviária nacional é pavimentada, revelando um desafio significativo, especialmente nas áreas rurais (CNT, 2022).

As estradas urbanas e rurais locais apresentam características distintas, adaptadas às demandas específicas de seus contextos. Enquanto as vias urbanas concentram maiores volumes de tráfego e exigem padrões elevados de desempenho e conforto, as vias rurais locais, localizadas fora do perímetro urbano, são geralmente utilizadas para acesso a propriedades agrícolas e transporte de cargas de produção, operando com menor volume e intensidade de tráfego (Chodur; Krzysztof e Tracz, 2016).

Em cenários rurais locais, especialmente em municípios de pequeno porte, a escolha do tipo de pavimentação torna-se um desafio técnico e orçamentário. Segundo Kemaw (2022), a limitação de recursos financeiros, a disponibilidade de materiais na região e as condições locais de clima e solo influenciam diretamente a definição da solução mais adequada. Nesse contexto, diferentes tipos de pavimento podem ser considerados, desde soluções mais convencionais, como o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), até alternativas de menor custo e maior simplicidade construtiva, como o pavimento poliédrico, caracterizado pelo uso de pedras naturais irregulares, dispostas manualmente para formar a camada de revestimento (Magier *et al*., 2018). Dessa forma, este estudo teve como objetivo comparar a viabilidade técnica e econômica dessas duas soluções de pavimentação, asfáltica e poliédrica, aplicadas a um trecho de estrada rural no município de Missal–PR, contribuindo com subsídios para decisões mais assertivas em projetos de infraestrutura viária em áreas rurais locais.

2. METODOLOGIA

Utilizou-se uma abordagem comparativa entre dois tipos de pavimentação aplicáveis a estradas rurais: o pavimento em concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) e o pavimento poliédrico. A análise envolveu o dimensionamento das estruturas de pavimento, a estimativa de custos de implantação e a avaliação técnico-econômica de cada alternativa. Para o dimensionamento das camadas dos pavimentos, foram utilizados dados técnicos contidos em um laudo fornecido pela Prefeitura Municipal de Missal. O documento forneceu informações geotécnicas do solo local, obtidas por meio de ensaios de caracterização e de suporte (como o Índice CBR), além de dados sobre o volume de tráfego.

Em seguida, realizou-se a estimativa dos custos de execução com base nos valores de referência dos sistemas SICRO, SINAPI. A partir desses dados, realizou-se uma análise comparativa de custo-benefício, considerando não apenas os custos iniciais de implantação, mas também aspectos relacionados à durabilidade, manutenção e adequação ao contexto rural. Além da comparação direta de custos e dimensionamentos estruturais, a análise

buscou identificar critérios de decisão que possam ser replicados em outros municípios com condições geotécnicas, socioeconômicas e de tráfego análogas, fortalecendo a aplicabilidade prática dos resultados.

2.1 Região de estudo

O município de Missal está situado no Estado do Paraná com uma população estimada em 11.064 habitantes (IBGE, 2022). A economia do local é fortemente vinculada à agropecuária e agroindústrias. A estrada objeto do estudo está localizada na zona rural do município, tem uma extensão de 1.445,00 m e serve como ligação entre duas importantes rodovias estaduais, a PR-497 e a PR-495.

2.2 Dimensionamento dos pavimentos

O dimensionamento do pavimento flexível foi realizado conforme a metodologia do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte - DNIT (2006). Essa abordagem considera três elementos principais: o Índice de Suporte Califórnia (CBR), o número de solicitações equivalentes de tráfego (N) e os coeficientes estruturais das camadas: KR: Revestimento; KB: Base; Ks: Sub-base; KREF: Reforço do subleito. A partir do valor de N e do CBR do subleito, utiliza-se um ábaco para determinar a espessura total da estrutura (HM). Essa espessura é então distribuída entre as camadas de revestimento, base, sub-base e, se necessário, reforço do subleito, conforme os coeficientes de equivalência de cada material. O dimensionamento segue as seguintes inequações sucessivas, definidas no Manual de Pavimentação do DNIT (2006):

$$R * KR + B * KB \geq H20$$
$$R * KR + B * KB + H20 * Ks \geq HM$$

Em que:
R: revestimento (cm); B: base (cm); H20: sub-base (cm); HM: estrutura total (cm).

De forma oposta, o dimensionamento do pavimento poliédrico foi realizado conforme orientações do DER/PR, com base em critérios empíricos aplicáveis a vias rurais. A estrutura foi definida considerando a capacidade de suporte do subleito (CBR ≥ 2%), o tipo de tráfego local e a disponibilidade de materiais na região.

3. RESULTADOS

3.1 Estudo geotécnico

A caracterização do subleito foi realizada com base em sondagens a trado manual, executadas em dois pontos ao longo do trecho de estudo, com profundidades entre 0,60 m e 1,20 m. A média do Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi de 6,71%, valor que, embora modesto, permite seu uso como subleito, desde que haja controle rigoroso de compactação e umidade. A expansibilidade se mostrou baixa (entre 1,24% e 1,27%) o que indica estabilidade volumétrica satisfatória. Os resultados revelaram um solo argiloso siltoso, com coloração marrom avermelhada, classificado como solo de primeira categoria para as profundidades analisadas. A análise dos índices físicos e de granulometria reforça a predominância de um solo argiloso siltoso de alta plasticidade, conforme detalhado na Tabela 1. De acordo com a classificação HRB, os solos foram enquadrados no grupo A-6, com índices de grupo entre 12,20 e 13,90, caracterizando um solo com baixa capacidade de suporte, porém ainda aplicável a vias de tráfego leve, como estradas rurais, especialmente com uso de técnicas de estabilização e reforço.

Tabela 1: Parâmetros de consistência e classificação dos solos dos furos de sondagem

Parâmetro	Limite de liquidez (LL)	Limite de plasticidade (LP)	Índice de plasticidade (IP)	Grupo HRB	Índice de grupo (IG)
Furo 1	39,6%	25,4%	14,2%	A-6	13,90
Furo 2	39,2%	24,8%	14,4%	A-6	12,20

3.2 Estudo de tráfego

Os estudos de tráfego indicaram que a via rural analisada é predominantemente utilizada para atividades ligadas ao agronegócio, com características sazonais. Durante os períodos de colheita, há intenso fluxo de veículos de carga, como caminhões e tratores. Já nos demais períodos, o tráfego se reduz consideravelmente, sendo composto principalmente por veículos leves de moradores locais. Os valores médios de tráfego diário foram obtidos com base em registros disponibilizados pela prefeitura, conforme apresentado na Figura 1.

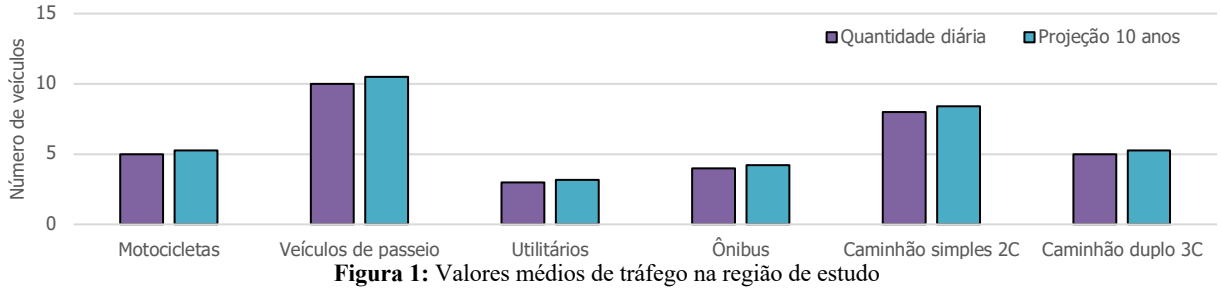


Figura 1: Valores médios de tráfego na região de estudo

3.3 Determinação do número N de projeto

Para o dimensionamento estrutural dos pavimentos, foi calculado o número "N", que representa o total acumulado de solicitações equivalentes ao longo do período de projeto (10 anos), considerando um eixo-padrão de 8,2 toneladas. O cálculo considerou os seguintes fatores: veículo (FV), pista (FP) e clima (FR). A Tabela 2 representa os valores adotados.

Tabela 2: Valor dos fatores adotado para cálculo

Fator	Valor	Observação
Fator de Veículo (USACE)	2,251	Calculado conforme composição da frota
Fator de Veículo (AASHTO)	0,613	Calculado conforme composição da frota
Fator de Pista (FP)	0,50	Via com pista simples
Fator Climático (FR)	1,80	Precipitação média anual de 2.100 mm

Com base nesses parâmetros, o valor de N foi estimado pelos métodos USACE e AASHTO para o período de projeto de 10 anos, conforme Tabela 3. Esses valores foram utilizados como base para o dimensionamento das camadas dos pavimentos asfáltico e poliédrico, conforme a metodologia específica de cada solução.

Tabela 3: Valor de N de acordo com cada metodologia

Método	N Projetado (2025)
USACE	$3{,}22 \times 10^5$
AASHTO	$1{,}53 \times 10^4$

3.4 Materiais da região

Verificou-se a viabilidade de utilização de materiais locais para ambas as soluções de pavimentação. O pavimento poliédrico pode ser executado com pedras irregulares provenientes de jazidas próximas, o que reduz custos logísticos. Já para o pavimento asfáltico, embora o fornecimento de CBUQ seja viável, envolve maior custo de transporte. Materiais como pó de pedra, areia e brita são amplamente disponíveis na região.

3.5 Dimensionamento dos pavimentos

3.5.1 Pavimento poliédrico

O dimensionamento do pavimento poliédrico seguiu as especificações de serviços para obra de pavimentação poliédrica do DER/PR (1982), adotando a seguinte estrutura: 15 cm de colchão de solo argiloso, 15 cm de camada de pedras irregulares, rejuntamento com pó de pedra e compactação com rolo liso vibratório. Essa solução é adequada ao volume de tráfego previsto, apresenta baixo custo de implantação e facilidade de manutenção.

3.5.2 Pavimento asfáltico

O dimensionamento do pavimento flexível foi realizado conforme a metodologia do DNIT (2006), utilizando o valor de CBR médio do subleito (6,71%) e um tráfego estimado de 1×10^5 repetições de eixo padrão de 8,2 toneladas. A espessura estrutural total (HM) necessária foi determinada por meio de ábaco, resultando em 42 cm. A distribuição das espessuras entre as camadas foi feita com base nos coeficientes estruturais KR = 1,70 (revestimento em CBUQ), KB = 1,00 (base granular) e KS = 1,00 (sub-base granular). A aplicação das inequações do método permitiu estimar as espessuras mínimas compatíveis com os requisitos técnicos, sendo adotada a seguinte configuração final: CBUQ (5 cm) / base granular (15 cm) / sub-base granular (25 cm). Essa

solução atende aos critérios normativos, sendo considerada tecnicamente adequada e economicamente viável para as condições da estrada rural analisada.

3.6 Estudo comparativo de custos

3.6.1 Distância média de transporte (DMT)

Para estimar os custos logísticos com transporte de materiais, especialmente pedra irregular e brita, considerou-se a média das distâncias entre três pedreiras da região e o trecho analisado (Tabela 4). Esse valor da distância média de transporte foi adotado uniformemente para os cálculos dos itens de transporte nos dois orçamentos, proporcionando base técnica comum para comparação de custos entre os pavimentos.

Tabela 4: Distâncias de transportes

Pedreira	Cidade	Distância (km)
Pedreira 01	São Miguel do Iguaçu-PR	32,50
Pedreira 02	Itaipulândia-PR	7,20
Pedreira 03	Matelândia-PR	33,80
Total–		73,50
Média (DMT)–		24,50 km

3.6.2 Quantitativo e custos

A análise comparativa foi realizada para uma área de 8.670 m², com base nos quantitativos estimados e composições de custo extraídas do SINAPI (abril/2025) e do DER/PR (março/2025). Os custos considerados envolvem fornecimento e aplicação de materiais, mão de obra, transporte e respectivas distâncias médias de transporte (DMT), fixadas em 24,5 km. A Tabela 5 resume os custos totais e unitários de cada solução.

Tabela 5: Custo para os tipos de pavimentos analisados

Tipo de Pavimento	Custo Total (R$)	Custo por m² (R$/m²)
Poliédrico	R$ 401.824,28	R$ 46,35
Asfáltico (CBUQ)	R$ 1.202.286,54	R$ 138,68

Essa diferença de mais de R$ 800 mil reforça a maior viabilidade econômica do pavimento poliédrico para estradas rurais de baixo volume de tráfego. Essa economia é atribuída à maior disponibilidade de materiais locais, menor custo logístico e simplicidade construtiva. Além disso, a Tabela 6 apresenta a comparação qualitativa dos principais aspectos técnicos e operacionais.

Tabela 6: Comparação qualitativa dos principais aspectos

Critério	Pavimento Poliédrico	Pavimento Asfáltico
Manutenção	Fácil, com mão de obra local	Requer equipamentos e insumos industrializados
Tempo de execução	Rápido, com materiais locais	Depende de usina e logística de CBUQ
Demanda de mão de obra	Alta, com baixa especialização	Menor, mas exige operadores especializados
Custo de manutenção	Baixo	Alto
Custo-benefício global	Elevado – adequado para vias rurais	Menor – mais indicado para vias urbanas

Considerando os aspectos econômicos, operacionais e sociais, o pavimento poliédrico apresenta o melhor custo-benefício para aplicação em vias rurais de baixo volume de tráfego como a do município de Missal. Além de ser tecnicamente adequado ao tráfego leve e sazonal, promove economia de recursos públicos, geração de emprego local e autonomia para manutenções ao longo da vida útil da via.

Comparativamente com os resultados obtidos, Magier *et al*., (2018) afirmam que, a escolha do tipo de pavimento deve estar alinhada às características de uso, orçamento e finalidade da via. Enquanto o pavimento asfáltico é considerado o mais adequado para locais com tráfego intenso e obras definitivas, a alvenaria poliédrica, embora menos confortável, destaca-se como uma solução de baixo custo para vias com tráfego leve ou em áreas sujeitas a futuras intervenções. Assim, reforça-se que a decisão sobre a pavimentação deve considerar não apenas o desempenho técnico, mas também fatores econômicos e contextuais. De forma semelhante Majer *et al*., (2024) avaliaram o desempenho de pavimentos com pedras naturais ao longo de mais de dez anos. Os autores concluíram que, mesmo após esse período, o pavimento manteve níveis satisfatórios de durabilidade e conforto. Eles afirmam que esse tipo de revestimento é especialmente recomendado para

vias com tráfego de baixa velocidade e reduzido volume, configurando-se como uma solução eficaz em contextos rurais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou que, para estradas rurais de baixo volume de tráfego, como as do município de Missal-PR, o pavimento poliédrico é a solução mais adequada. Com custo por metro quadrado cerca de três vezes menor que o do pavimento asfáltico, viabilizando economicamente a pavimentação em larga escala, utilizando materiais e mão de obra locais e exigindo menor complexidade na execução e na manutenção. Embora o pavimento asfáltico proporcione maior conforto e desempenho em trechos de tráfego intenso, sua adoção em vias de curta extensão e demanda reduzida se mostra pouco eficiente, sobretudo diante das limitações orçamentárias municipais. Embora os resultados tenham origem em um caso específico, eles fornecem subsídios relevantes para o planejamento de infraestrutura rural em outros municípios brasileiros de pequeno porte. O pavimento poliédrico alia viabilidade econômica, facilidade de manutenção e adaptação às condições locais, sendo uma alternativa tecnicamente válida e socialmente vantajosa para a infraestrutura rural de pequenos municípios. Este estudo amplia a compreensão sobre a viabilidade técnica e econômica dessa solução em cenários similares, contribuindo para a tomada de decisão em políticas públicas de pavimentação rural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil, Ministério dos Transportes. *Plano Nacional de Logística – PNL 2025 (2018)*. Brasília: Ministério dos Transportes. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/PIT/politica-e-planejamento/publicacoes/pnl2025.pdf. Acesso em: 02/06/2025.

CNT (2022) Confederação Nacional de Transportes. Anuário da confederação do transporte – estatística consolidadas. Brasília, DF. Disponível em: https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Rodoviario/1-3-1-1-1-/Malha-rodovi%C3%A1ria-total. Acesso em: 03/06/2025.

Chodur, Janusz; K. Ostrowski e M. Tracz. (2016) Variability of Capacity and Traffic Performance at Urban and Rural Signalised Intersections. *Transportation Research Procedia*, v. 15, p. 87-99. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.008.

DER (1982) Especificações de serviços para obras de pavimentação poliédrica. Paraná: Departamento de Estrada e Rodagem. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2021-09/manual_der-1.pdf. Acesso em: 01/06/2025.

DNIT (2006) Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.

Hasheminezhad, A.; H. Ceylan e S. Kim. (2024) Sustainability promotion through asphalt pavements: A review of existing tools and innovations. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 42, e01162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01162.

Kemaw, H. (2022) *The price of longevity – empirical evidence from road pavements.* Dissertação (Mestrado). Lyles School of Civil Engineering West, Faculty of Purdue University, Lafayette, Indiana. Disponível em: https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=civlgradreports. Acesso em: 03/07/2025.

Majer, S.; Sołowczuk, A. e Budziński, B. (2024) Long-Term Performance of Natural Stone Cobbles for Paving Raised Junctions: Findings from over a Decade of Use. *Sustainability*, v. *16*(14), n. 6040. DOI: https://doi.org/10.3390/su16146040.

Magier, M. B. *et al*. (2018). Análise comparativa de pavimento asfáltico, pavimento em alvenaria poliédrica e pavimento intertravado em bloco de concreto. In Anais do XXVI Seminário de Iniciação Científica. Salão do conhecimento Unijuí. Rio grande do Norte. Disponível em: https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/10063/8721. Acesso em: 2/07/2025.

Prefeitura Municipal de Missal. (2024). Laudo de sondagem geotécnica do trecho Vista Alegre – PR 497 [Documento interno]. Prefeitura Municipal de Missal.

Prefeitura Municipal de Missal. (2024). Relatório de dimensionamento do pavimento poliédrico da estrada rural Vista Alegre [Documento interno]. Prefeitura Municipal de Missal.

Prefeitura Municipal de Missal. (2024). Projeto executivo de pavimentação poliédrica e asfáltica – Estrada Vista Alegre [Documento técnico]. Prefeitura Municipal de Missal.

Daniela Kunz (dani-kunz@hotmail.com)
Jean Mateus Goltz (jeangoltz@hotmail.com)
Faculdade Uniguaçu, Rua Valentin Celeste Palavro, 707, Jardim Bela Vista, São Miguel do Iguaçu, PR - Brasil
Priscila Reis (priiscilareis@hotmail.com)
Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, Avenida Tancredo Neves, 6731, Unidade Itaipu Parquetec, Foz do Iguaçu, PR – Brasil

VIABILIZANDO O INVESTIMENTO VIÁRIO POR MEIO DO DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL: ESTUDO DO CASO DA BR-020

Joaquim José Guilherme de Aragão, Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato
Lucas Machado Orlandi Dafico
Universidade de Brasília

RESUMO
Este estudo propõe um novo modelo para viabilizar investimentos viários em regiões de fronteira agrícola no Brasil, por meio da integração de infraestrutura rodoviária e desenvolvimento produtivo regional. O caso analisado é o da BR-020, cuja interrupção de 355 km entre o Oeste Baiano e o Piauí gera ineficiências logísticas significativas. A pesquisa utiliza a análise de cadeias produtivas e projeções de mercado para avaliar o impacto sobre o custeio da pavimentação do trecho faltante na produção e no escoamento de arroz e leite. Foram considerados cenários otimistas e pessimistas, incluindo projeção de arrecadação tributária. Os resultados indicam que os ganhos fiscais gerados pelo aumento da produção e competitividade regional seriam suficientes para autofinanciar o investimento ao longo de 8 a 10 anos, mesmo sob condições conservadoras. O estudo reforça a importância da abordagem territorial integrada e demonstra a viabilidade econômica da conclusão da BR-020 como alavanca para o desenvolvimento regional sustentável.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico sustentável depende, em grande medida, da disponibilidade e qualidade da infraestrutura, especialmente no que se refere à logística e ao transporte (OCDE, 2003; Vickerman, 2007). A literatura sobre desenvolvimento regional e infraestrutura aponta que investimentos logísticos têm efeito multiplicador relevante sobre a economia (Aschauer, 1989; Lu, 1996; Banister & Berechman, 2001; Estache & Fay, 2007).

No entanto, o financiamento desses investimentos enfrenta severas restrições fiscais, agravadas pela rigidez orçamentária, pela alta dívida pública. Em regiões periféricas ou de fronteira agrícola, a baixa densidade populacional e a frágil base produtiva dificultam a viabilização financeira de grandes projetos de infraestrutura sob modelos tradicionais de concessões ou parcerias público-privadas (PPFIAF, 2009; Fioravanti et al. 2019; Fay et al., 2021). Esse cenário exige a busca por alternativas inovadoras para viabilizar projetos que, à primeira vista, parecem economicamente inviáveis.

Uma abordagem estratégica para superar esses entraves é a concepção de corredores econômicos, que integram infraestrutura e desenvolvimento produtivo em um mesmo território (Kunaka & Carruthers, 2014; Yoshino, 2018, Rowley, 2020). A literatura evidencia os benefícios desses corredores para o crescimento e modernização econômica (Sequeira et al., 2014), mas pouco se discute sobre sua viabilidade como estratégia direta de financiamento por meio da captura de efeitos fiscais resultantes da expansão produtiva induzida Domański e Gwosdz, 2010; Gechert e Will 2012).

Ao integrar a análise de potencialidades territoriais com a projeção de efeitos multiplicadores fiscais, este estudo propõe um modelo de autofinanciamento territorial, onde a própria dinâmica econômica gerada pela infraestrutura viabiliza sua implantação. A pesquisa contribui para a discussão sobre novos formatos de financiamento público em infraestrutura, com foco na superação de limitações fiscais e na promoção de desenvolvimento regional sustentável.

Neste artigo, adota-se a hipótese de que a conclusão da BR-020, rodovia estratégica que liga Brasília a Fortaleza e atravessa o Oeste Baiano, pode ser viabilizada por meio do incremento fiscal derivado da expansão das cadeias produtivas de arroz e leite na região. O trecho de 355 km ainda não pavimentado entre a Bahia e o Piauí representa um gargalo logístico que limita a competitividade da produção local e eleva os custos de transporte.

Assim, a proposta deste trabalho é demonstrar, com base em análise empírica, que investimentos em infraestrutura podem ser concebidos como indutores de crescimento regional e como instrumentos de autofinanciamento, especialmente quando associados a cadeias produtivas locais e mercados deficitários, como é o caso do Nordeste brasileiro no consumo de arroz e leite.

2. METODOLOGIA

Este estudo utilizou uma metodologia de análise direta, baseada no modelo proposto por Bracarense (2017), priorizando cálculos pragmáticos e evitando modelagens macroeconômicas complexas. O foco foi mensurar a viabilidade fiscal e econômica da conclusão da BR-020 a partir do impacto direto sobre cadeias produtivas regionais. Sendo assim, as seguintes etapas foram desenvolvidas:

1. *Definição do Corredor e Levantamento Territorial*: Foi delimitado o trecho da BR-020 entre o Distrito Federal e Correntina (BA), com identificação dos municípios atravessados e das cadeias agroindustriais locais, principalmente arroz e leite. Foram analisados dados econômicos, produtivos e logísticos a partir de fontes como IBGE e CONAB.
2. *Estimativa dos Custo do Investimento Viário:* Com base em editais do DNIT (2018), foram calculados os custos de construção do trecho faltante (355 km) e de manutenção de toda a rodovia, totalizando aproximadamente R$ 2,46 bilhões.
3. *Projeção de Produção e Análise de Mercado*: Foram estimados cenários pessimista e otimista para o crescimento da produção de arroz e leite, avaliando a capacidade de expansão da região e a competitividade frente aos atuais fornecedores do mercado nordestino. Também foram simuladas reduções de frete e seus impactos sobre o preço final dos produtos.
4. *Cálculo da Arrecadação Fiscal*: Consideraram-se as alíquotas de ICMS (12%), Funrural (1,5%) e Imposto de Renda (5,5%) sobre o faturamento projetado para as cadeias analisadas. As receitas foram estimadas para um horizonte de 10 anos (2022-2032), incluindo desdobramentos em receita total, federal e discricionária.
5. *Comparação entre Receita Fiscal e Custo do Investimento*: A receita fiscal adicional projetada foi comparada ao investimento necessário, calculando o período de retorno (payback). Foram avaliados cenários conservadores, considerando apenas receitas federais disponíveis para despesas discricionárias, e cenários otimistas com a receita total.

O método adotado permite uma análise prática, replicável e financeiramente focada, proporcionando uma avaliação clara da capacidade de autofinanciamento do investimento viário com base na dinâmica econômica territorial.

3. ESTUDO DE CASO: BR-020

A BR-020 é uma rodovia fundamental no eixo de integração entre Brasília (DF) e Fortaleza (CE), atravessando regiões de elevada relevância produtiva, como o Oeste Baiano. Com uma extensão total de 2.038 quilômetros, a rodovia permanece incompleta, apresentando um trecho de 355 quilômetros não implantado entre Riachão das Neves, na Bahia, e a divisa com o Piauí.

Embora a BR-020 atravesse ainda o Piauí e o Ceará, a análise concentrou-se neste trecho inicial, onde o impacto imediato da pavimentação seria mais expressivo. Esse segmento faltante cria um gargalo logístico significativo, que obriga motoristas e transportadores a realizarem longos desvios por rodovias estaduais não pavimentadas ou trajetos alternativos, elevando custos de transporte, tempo de viagem e desgastes operacionais. Este cenário compromete a competitividade da produção agropecuária local e limita o potencial de crescimento econômico da região.

Para avaliar a viabilidade econômica da obra, o estudo delimitou o corredor econômico de interesse entre o Distrito Federal e o município de Correntina, na Bahia, incluindo sete municípios no estado de Goiás e dois na Bahia. A caracterização territorial revelou que a agricultura e a pecuária são as principais atividades econômicas da região. Cultivos como soja, milho, feijão, algodão e arroz são amplamente disseminados, com destaque especial para a produção de arroz em Flores de Goiás e para a produção leiteira em municípios como Formosa, Flores de Goiás, Posse e Correntina.

Além da produção primária, já existem núcleos industriais voltados para o beneficiamento de grãos e o processamento de leite, o que cria condições favoráveis para a ampliação das cadeias produtivas locais. O setor de serviços de apoio ao agronegócio, incluindo comércio de insumos e transporte, também se destaca, especialmente no Distrito Federal e em cidades como Formosa, Posse e Correntina.

Para aprofundar a análise, foram selecionados dois produtos âncora — arroz e leite — que apresentam elevado potencial de expansão produtiva e significativa demanda no mercado consumidor nordestino. No caso do arroz, a produção em Flores de Goiás alcançou 60.258 toneladas em 2022, com crescimento histórico de 7,5% ao ano entre 2012 e 2022. As projeções realizadas indicam que, mesmo em um cenário pessimista, a produção poderá atingir 77.135 toneladas em 2032, enquanto no cenário otimista poderá superar 156.294 toneladas no mesmo período. Em relação ao leite, a produção anual dos municípios analisados foi de 80,63 milhões de litros em 2022, com crescimento médio de 2% ao ano na última década. Com a pavimentação da BR-020 e o consequente acesso a mercados mais competitivos, a produção de leite poderá alcançar 98,29 milhões de litros ao ano no cenário conservador e 131,34 milhões de litros no cenário otimista até 2031.

Os mercados consumidores, especialmente no Nordeste, apresentam um déficit estrutural tanto na oferta de arroz quanto de leite. O déficit de arroz na região é de aproximadamente 75.826 toneladas em 2024, enquanto o déficit de leite é superior a 4 milhões de litros anuais, com tendência crescente. O estudo comparou os preços finais do arroz e do leite transportados para Fortaleza a partir das regiões atualmente fornecedoras — Rio Grande do Sul e Minas Gerais — com os preços dos produtos originados no território da BR-020. Os resultados demonstram que, mesmo sem a pavimentação do trecho faltante, o arroz e o leite produzidos em Goiás já apresentam preços mais competitivos no mercado nordestino, devido à distância menor. Com a construção do trecho, a competitividade logística seria ainda maior. A distância até Fortaleza seria reduzida de 2.022 km para 1.832 km, o que resultaria em uma redução média no custo do frete por quilo de arroz e por litro de leite, impactando positivamente o preço final desses produtos no mercado consumidor.

Essa vantagem logística pode desencadear um efeito de substituição nos mercados regionais, deslocando parcialmente fornecedores tradicionais do Sul e Sudeste e fortalecendo a posição da produção goiana e baiana como nova fonte de abastecimento para o Nordeste. Além disso, a melhoria na infraestrutura pode estimular a instalação de novas agroindústrias na região, fortalecer a base produtiva local, ampliar a geração de empregos e promover o adensamento das cadeias produtivas com maior agregação de valor.

O investimento necessário para pavimentar o trecho faltante foi estimado em aproximadamente R$ 1,02 bilhão, com base em parâmetros de custos por quilômetro definidos em editais do DNIT (2018). Considerando também a necessidade de manutenção de toda a extensão da rodovia BR-020 ao longo do tempo, o custo total estimado do projeto chega a R$ 2,46 bilhões. Para viabilizar a infraestrutura, o estudo também calculou o impacto fiscal da expansão das cadeias produtivas de arroz e leite, utilizando alíquotas médias de ICMS, Funrural e Imposto de Renda para pessoas físicas. As projeções apontam que a arrecadação tributária acumulada ao longo de 9 anos seria suficiente para custear o investimento necessário para a conclusão da BR-020 (ver Tabela 1).

Tabela 1: Receitas Tributárias previstas pela dinamização da agricultura ao longo da BR-020, em mil reais

Ano	Receita Tributária Total (Cenário Otimista)	Receita Tributária Total (Cenário Pessimista)	Receita Tributária da União (62% da Receita Total) (Cenário Otimista)	Receita Tributária da União (62% da Receita Total) (Cenário Pessimista)	Disponibilidade discricionária da União (8% da Receita Primária da União) Cenário Otimista	Disponibilidade discricionária da União (8% da Receita Primária da União) Cenário Pessimista	Disponibilidade discricionária da União Acumulada (Cenário Otimista)	Disponibilidade discricionária da União Acumulada (Cenário Pessimista)
2023	5.970.913	5.433.671	3.705.967	3.370.675	296.48	269.65	296.48	269.65
2024	6.302.058	5.525.105	3.907.275	3.425.565	312.58	274.05	609.06	543.70
2025	6.737.341	5.916.102	4.178.151	3.667.982	334.25	293.44	943.31	837.14
2026	7.183.934	6.318.014	4.456.040	3.916.169	356.48	312.93	1.299.795	1.150.071
2027	7.643.894	6.731.095	4.738.215	4.173.280	379.26	332.66	1.679.052	1.482.734
2028	8.118.297	7.155.601	5.033.344	4.436.473	402.67	352.68	2.081.719	1.835.410
2029	8.608.229	7.591.792	5.341.103	4.705.911	426.80	373.03	2.508.517	2.208.444
2030	9.114.784	8.039.930	5.661.166	4.981.758	451.73	393.80	2.960.250	2.602.240
2031	9.639.066	8.500.279	5.993.021	5.264.173	477.56	415.04	3.437.805	3.017.276

Mesmo considerando as restrições da União de se apropriar da arrecadação prevista — que limita a disponibilidade de recursos discricionários a aproximadamente 8% das receitas federais — o estudo demonstra que o investimento seria integralmente amortizado em 7 anos no cenário otimista e em até 8 anos no cenário pessimista.

Além dos efeitos diretos sobre as cadeias de arroz e leite, a conclusão do trecho da BR-020 traria benefícios adicionais que não foram quantificados neste estudo, mas que possuem alta relevância para o desenvolvimento regional. Entre os impactos positivos, destacam-se a redução dos custos logísticos para outras cadeias produtivas, como soja, milho, algodão, pecuária de corte e mineração; o aumento da integração territorial entre o Centro-Oeste e o Nordeste; a atração de novos investimentos privados; a melhoria do fluxo de mercadorias e a redução do tempo de viagem; e o fortalecimento dos serviços logísticos e comerciais nas cidades atravessadas pela rodovia. Outras formas de adicionar a receita seriam de incrementar o beneficiamento e a industrialização do leite e arroz. Além disso, esses dois produtos constituem apenas uma amostra dos potenciais que podem ser mobilizados, acelerando ainda mais a recuperação fiscal do investimento.

A análise evidencia que o modelo proposto — baseado na captura fiscal induzida pela expansão da produção — pode viabilizar a construção de infraestrutura de forma sustentável, especialmente em contextos de restrição orçamentária e baixa atratividade para concessões tradicionais. O caso da BR-020 demonstra que é possível estruturar projetos de investimento público que se autofinanciem a partir da dinâmica econômica que eles próprios geram, desde que associados a cadeias produtivas estratégicas e a mercados consumidores em déficit.

Por fim, o estudo destaca que o modelo pode ser replicado em outros corredores logísticos brasileiros com características semelhantes, abrindo espaço para a formulação de políticas públicas que combinem infraestrutura e desenvolvimento produtivo como uma estratégia integrada de crescimento regional e viabilização financeira.

4. CONCLUSÃO

O presente artigo insere-se em um esforço de pesquisa de busca de soluções inovadoras para o investimento viário, atualmente limitado pelas restrições fiscais e pelo limitado alcance dos modelos correntes de parceria público-privada e concessões. Nesse contexto, iniciativas de desenvolvimento espacial, onde investimentos em infraestruturas são conjugados com investimentos produtivos e políticas públicas de apoio, oferecem uma solução a ser explorada, conquanto essa junção produza efeitos multiplicadores econômicos e fiscais computáveis e apropriáveis para fins de cobertura das despesas públicas. Um tipo dessa iniciativa são corredores econômicos, onde investimentos viários são viabilizados pelos efeitos multiplicadores.

No caso do presente artigo, a hipótese de busca de um solução para financiar uma rodovia pela potencialização econômica de municípios atravessados é testada para fins da implantação e pavimentação de um trecho de cerca de 300 quilômetros da BR-020, cuja ausência tem provocado custos logísticos para o fluxo entre o Centro-Oeste e o Nordeste do País, além de manter na região um nível baixo de desenvolvimento. O estudo confirma a viabilidade econômica da construção do trecho faltante da BR-020, não apenas como um projeto logístico, mas como uma estratégia eficaz de desenvolvimento territorial. A análise demonstra que os ganhos fiscais provenientes da expansão das cadeias produtivas de arroz e leite são suficientes para custear o investimento ao longo do tempo, mesmo em um cenário conservador. Além de promover competitividade regional, a obra reduzirá custos logísticos e contribuirá para o fortalecimento das cadeias agroindustriais locais, consolidando o papel da BR-020 como eixo estruturante para o escoamento da produção do Centro-Oeste ao Nordeste. A proposta aqui apresentada amplia o debate sobre modelos alternativos de financiamento em infraestrutura e reforça a importância de soluções integradas entre planejamento logístico e desenvolvimento produtivo. Estudos futuros poderão explorar a inclusão de outras cadeias produtivas e a análise de impactos socioambientais mais detalhados.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio conferido à pesquisa da qual resultou o presente artigo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aschauer, D. A. (1989). Is public expenditure productive? *Journal of monetary economics*, *23*(2), 177-200.

Banister, D., & Berechman, Y. (2001). Transport investment and the promotion of economic growth. *Journal of transport geography*, *9*(3), 209-218.

Bracarense, L. S. F. P. (2017) *Elementos para um modelo inovador de parcerias público-privadas em infraestrutura de transportes: estudo aplicado à hidrovia do Rio Tocantins*. Tese (Doutorado em Transportes). Universidade de Brasília, Brasília.

Brasil (2024) Ministério do Planejamento e Orçamento. Orçamento Cidadão : Projeto de Lei Orçamentária Anual 2025. Brasília : Secretaria de Orçamento Federal/MPO. https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/orcamento/orcamentos-anuais/2025/ploa/ploa_2025_orcamento_cidadao_2024_09_01-21h.pdf

Domański, B.; Gwosdz, K. (2010) Multiplier Effects in Local and Regional Development. Quaestiones Geographicae vol. 29 n. 2. p. 27-37

Estache A, Fay M (2007): Current Debates on Infrastructure Policy. Policy Research Working Paper 4410. Washington: The World Bank

Fay, M.; Martimort, D.; Straub, S. (2021). Funding and financing infrastructure: The joint use of public and private finance Journal of Development Economics 150 (2021) 102629. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2021.102629.

Fioravanti, R.; Lembo, C.; Deep, A. (2019). Filling the infrastructure investment gap. The role of Project Preparation Facilities: an overview of MDBs and the Inter-American Development Bank Approach. Discussion Paper n° (IDB-DP-00603). IADB.

Gechert, S.; Will, H. (2012) *Fiscal Multipliers: A Meta Regression Analysis*. IMK Working Paper from IMK, No 97-2012. Hans Boeckler Foundation, Macroeconomic Policy Institute, Düsseldorf.

Hughes, D. W. (2003). Policy uses of economic multiplier and impact analysis. Choices, 18(2), 25-29.

Kunaka, C.; Carruthers, R. (2014) *Trade and Transport Corridor Management Toolkit*. The World Bank, Washington

Lu W (1996): Public Infrastructure and Regional Economic Development: Evidence from China. Pacific Economic Paper 258, Canberra: The Australian National University

OCDE – Organization for Economic Co-Operation and Development (2003) Impact of Transport Infrastructure Investment on Regional Development. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development

OECD e International Transport Forum (2008): The Wider Economic Benefits of Transport? Macro-Meso and Micro Transport Planning and Investment Tools. Round Table, 25-26 October 2007, Boston. Summary and Conclusions. Discussion Paper no. 2008.6. January 2008. https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp200806.pdf

Porter, M. E. (1980). Vantagem Competitiva. Rio de Janeiro: Campus.

PPFIAF - Public-Private Infrastructure Advisory Facility (2009). Toolkit for Public - Private Partnerships in roads & Highways. Module 5: Renegotiations and Amendments to PPP Contracts. Washington: PPFIAF. https://ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/highwaystoolkit/index.html.

Rowley, A. H. (2020) *Foundations of the Future. The Global Battle for Infrastructure*. World Scientific, Londres.

Sequeira, S.; Hartmann, O.; Kunaka, C. (2014) Reviving *Trade Routes: Evidence from the Maputo Corridor. Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP)* Discussion Paper no. 14. Washington: World Bank.

Simtax (2024) Tabela de Alíquotas de ICMS 2024 de Todos os Estados. São Paulo: Simtax. https://simtax.com.br/tabela-icms-2024-aliquotas-de-todos-estados-atualizada/#elementor-toc__heading-anchor-19

Srinivasu, B.; Rao, P. S., 2013. Infrastructure Development and Economic Growth: Prospects and Perspective. Journal of Business Management & Social Sciences Research Volume 2, No.1, January 2013. Patiala, India.

Taxgroup (2025) ICMS GO – Tabela atualizada. Porto Alegre: Taxgroup. https://www.taxgroup.com.br/intelligence/icms-go-tabela-atualizada/

The World Bank. The World Bank annual report. Washington, D.C. : World Bank Group. http://documents.worldbank.org/curated/en/567941468322429653/The-World-Bank-annual-report-1994

Vickerman, Roger. (2007). Recent Evolution of Research into the Wider Economic Benefits of Transport Infrastructure Investments. OECD, International Transport Forum, OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Papers. https://doi.org/10.1787/9789282101834-3-en.

Yoshino, N.; Helble, M.; Abidhadjaev, U. (2018). *Financing Infrastructure in Asia and the Pacific Capturing Impacts and New Sources.* Asian Development Bank Institute, Tokyo.

Joaquim José Guilherme de Aragão (joaquim.jg.aragao@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF
Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato (marcosp.arch@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, D
Lucas Machado Orlandi Dafico (lucas.dafico@hotmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF

Avaliação Econômica, Regulação e Financiamento de Transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

A CONTABILIDADE GERENCIAL COMO APOIO ESTRATÉGICO À GESTÃO NO TRANSPORTE URBANO

Leonardo Teixeira Cardoso[1]
[1]Faculdade Lusófona da Bahia – FL/BA

RESUMO
Esta comunicação técnica analisa como a contabilidade gerencial pode contribuir para a gestão de empresas de transporte público urbano. Utilizando uma abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica, o estudo identifica práticas que favorecem o controle de custos, a análise de desempenho e a tomada de decisões estratégicas. Métodos como o custeio por absorção e o custeio variável, além de indicadores como o custo por quilômetro rodado, demonstram-se essenciais para a sustentabilidade do setor. Observa-se ainda que o uso adequado de informações contábeis fortalece a transparência e apoia o cumprimento de exigências regulatórias. Conclui-se que a contabilidade gerencial, quando aplicada de forma estratégica, contribui para a eficiência operacional e a melhoria dos serviços prestados.
Palavras-chave: contabilidade gerencial; transporte público; gestão de custos; desempenho; tomada de decisão.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte público urbano no Brasil enfrenta desafios estruturais significativos relacionados à sua sustentabilidade econômica, eficiência operacional e à qualidade percebida pelos usuários. O contexto pós-pandemia de COVID-19 agravou ainda mais a crise do setor, resultando em redução expressiva da demanda e queda na receita tarifária em diversas cidades brasileiras (ANTP, 2023). Diante disso, a busca por estratégias de gestão orientadas por indicadores de desempenho e métricas contábeis, planejamento e transparência tornou-se essencial para garantir a continuidade e a modernização dos serviços.

Neste contexto, a contabilidade gerencial tem se mostrado uma ferramenta estratégica essencial para apoiar a gestão dessas empresas, fornecendo informações relevantes para o planejamento, controle e tomada de decisões. Diferentemente da contabilidade financeira, que é voltada para usuários externos, a contabilidade gerencial foca no fornecimento de informações gerenciais de custos, receitas e desempenho operacional que possibilitam o monitoramento de custos, análise de desempenho e a alocação eficiente de recursos financeiros e operacionais com base em análise de custos (PADOVEZE, 2019).

No setor de transporte público, caracterizado por elevados custos operacionais, como combustível, manutenção e mão de obra, o controle e a análise detalhada dos custos são indispensáveis para a sustentabilidade do negócio (NUNES; BENDER FILHO, 2019). Ferramentas de custeio, tais como o custeio por absorção e o custeio variável, possibilitam a avaliação da rentabilidade das linhas e horários operacionais, apoiando decisões gerenciais (HORNGREN et al., 2013; RAFAGNIN; RAFAGNIN, 2017).

Além disso, a contabilidade gerencial contribui para o estabelecimento e monitoramento de indicadores de desempenho, como custo por quilômetro rodado e receita por passageiro, que são essenciais para ajustes operacionais e estratégicos (BUARQUE; MIRANDA, 2003). Apesar do reconhecimento da importância dessas informações, gestores do setor ainda enfrentam dificuldades relacionadas à tempestividade e à proximidade entre o departamento contábil e a gestão operacional (ARAUJO, 2018).

Por fim, conhecer com precisão os custos operacionais e garantir a transparência na gestão são fatores decisivos para a sustentabilidade e eficiência das empresas de transporte público, além de fundamentarem a regulação tarifária e a prestação de contas à sociedade (MONTEIRO; MIGLIORINI, 2023).

Diante disso, o presente estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a contabilidade gerencial pode contribuir com a gestão de empresas de transporte público urbano? Para tanto, realiza-se uma análise bibliográfica sobre as práticas contábeis gerenciais aplicadas ao setor, visando evidenciar seu papel na melhoria do desempenho e na tomada de decisões estratégicas.

2. METODOLOGIA

O presente artigo adota, em função da natureza do tema abordado, uma abordagem metodológica de caráter exploratório, fundamentada principalmente em pesquisa bibliográfica, com ênfase na legislação vigente relacionada à contabilidade gerencial e ao setor de transporte público urbano. De acordo com Gil (1999), a pesquisa exploratória tem como finalidade principal proporcionar maior familiaridade com o problema, com

o objetivo de torná-lo mais compreensível, além de possibilitar o aprimoramento de ideias e a formulação de abordagens mais precisas e fundamentadas para investigações futuras. Dessa forma, este estudo busca ampliar o conhecimento do pesquisador sobre a temática, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das práticas gerenciais no contexto das empresas de transporte público.

As fontes bibliográficas utilizadas foram selecionadas com base em critérios de relevância e atualidade, priorizando-se livros, artigos científicos, legislações federais e documentos técnicos publicados por órgãos oficiais e entidades reconhecidas na área de administração, contabilidade e transporte público. Também foram considerados estudos que apresentassem fundamentação teórica consolidada e que abordassem, direta ou indiretamente, a aplicação da contabilidade gerencial na gestão organizacional. A pesquisa foi conduzida entre os meses de abril e junho de 2025, utilizando bases de dados como Scielo, Google Scholar, sites institucionais (ANTP, FGV, SPTrans) e normativas legais relacionadas ao transporte público.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Oliveira e Souza (2022), o financiamento do transporte público nas capitais brasileiras ainda apresenta fragilidades estruturais, comprometendo a sustentabilidade do sistema. A aplicação de práticas de contabilidade gerencial no setor de transporte coletivo urbano pode ser dividida em três eixos principais: (i) controle de custos, (ii) avaliação de desempenho e (iii) apoio ao planejamento estratégico. Ferramentas como sistemas de Business Intelligence (BI) permitem o monitoramento em tempo real de indicadores como custo por quilômetro rodado, subsídio por passageiro e taxa de ocupação por linha. O Power BI tem se destacado pela capacidade de integrar dados operacionais em tempo real, facilitando a visualização e o cruzamento de informações gerenciais (MICROSOFT CORPORATION, 2023).

Em Curitiba, por exemplo, esses indicadores orientam a definição tarifária e os repasses às operadoras. Em São Paulo, painéis de controle digital são utilizados pela SPTrans para acompanhar os níveis de serviço, frequência e regularidade das linhas (SPTRANS, 2021). Belo Horizonte adota desde 2021 um sistema de auditoria financeira para os contratos de concessão, o que permitiu reduzir repasses em até 10% sem comprometer a operação. Segundo a Prefeitura de Belo Horizonte (2022), a implantação de auditorias independentes no sistema de transporte coletivo permitiu ampliar a transparência e reduzir custos operacionais.

Segundo o ITDP (2020), o uso de indicadores de desempenho no transporte público urbano, como custo por quilômetro, taxa de ocupação e tempo médio de espera, é essencial para avaliar a eficiência operacional e orientar decisões de planejamento. A contabilidade gerencial também permite comparar o desempenho operacional e financeiro entre empresas públicas e privadas, subsidiando decisões estratégicas como a renovação contratual, a redistribuição de linhas ou a reformulação dos modelos de concessão. A contabilidade gerencial, quando bem aplicada, oferece suporte relevante para a gestão das empresas de transporte público, possibilitando o controle detalhado dos custos operacionais, como combustível, manutenção e mão de obra (NUNES; BENDER FILHO, 2019). Ferramentas como o custeio por absorção e o custeio variável permitem avaliar a rentabilidade por linha e horário, colaborando para a tomada de decisões estratégicas (HORNGREN et al., 2013; RAFAGNIN; RAFAGNIN, 2017).

Ademais, indicadores gerenciais, como por exemplo o custo por quilômetro rodado e a receita por passageiro, são essenciais para ajustes operacionais e melhoria contínua do serviço prestado (BUARQUE; MIRANDA, 2003). No entanto, desafios ainda persistem quanto à tempestividade das informações e à comunicação entre o setor contábil e a gestão operacional das empresas de transporte (ARAUJO, 2018).

Com base na literatura consultada (BUARQUE; MIRANDA, 2003; ITDP, 2020; MONTEIRO; MIGLIORINI, 2023), é possível destacar alguns indicadores que apoiam a aplicação da contabilidade gerencial na gestão do transporte público urbano. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais indicadores utilizados e suas aplicações na prática gerencial.

Tabela 1: Indicadores de Contabilidade Gerencial no Transporte Público Urbano

Indicador	Descrição / Fórmula	Utilidade Gerencial
Custo por km rodado	Total de custos operacionais ÷ km percorridos	Avaliar eficiência operacional; subsidiar definição tarifária.

Receita por passageiro	Receita tarifária ÷ nº de passageiros transportados	Verificar equilíbrio entre tarifa praticada e custos; apoiar políticas de subsídio.
Subsídio por passageiro	Total de subsídios ÷ nº de passageiros transportados	Medir dependência de recursos públicos; avaliar sustentabilidade financeira.
Taxa de ocupação média	Passageiros transportados ÷ capacidade total dos veículos	Indicar nível de utilização da frota; orientar ajustes de oferta de viagens.
Custo por linha/horário	Custos diretos atribuídos ÷ nº de viagens realizadas	Identificar rentabilidade de linhas específicas; apoiar decisões de corte/expansão.
Tempo médio de espera	Tempo total de espera ÷ nº de usuários	Avaliar qualidade do serviço do ponto de vista do usuário; monitorar cumprimento de oferta.

Por fim, a transparência na apresentação dos custos operacionais é fundamental para a sustentabilidade financeira das empresas e para o cumprimento das exigências regulatórias (MONTEIRO; MIGLIORINI, 2023), fortalecendo a confiança dos usuários e órgãos reguladores. Estudos demonstram que a aplicação de tecnologias de Business Intelligence (BI) no setor de mobilidade urbana pode otimizar o planejamento e ampliar a transparência das ações públicas (SILVA; OLIVEIRA; GOMES, 2020).

4. CONCLUSÃO

A incorporação de práticas de contabilidade gerencial no transporte público urbano representa uma estratégia promissora para aprimorar a gestão dos serviços, especialmente diante de cenários de escassez orçamentária e pressão por eficiência. Além de possibilitar maior transparência na alocação de recursos, essas práticas favorecem os mecanismos de accountability e transparência regulatória e a melhoria da qualidade do serviço ofertado. Como perspectiva futura, recomenda-se o desenvolvimento de estudos empíricos em diferentes cidades brasileiras para avaliar o impacto da adoção dessas ferramentas sobre os indicadores operacionais e financeiros. Também se sugere o aprofundamento de metodologias de benchmarking entre operadoras, com vistas à padronização de indicadores e definição de metas de desempenho alinhadas a objetivos sociais.

A contabilidade gerencial desempenha papel estratégico na gestão de empresas de transporte público urbano fornecendo informações essenciais para o controle de custos, monitoramento de desempenho e tomada de decisões que visam a sustentabilidade financeira e a eficiência operacional. Apesar dos desafios existentes quanto à integração entre os setores contábil e operacional, as ferramentas e indicadores gerenciais oferecem suporte relevante para o aprimoramento contínuo do serviço.

Em um momento em que o transporte coletivo enfrenta desafios de sustentabilidade econômica e de confiança pública, soluções tecnológicas como as discutidas neste trabalho contribuem para a regulação e a melhoria da eficiência dos serviços. O uso de BI no setor é, portanto, não apenas uma inovação técnica, mas também um instrumento de política pública orientada por dados e resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Informativo técnico – Impactos da pandemia sobre o transporte público. São Paulo: ANTP, 2023.

ARAUJO, Cláudio César de. Contabilidade gerencial: um estudo sobre a utilização das informações contábeis na tomada de decisão em empresas de transporte urbano. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2018.

BUARQUE, Eduardo Cavalcanti; MIRANDA, Ivo de Carvalho. A contabilidade gerencial no transporte público urbano: um estudo de caso no município do Recife. Revista de Administração Pública, v. 37, n. 3, p. 427-442, 2003.

GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: Atlas, 1999.

HORNGREN, Charles T.; SUNDERMAN, Gary L.; STRATTON, William O. Contabilidade de custos. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

ITDP – INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO. Indicadores de desempenho para

sistemas de transporte público. Rio de Janeiro, 2020.
MICROSOFT CORPORATION. Power BI documentation and tools. 2023. Disponível em: https://learn.microsoft.com/power-bi. Acesso em: 18 jun. 2025.
MONTEIRO, Rafael Ribeiro; MIGLIORINI, Felipe. Transparência e custos no transporte público: desafios regulatórios. Relatório Técnico. Fundação Getulio Vargas, 2023.
NUNES, Felipe Aparecido; BENDER FILHO, Reinaldo. A contabilidade de custos como instrumento de apoio à gestão: um estudo de caso em uma empresa de transporte coletivo urbano. Revista de Contabilidade do Mestrado em Ciências Contábeis da UERJ, v. 24, n. 1, p. 1-18, 2019.
OLIVEIRA, T.; SOUZA, M. Financiamento do transporte público e sustentabilidade econômica: um panorama das capitais brasileiras. Revista de Mobilidade Urbana, v. 14, n. 3, p. 56-71, 2022.
PADOVEZE, Clóvis Luís. Contabilidade gerencial: uma abordagem prática. São Paulo: Atlas, 2019.
PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Auditoria do sistema de transporte coletivo e painéis de monitoramento: relatório técnico. Belo Horizonte: PBH, 2022.
RAFAGNIN, Antônio Carlos; RAFAGNIN, Laércio Carlos. Contabilidade gerencial. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UCPel, 2017.
SILVA, R.; OLIVEIRA, A.; GOMES, D. Tecnologias de Business Intelligence (BI) aplicadas à mobilidade urbana. Revista Transporte & Sociedade, v. 45, n. 2, p. 33-48, 2020.
SPTRANS – SÃO PAULO TRANSPORTE S.A. Relatório de transparência: indicadores e BI no transporte coletivo. São Paulo: SPTrans, 2021.

SISTEMA DE TRANSPORTE SUPLEMENTAR DE BELO HORIZONTE: ANÁLISE DA OFERTA, DEMANDA E DESEMPENHO OPERACIONAL

Ana Carolina Alves, Henrique Rezende de Carvalho, Fernanda Aparecida Correa, Matheus Jouber Vieira, Pedro Henrique da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

RESUMO

Este trabalho analisa o desempenho do sistema de transporte público suplementar da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), com foco na relação entre oferta e demanda ao longo do tempo. Com base em dados operacionais de 2023 a 2025, a metodologia incluiu análise de séries temporais, cálculo de elasticidades e avaliação do equilíbrio entre viagens programadas e passageiros transportados. Os resultados indicam que a demanda é predominantemente inelástica, com elasticidades de –0,56 entre março e abril de 2023, –0,45 entre novembro e dezembro de 2023 e –0,47 entre janeiro de 2024 e janeiro de 2025. Houve um caso de elasticidade positiva de +0,21 entre junho e julho de 2023, ainda assim inelástica. Além disso, foram identificados momentos de desequilíbrio, evidenciando a necessidade de um planejamento operacional mais ágil. O estudo contribui para compreender o comportamento da demanda e apoiar a formulação de políticas públicas de mobilidade urbana.

Palavras-chave: transporte público suplementar, elasticidade, planejamento operacional, RMBH.

1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) concentra aproximadamente 6 milhões de habitantes, distribuídos em 34 municípios, formando uma rede complexa de deslocamentos cotidianos. Nesse contexto, o Transporte Público Suplementar representa um componente fundamental do sistema de mobilidade, atuando em áreas de baixa demanda e difícil acesso, onde o transporte convencional se mostra ineficiente ou inviável. Operado por permissionários com veículos de menor porte, esse serviço busca ampliar o alcance do sistema e garantir a continuidade do atendimento à população.

Nos últimos anos, a demanda por transporte público na RMBH tem apresentado queda, resultado de fatores como a pandemia de COVID-19, mudanças no padrão de deslocamento, ampliação do tele trabalho e crescente concorrência de serviços prestados por aplicativo. Esses elementos impõem desafios significativos à eficiência e sustentabilidade do sistema, especialmente no Transporte Suplementar, que possui características operacionais mais flexíveis, mas enfrenta limitações estruturais.

Diante desse cenário, torna-se necessária uma análise sistemática da relação entre oferta e demanda, com destaque para o comportamento da elasticidade e para a identificação de eventuais desequilíbrios operacionais. A elasticidade da demanda e da oferta são variáveis importantes para compreender a capacidade do sistema em ajustar-se às mudanças de contexto, bem como para embasar estratégias de planejamento e gestão.

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do sistema de Transporte Suplementar da RMBH no período compreendido entre fevereiro de 2023 e janeiro de 2025, com foco na evolução da oferta e da demanda, no cálculo das elasticidades e na avaliação do equilíbrio operacional. A partir de dados reais, busca-se compreender o comportamento do sistema e fornecer subsídios técnicos para aprimorar a gestão pública e a formulação de políticas de mobilidade urbana na região.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A curva de oferta representa a quantidade de viagens de ônibus do tipo suplementar que os operadores estão dispostos a disponibilizar a determinado preço, mantendo-se constantes os demais fatores que possam influenciar a oferta. Por sua vez, a curva de demanda indica a quantidade de passageiros dispostos a utilizar essas linhas pelo preço estabelecido, considerando inalterados os demais fatores que afetam a demanda.

A elasticidade da demanda por transporte público, segundo Ortúzar e Willumsen (2011), expressa a sensibilidade dos usuários frente a alterações tarifárias, sendo também influenciada por fatores como qualidade do serviço, renda e existência de modos alternativos (Litman, 2017). Por outro lado, a elasticidade da oferta refere-se à capacidade do sistema de adaptar-se às variações da demanda. Em sistemas convencionais, esses ajustes tendem a ser mais limitados, enquanto no transporte suplementar há maior flexibilidade para

reconfiguração operacional (Gwilliam, 2003). A elasticidade da demanda é afetada por fatores como: o perfil do passageiro; tipo de viagem; geografia da cidade; tipo de mudança tarifária; direção da mudança tarifária; período de análise e; tipo de transporte público (Litman, 2004; Grange *et al.,* 2013).

Além disso, o equilíbrio entre oferta e demanda é uma variável-chave na avaliação de desempenho. As curvas de oferta e demanda se cruzam no ponto de equilíbrio. O desequilíbrio pode se manifestar tanto em forma de superlotação quanto de ociosidade, impactando a eficiência econômica e a qualidade do serviço prestado.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se na análise de dados secundários obtidos no portal da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), especificamente do Mapa de Controle Operacional (MCO) do transporte suplementar. Foram utilizados dados referentes ao período entre fevereiro de 2023 e janeiro de 2025, contemplando número de viagens realizadas por dia e por linha e número total de passageiros transportados. Para possibilitar a comparação em uma mesma escala, os valores referentes às viagens foram multiplicados por um fator de 35, o que facilita a visualização da relação entre oferta e demanda. Esses dados foram consolidados por mês e utilizados para análise das elasticidades considerando os momentos de alteração de tarifa. Por uma questão de disponibilidade de dados, as análises das alterações de tarifas ocorridas em 2023 foram realizadas com base no mês anterior e não no ano anterior, essa análise contemplando o mesmo mês em anos distintos foi possível somente para a alteração de 2025. O efeito do preço (P) na demanda (Q) em termos de elasticidade é dado pela Equação 1:

$$E = \frac{\Delta Q}{\Delta P}\frac{P}{Q} \tag{1}$$

No histórico tarifário, observou-se um aumento da tarifa em abril de 2023 (R$6,00), seguido por uma redução em julho (R$4,50) e novos reajustes em dezembro de 2023 (R$5,25) e janeiro de 2025 (R$5,75). Esses valores foram considerados como variáveis centrais da análise, pois permitem verificar os impactos das mudanças tarifárias sobre a demanda e a oferta do transporte suplementar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da consolidação dos dados, foi possível identificar alterações no comportamento dos usuários frente às variações tarifárias, bem como compreender os impactos dessas mudanças sobre a oferta de viagens e a demanda pelo serviço. Esses resultados forneceram subsídios para a construção das curvas de oferta e demanda, fundamentais para a avaliação do equilíbrio econômico-operacional do sistema apresentada na Figura 1.

Observa-se que no início do período, entre fevereiro e março de 2023, com a tarifa de R$4,50, houve um crescimento expressivo da demanda, que atingiu mais de 1,9 milhões de passageiros. A oferta de viagens também cresceu, embora em menor proporção. Em abril de 2023, foi implementado um aumento tarifário, elevando o valor para R$6,00. A mudança provocou uma queda na demanda, que se acentuou nos meses seguintes. A oferta, no entanto, permaneceu praticamente constante.

Em julho de 2023, a tarifa foi reduzida novamente para R$4,50. A resposta da população foi rápida: houve uma recuperação significativa na demanda, que voltou a crescer nos meses seguintes. O comportamento reforça a ideia de que o preço da passagem tem grande influência sobre a decisão do usuário de utilizar ou não o transporte suplementar. A oferta também aumentou nesse período, acompanhando o crescimento da procura.

Já em dezembro de 2023, um novo aumento elevou a tarifa para R$5,25. Mais uma vez, observou-se uma queda na demanda a partir de janeiro de 2024. A oferta foi ligeiramente reduzida, mas ainda permaneceu acima da demanda. Por fim, em janeiro de 2025, a tarifa foi reajustada para R$5,75, o que provocou a maior queda de demanda de todo o período analisado. A quantidade de passageiros atingiu o ponto mais baixo da série, enquanto a oferta também foi reduzida, mas ainda assim continuou desproporcional em relação ao uso real.

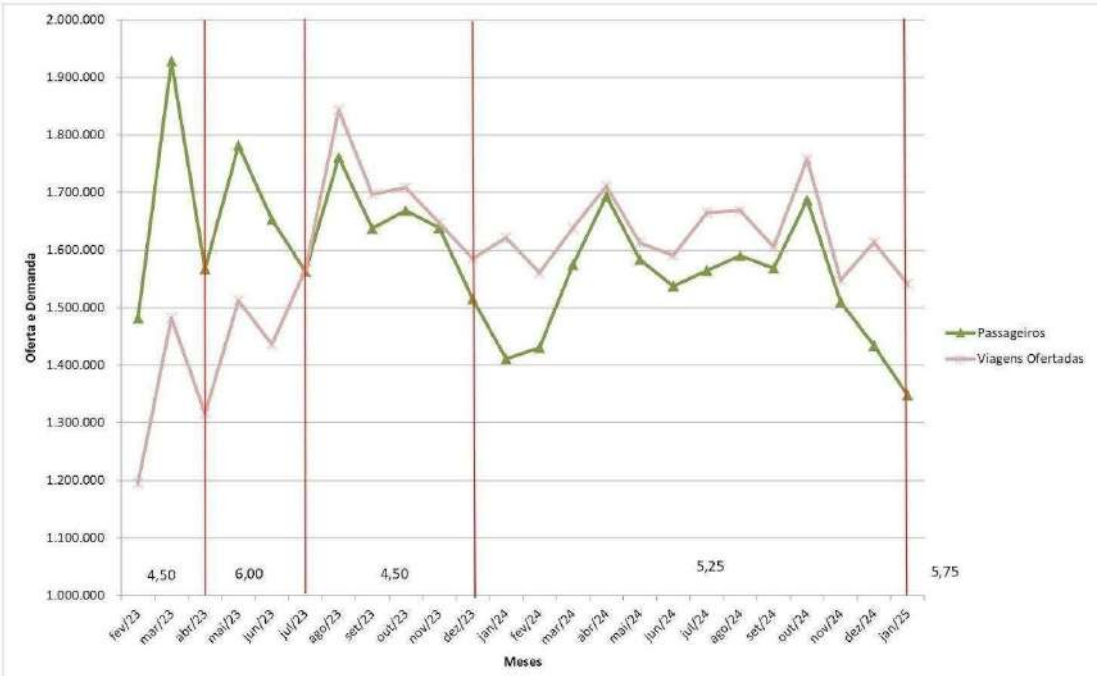


Figura 1: Evolução da oferta e demanda de acordo com a variação no preço da passagem nos meses analisados.

5. CONCLUSÕES

O transporte suplementar da RMBH exerce papel fundamental na promoção da acessibilidade e no atendimento a áreas onde o transporte convencional não se mostra eficiente. A análise realizada demonstrou que a demanda pelo serviço é predominantemente inelástica, variando entre –0,56 e –0,45 nos principais períodos avaliados, o que indica baixa sensibilidade dos usuários diante de alterações tarifárias. O único caso de elasticidade positiva (+0,21) não alterou essa tendência geral. O comportamento inelástico da demanda pode estar relacionado ao tipo de usuário do transporte suplementar, que pode depender exclusivamente do serviço para acesso às oportunidades. Além disso, este tipo de serviço de transporte público que atende regiões específicas de baixa demanda pode estar menos sujeito a outros serviços de transportes concorrentes.

Em se tratando das curvas de oferta e demanda, a quantidade de viagens ofertadas respondeu apenas parcialmente às mudanças na demanda. Apesar da maior flexibilidade operacional característica do transporte suplementar, ocorreram situações de desequilíbrio, traduzidas em excesso ou escassez de oferta, o que pode comprometer tanto a eficiência econômica quanto a qualidade do serviço prestado. As variações tarifárias tiveram influência direta no comportamento dos usuários, porém a relação entre as variações de preço e demanda não ocorrem de forma proporcional: os reajustes de abril e dezembro de 2023 e de janeiro de 2025 resultaram em quedas significativas no número de passageiros, enquanto a redução de julho de 2023 gerou recuperação imediata da demanda. Esse resultado reforça a necessidade de uma política tarifária mais estável e alinhada ao perfil socioeconômico da população atendida.

Dessa forma, recomenda-se o fortalecimento do monitoramento em tempo real, a revisão periódica da programação operacional e a integração mais efetiva com o transporte convencional. Essas medidas podem contribuir para reduzir desequilíbrios e ampliar a fidelização e atratividade do sistema. Os resultados indicam que a oferta e a demanda do transporte suplementar respondem de forma diferente às variações tarifárias, gerando momentos de desequilíbrio operacional que impactam a operação do sistema.

Sugere-se como estudos futuros, a análise da elasticidade cruzada em comparação com outros serviços de transportes da RMBH, como o transporte convencional de Belo Horizonte, o sistema de metrô o serviço de transporte metropolitano para avaliar o grau de substituição ou complementariedade dos serviços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Grange, L.; F. González; J. C. Muñoz e R. Troncoso (2013) Aggregate estimation of the price elasticity of demand for public transport in integrated fare systems: The case of Transantiago. *Transport Policy,* v. 29, p. 178-185. DOI: 10.1016/j.tranpol.2013.06.002

Gwilliam, K. M (2003). *Urban transport in developing countries*. Washington, DC: World Bank.

Holmgren, J (2007) Meta-analysis of public transport demand. *Transportation Research Part A*, v. 41, p. 1021–1035. DOI: 10.1016/j.tra.2007.06.003

Litman, T (2017). *Transportation Land Use Impacts*. Victoria, BC: Victoria Transport Policy Institute.

Ortúzar, J. de D.; L. G. Willumsen (2011). *Modelos de demanda de transporte* (4ª. ed.). Rio de Janeiro: Bookman.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE (2025). *Mapa de Controle Operacional (MCO) Consolidado Suplementar*. Disponível em: https://dados.pbh.gov.br/dataset/mapa-de-controle-operacional-mco-consolidado- suplementar. (acesso em 28/04/2025).

Ana Carolina Alves (carolinaana27101@email.com) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Amazonas, 7675 – Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil
Fernanda Aparecida Correa (fernanda.a.correa@gmail.com) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Amazonas, 7675 – Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil
Henrique Rezende de Carvalho (henriquerezendec1995@gmail.com) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Amazonas, 7675 – Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil
Matheus Jouber Vieira (mathsjv23@gmail.com) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Amazonas, 7675 – Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil
Pedro Henrique da Silva (pedro.silva@pet.coppe.ufrj.br) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Amazonas, 7675 – Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil

Avaliação Econômica, Regulação e Financiamento de Transportes

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DA MANUTENÇÃO DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO EM TRECHOS CONCEDIDOS DA BR-116

Luísa Mugia Souza[1], **Romulo Dante Orrico Filho**[1], **Sandra Oda**[1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Esta pesquisa investiga a eficiência da manutenção do pavimento rodoviário em trechos concedidos da BR-116, considerando a diversidade contratual e regulatória ao longo da rodovia. O objetivo é analisar se as diferenças nos contratos impactam os resultados obtidos em termos técnicos e financeiros. A abordagem metodológica combinará análise documental e técnicas estatísticas. No plano qualitativo, serão examinadas cláusulas contratuais relativas à manutenção, com base na leitura crítica de contratos, aditivos e programas de exploração. No plano quantitativo, aplicar-se-á a Análise Envoltória de Dados (DEA-BCC) orientada a *outputs*, com posterior uso de regressões Tobit para identificar fatores explicativos dos níveis de eficiência. Espera-se, com isso, compreender quais dispositivos regulatórios estão associados a melhores resultados e propor diretrizes para o aprimoramento da política de concessões rodoviárias no Brasil.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A infraestrutura rodoviária é estratégica para a integração do território nacional, o escoamento da produção e a mobilidade de pessoas, especialmente no Brasil. Dadas as dimensões continentais do país e a baixa participação de outros modos na matriz de transportes brasileira, as rodovias concentram a maior parte do transporte de cargas e passageiros, tornando-se elemento essencial da logística nacional. Tal dependência acentua a responsabilidade do poder público em garantir a funcionalidade da malha viária, tarefa que exige investimentos contínuos em conservação e manutenção. Entretanto, a combinação entre a expansão da demanda, o envelhecimento das vias e a limitação de recursos orçamentários levou a um desgaste progressivo da malha existente, comprometendo o desempenho logístico e a segurança viária.

Como resposta a esse cenário, o Brasil adotou, a partir da década de 1990, o modelo de concessões rodoviárias, delegando a operadores privados a responsabilidade pela operação, manutenção e ampliação da infraestrutura. A proposta visava atrair investimentos, melhorar a qualidade dos serviços e assegurar a sustentabilidade do sistema por meio de contratos de longo prazo. Nessa lógica, e com relação a essas rodovias, cabe ao poder público atuar como regulador, fiscalizando a execução dos contratos, avaliando os resultados obtidos e intervindo, quando necessário, para proteger o interesse público. No entanto, questiona-se se o desempenho das concessões em relação à manutenção da malha viária é isento à influência de instrumentos e práticas de regulação. Fatores como a forma de definição das metas, o grau de detalhamento técnico dos indicadores e a capacidade de fiscalização da agência reguladora podem influenciar significativamente os resultados obtidos.

Este estudo toma como referência a BR-116 para investigar a relação entre dispositivos contratuais e a eficiência da manutenção do pavimento rodoviário de trechos concedidos. Trata-se da rodovia mais extensa do país, atravessando sete estados e reunindo trechos concedidos sob diferentes contratos, firmados em momentos distintos. Essa diversidade permite comparar estruturas regulatórias e cláusulas contratuais, controlando variáveis territoriais e operacionais. Ao analisar como essas diferenças afetam a eficiência da manutenção do pavimento, esta pesquisa busca compreender os efeitos práticos dos instrumentos de regulação sobre os resultados entregues pelas concessionárias. Com isso, espera-se contribuir para o aperfeiçoamento da política nacional de concessões, identificando boas práticas e propondo caminhos para o fortalecimento da atuação regulatória no setor rodoviário.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A delegação da operação de rodovias por meio de contratos de concessão baseia-se, em geral, na premissa de que os ativos de infraestrutura funcionam como monopólios naturais, nos quais a inexistência de substitutos próximos impede a competição direta. Essa condição torna necessária a atuação de instrumentos regulatórios que assegurem a qualidade e o interesse público na prestação dos serviços. Como destacam Samuelson e Nordhaus (1993), em situações de monopólio, o mercado deixa de funcionar como um alocador eficiente de recursos, o que justifica a intervenção estatal. Assim, cabe às agências reguladoras supervisionar os contratos,

garantir o cumprimento das obrigações assumidas e mitigar falhas de mercado típicas desse tipo de arranjo institucional.

Entretanto, para ser eficaz, a regulação precisa estar amparada por instrumentos normativos claros e operacionais. Caldeira (2016) argumenta que a ausência de tais instrumentos compromete a atuação do Estado como garantidor da boa qualidade da prestação do serviço. Soma-se a isso o desafio da assimetria de informações entre regulador e regulado, problema clássico identificado por Laffont e Tirole (1993), que explicam que, para fins de monitoramento, a administração pública frequentemente depende de dados fornecidos pelas próprias concessionárias, o que fragiliza o processo de monitoramento.

Diante dessas limitações, o desempenho da manutenção do pavimento rodoviário — elemento em destaque na qualidade do serviço concedido — torna-se fortemente condicionado à estrutura contratual firmada e à capacidade regulatória. Bennet e Iossa (2006) destacam que contratos eficientes são aqueles que estabelecem metas claras e mensuráveis, vinculadas a mecanismos de controle do seu cumprimento. Complementarmente, Zhang e Yuan (2020) reforçam que, na ausência de uma regulação eficaz, a flexibilidade decisória conferida às concessionárias pode favorecer a redução de custos operacionais em detrimento da conservação da infraestrutura, com prejuízos diretos aos usuários e ao valor dos ativos delegados.

Nessa perspectiva, a avaliação do desempenho das concessões exige um entendimento claro do conceito de eficiência técnica, compreendido como a possibilidade de produzir os melhores resultados possíveis (*outputs*), considerando os recursos disponíveis (*inputs*). Essa concepção, originalmente formulada por Farrell (1957), é usada com frequência na avaliação de desempenho de serviços. Na prática, a eficiência técnica permite identificar quais unidades operam próximas de seu potencial máximo e quais apresentam rendimentos abaixo do esperado, mesmo sob condições semelhantes.

Portanto, avaliar a eficiência da manutenção rodoviária é relevante por envolver impactos diretos sobre a segurança viária, custos logísticos e desempenho econômico. Quando a manutenção não é realizada de forma adequada, os efeitos recaem tanto sobre o patrimônio público quanto sobre os usuários finais. Pessoa (1992) já demonstrava que a inadequação da manutenção pode acarretar aumentos de 38% nos custos operacionais dos veículos, duplicar o tempo de viagem e elevar em 50% o número de sinistros. Esses dados reforçam a ideia de que a manutenção rodoviária não pode ser tratada apenas como um problema técnico de engenharia, sendo, antes de tudo, uma questão de política pública.

Dessa forma, compreender a eficiência da manutenção em rodovias concedidas exige atenção aos aspectos financeiros, técnicos e regulatórios. A análise de contratos, de indicadores de desempenho e dos investimentos realizados deve ser capaz de revelar quais trechos concedidos entregam melhores resultados, e por que isso ocorre. Essa abordagem contribuirá para o aperfeiçoamento da gestão pública, para o fortalecimento da atuação regulatória e para a reformulação de contratos de concessão futuros.

3. PROPOSTA METODOLÓGICA

A pesquisa adotará uma abordagem mista, baseada na integração de métodos qualitativos e quantitativos. A etapa qualitativa consistirá na análise documental dos contratos de concessão da BR-116, de seus aditivos e anexos, especialmente os documentos do Programa de Exploração da Rodovia (PER). De acordo com Bowen (2009), o emprego desta técnica envolve um processo sistemático de revisão e interpretação de documentos a fim de extrair informações relevantes à luz do problema de pesquisa. No caso deste estudo, os documentos supramencionados serão analisados em sua totalidade, com foco na verificação de presença e detalhamento de cláusulas relacionadas à manutenção do pavimento, como metas técnicas e frequência de monitoramento. Com isso, a análise buscará identificar padrões regulatórios, inovações e lacunas, possibilitando a interpretação dos resultados da etapa quantitativa e formulação de propostas de aprimoramento contratual.

No plano quantitativo, o estudo consistirá na aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), utilizando o

modelo BCC orientado a *outputs*, conforme proposto por Banker, Charnes e Cooper (1984). Por meio dessa técnica não paramétrica, pode-se avaliar a eficiência técnica relativa entre as unidades comparadas, considerando retornos variáveis de escala. No caso desta pesquisa, as unidades de decisão (DMUs) serão definidas a partir da estrutura dos trechos concedidos da BR-116, considerando a possibilidade de agregação por contrato ou de subdivisão em segmentos homogêneos. Essas unidades poderão então ser comparadas a partir da combinação de *inputs* e *outputs* observados. Como *inputs*, poderão ser considerados dados como as extensões dos trechos, volumes de tráfego e investimentos anuais em manutenção. Já os *outputs* serão representados por indicadores técnicos que representem a qualidade do pavimento, tais como o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), o Índice de Condição do Pavimento (ICP), medidas de deflexão e condições de superfície, conforme disponibilidade. Tais indicadores serão obtidos a partir dos relatórios de monitoramento divulgados oficialmente pela ANTT para cada concessão. O modelo será implementado no *software* R. Os *scores* de eficiência obtidos serão posteriormente analisados por meio de regressão Tobit, a fim de identificar quais variáveis contratuais e/ou operacionais podem explicar os diferentes níveis de eficiência observados.

4. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa pretende contribuir para o campo de estudo de regulação em transportes por meio da integração de abordagens que articulam a análise documental e métodos quantitativos para avaliar eficiência. Por focar exclusivamente na manutenção do pavimento rodoviário, a pesquisa avança em relação a outros estudos que se concentraram em aspectos tarifários, de segurança viária ou de satisfação dos usuários. Ademais, por explorar uma mesma rodovia com diferentes trechos concedidos, o estudo permite controlar variáveis operacionais, com o almejo de isolar os efeitos da estrutura contratual e da regulação sobre os resultados obtidos. Com base nisso, espera-se que a pesquisa colabore para o aprimoramento de contratos e para os instrumentos regulatórios usados nas concessões rodoviárias no Brasil.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banker, R. D.; A. Charnes e W. W. Cooper (1984) Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. Management Science, v. 30, n. 9, p. 1078–1092.

Bennett, J. e E. Iossa (2006) Building and managing facilities for public services. Journal of Public Economics, v. 90, n. 10–11, p. 2143–2160.

Bowen, G. A. (2009) Document analysis as a qualitative research method. Qualitative Research Journal, v. 9, n. 2, p. 27–40.

Caldeira, L. K. O. (2016) Regulação de concessão de rodovias e o papel do Estado. Revista de Direito Setorial e Regulatório, v. 2, n. 1, p. 233–246.

Farrell, M. J. (1957) The measurement of productive efficiency. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), v. 120, n. 3, p. 253–290.

Laffont, J.-J. e J. Tirole (1993) A theory of incentives in procurement and regulation. Cambridge: MIT Press.

Pessoa, R. S. (1992) Impactos econômicos da deterioração da infraestrutura rodoviária. Texto para Discussão no 245. Brasília: IPEA.

Samuelson, P. A. e W. D. Nordhaus (2012) Economia (19ª ed.). Porto Alegre: AMGH.

Zhang, J. e X. Yuan (2021) Stochastic modelling of maintenance flexibility in Value for Money assessment of PPP road projects. Construction Management and Economics, v. 39, n. 2, p. 173–191.

Luísa Muglia Souza (luisa.muglia@pet.coppe.ufrj.br)
Romulo Dante Orrico Filho (romulo@pet.coppe.ufrj.br)
Sandra Oda (sandraoda@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Avenida Athos da Silveira Ramos, nº 149, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE AEROPORTOS SOB A ÓTICA DAS COMPANHIAS AÉREAS

Ivaciane de Quadra Maglhães[1], Anderson Ribeiro Correia[1], Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira[2]
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica, [2]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este estudo propõe um enquadramento centrado nas companhias aéreas para medir a eficiência de aeroportos. Unidades de tomada de decisão (DMUs) são formadas ao combinar dois insumos orientados a custos e dois produtos de serviço observados no Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (SBGR) entre janeiro de 2019 e agosto de 2024. Cinco modelos de Análise Envoltória de Dados (DEA) são comparados (radiais CRS e VRS, direcional, aditivo e supereficiência). Os resultados indicam perdas marcantes de eficiência técnica durante o choque da COVID-19, especialmente no modelo CRS orientado a insumos. O modelo direcional capta a contração simultânea de insumos e expansão de produtos, produzindo a menor dispersão de escores. Os achados sugerem que políticas de alocação de slots e tarifas se beneficiam de métricas alinhadas à estrutura de custos das companhias aéreas, em vez de se basearem apenas no fluxo de passageiros.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

Os aeroportos atuam como nós que movimentam os passageiros e cargas por uma rede global de transporte, aumentando a economias regionais, turismo e comércio. Seu desempenho diário afeta tanto a experiência de viagem quanto a rentabilidade das companhias aéreas; por isso, previsões de demanda confiáveis ajudam companhias e gestores aeroportuários a planejar recursos, programar voos e definir tarifas (Chen e Wu, 2022). A Análise Envoltória de Dados (DEA) oferece outra perspectiva ao medir a eficiência com que aeroportos transformam insumos em produtos sem impor forma paramétrica. Estudos de DEA geralmente comparam aeroportos por oferta de assentos, custos operacionais e pontualidade (Ripoll-Zarraga e Lozano, 2020), mas a maioria mantém foco no passageiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

A Análise Envoltória de Dados (DEA) foi introduzida por Charnes, Cooper e Rhodes em 1978 como um método não paramétrico para avaliar a eficiência relativa de unidades de tomada de decisão (DMUs) usando programação linear. Ao construir uma fronteira de produção empírica a partir de entradas e saídas observadas, a DEA identifica as unidades com melhor desempenho e mede as outras em relação a essa "melhor prática" (H. Ulutas, 2018). No setor de transportes, a DEA começou a ter aplicações no final da década de 1980 e, na década de 1990, foi adotada por pesquisadores da aviação para estudar a eficiência de companhias aéreas e aeroportos.

No final da década de 1990, o método também foi aplicado a aeroportos – Gillen e Lall (1997) analisaram a eficiência de 21 aeroportos norte-americanos, um dos primeiros estudos. Na mesma época, pesquisadores na Europa e em outros lugares fizeram análises semelhantes de estudos sobre a eficiência aeroportuária espanhola em 1999, e Sarkis (2000) utilizando DEA para 44 aeroportos norte-americanos. No início da década de 2000, a DEA foi utilizada para comparar aeroportos europeus (Pels et al., 2001, 2003), aeroportos brasileiros(Fernandes et al., 2019) e para avaliar o impacto da privatização aeroportuária na Espanha (Fröhlich e Niemeier, 2011).

3. RESULTADOS PRELIMINARES

As quatro variáveis foram selecionadas e analisadas para mensurar o impacto das operações aeroportuárias sobre as companhias aéreas. Como variáveis de entrada, a Tarifa Aérea Média Real e o Preço do Combustível de Aviação foram selecionados e denominados X1 e X2. A Tarifa Aérea Média Real foi escolhida porque pode representar um custo ou pressão sobre a demanda por transporte aéreo. Um valor maior de tarifa diminuirá a atratividade de uma empresa, impactando, portanto, suas operações. O Preço do Combustível de Aviação é uma restrição macroeconômica que impactará todas as empresas na mesma proporção e é um dos principais fatores para o aumento ou redução do preço das passagens aéreas. Como variáveis de saída, o Tráfego de Passageiros e o Tráfego de Carga Aérea foram escolhidos e denominados Y1 e Y2. O Tráfego de Passageiros foi escolhido devido à sua capacidade de representar a resposta às políticas aplicadas pelas empresas e gestores aeroportuários para atrair pessoas. O Tráfego de Carga Aérea é uma medida da capacidade do aeroporto de ser um hub de cargas e, é um bom indicador de como está a economia da região. Se um alto tráfego de carga aérea

for observado, o que favorece o crescimento econômico local.
Os números apresentam a "Tarifa Aérea Real Média", em dólares americanos ajustados pela inflação, para Azul, Gol e Latam em rotas dentro do Brasil de 2019 a 2024. Em uma estrutura de Análise Envoltória de Dados (DEA), essa variável foi considerada como uma entrada. O uso da tarifa média faz sentido: quando os níveis de serviço (volume de passageiros, tamanho da malha, frequência de voos, etc.) permanecem inalterados, um preço mais baixo é preferível. Se uma companhia aérea consegue oferecer seu serviço a um custo menor para os viajantes, isso pode indicar uma melhor eficiência operacional.
A Tabela 1 mostra as correlações de Pearson conectando preços de insumos e resultados operacionais para as três principais companhias aéreas da SBGR durante 2019-24. Em conjunto, a matriz retrata um mercado em que choques de custos se propagam por todas as companhias aéreas e os volumes de produção mantêm conexões moderadas, e não extremas, com esses custos ao longo dos meses da amostra. Consequentemente, os modelos DEA devem tratar as três entradas de tarifas aéreas como parcialmente redundantes e considerar o preço do combustível como um fator de fundo incontrolável, em vez de uma alavanca para a eficiência gerencial. Essa leitura evita que cortes de tarifas sejam exagerados como uma solução rápida para melhorar os volumes de serviço em comparações de eficiência.

Tabela 1: Correlação das variáveis.

	$X_{1,AZUL}$	$X_{1,GOL}$	$X_{1,LATAM}$	X_2	Y_1	Y_2
$X_{1,AZUL}$	1.00	0.81	0.86	0.75	0.59	0.54
$X_{1,GOL}$	0.81	1.00	0.89	0.58	0.55	0.46
$X_{1,LATAM}$	0.86	0.89	1.00	0.62	0.67	0.52
X_2	0.75	0.58	0.62	1.00	0.57	0.60
Y_1	0.59	0.55	0.67	0.57	1.00	0.76
Y_2	0.54	0.46	0.52	0.60	0.76	1.00

3.1 Retorno Constante de Escala (CCR) – Orientado a Insumos

A Figura 1 apresenta os resultados do modelo DEA Radial-Orientado a Insumos e a Produto para as companhias aéreas brasileiras GOL, Azul e LATAM, no período de 2019 a 2024. O eixo vertical de Input Oriented representa a eficiência técnica relativa, que varia de 0 a 1, onde 1 indica eficiência do avião e a DMU está na fronteira da produção eficiente para a combinação considerada de insumos e produtos. A análise orientada para o output difere ligeiramente da análise orientada para o input, pois o foco agora está na otimização da operação, mantendo o investimento disponível em input. Nesse caso, os escores de eficiência são iguais ou superiores a 1. Se o escore for 1, é porque a DMU está operando na fronteira de eficiência. Se for superior, significa que, com os mesmos recursos disponíveis, é possível obter um aumento na operação na proporção da eficiência encontrada. No dia a dia, os gestores operam nos dois sentidos, buscando reduzir os recursos e aumentar o output.
No CCR DE Input Oriented de 2019 ao início de 2020, as três empresas apresentaram altos escores de eficiência, próximos ou iguais a 1, indicando um período de alta eficiência técnica. Alta eficiência técnica está correlacionada a uma alocação adequada de recursos em relação ao volume de produção (movimentação de passageiros e movimentação de cargas). Em 2020, houve uma queda acentuada na eficiência de todas as empresas, refletindo o impacto da pandemia. Essa queda não foi acompanhada por uma alocação proporcional de recursos de insumo, como frota, funcionários e estrutura, gerando ineficiência segundo o modelo. A GOL apresentou maior estabilidade na pontuação, especialmente entre 2022 e 2023, mantendo pontuações ligeiramente superiores às de seus pares em parte do período. A Azul apresenta maior variabilidade, com quedas e restabelecimentos mais significativos, o que pode indicar maior sensibilidade em relação às operações ou estratégias. A LATAM segue um padrão semelhante a ambas, com alguns momentos consistentes de recuperação e quedas bruscas em períodos críticos.
Para o CCR de Output Oriented, no início de 2020, as três companhias aéreas analisadas apresentavam escores próximos a 1,0 e 1,2, sugerindo que operavam com relativa eficiência na conversão de inputs em outputs. A margem de expansão era curta, indicando bom aproveitamento da infraestrutura instalada. Durante a pandemia, observou-se um alto nível de pontuação, especificamente em março de 2020, quando a LATAM Airlines atingiu 2,7. Isso indica que, naquele momento, as companhias aéreas operavam com baixíssima eficiência, ou seja, produziam muito abaixo do seu potencial. A LATAM apresentou seu maior pico de desempenho de ineficiência em 2020, provavelmente devido à sua maior exposição ao mercado internacional, que foi mais afetado pela pandemia. A AZUL apresentou altos e baixos inferiores aos seus pares e uma recuperação mais

rápida, o que pode estar relacionado ao seu foco em voos regionais e domésticos. Os resultados da pontuação da GOL mostraram menor variação e maior estabilidade, sugerindo uma boa otimização de seus recursos.

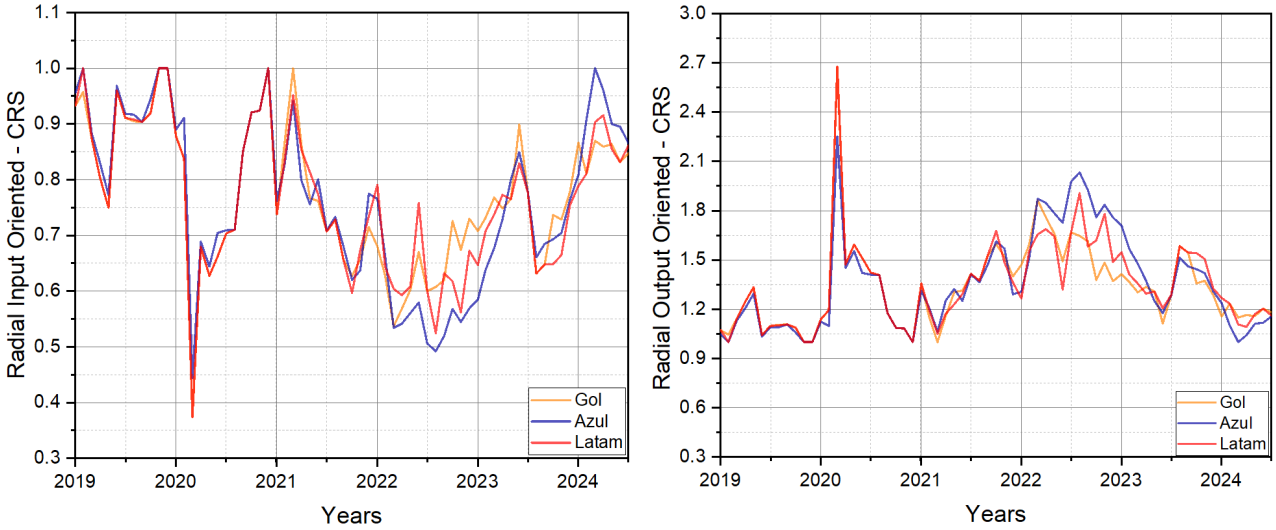


Figura 1: Modelos Radial Input e Output Oriented CCR.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen, B., & Wu, J. (2022). Predicting Model for Air Transport Demand under Uncertainties Based on Particle Filter. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(24). https://doi.org/10.3390/su142416694

Fernandes, V. A., Pacheco, R. R., Fernandes, E., & da Silva, W. R. (2019). Regional change in the hierarchy of Brazilian airports 2007–2016. *Journal of Transport Geography*, *79*(June), 102467. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102467

Fröhlich, K., & Niemeier, H. M. (2011). The importance of spatial economics for assessing airport competition. *Journal of Air Transport Management*, *17*(1), 44–48. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2010.10.010

Gillen, D., & Lall, A. (1997). Developing measures of airport productivity and performance: an application of data envelopment analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *33*(4), 261–273. https://doi.org/10.1016/S1366-5545(97)00028-8

Ripoll-Zarraga, A. E., & Lozano, S. (2020). A centralised DEA approach to resource reallocation in Spanish airports. *Annals of Operations Research*, *288*(2), 701–732. https://doi.org/10.1007/s10479-019-03271-6

DEBÊNTURES, GOVERNANÇA E CONCENTRAÇÃO NO SETOR FERROVIÁRIO: BARREIRAS ESTRUTURAIS AO FINANCIAMENTO DE LONGO PRAZO NO BRASIL

Francisco Gildemir F. Silva[1], Raphael Vieira dos Santos[2]
[1]Universidade Federal do Ceará – UFC/Universidade de Brasília – UnB, [2]Universidade de Brasília – UnB

RESUMO
Este relatório de dissertação em andamento analisa como a estrutura societária das concessionárias ferroviárias brasileiras influencia o financiamento de longo prazo pelo mercado de capitais, especialmente por debêntures incentivadas (Leis nº 12.431/2011 e nº 14.801/2024). Busca-se verificar se companhias de capital aberto e maior governança têm acesso mais favorável a instrumentos financeiros, enquanto concessionárias de capital fechado enfrentam restrições regulatórias, riscos informacionais e barreiras reputacionais. A metodologia combina revisão sistemática da literatura, análise normativa e modelagem econométrica em painel (2007–2024). Espera-se mapear fontes de financiamento, avaliar efeitos da regulação e da governança, identificar assimetrias de risco e discutir o papel dos critérios ESG na atratividade dos projetos ferroviários. Ao tensionar o discurso de democratização do crédito, a pesquisa oferece subsídios técnicos sobre limites e potencialidades do atual modelo regulatório.

Palavras-Chave: Concessões Ferroviárias; Estrutura Societária; Mercado de Capitais; Debêntures Incentivadas; financiamento de Infraestrutura

1. HIPÓTESES, LACUNAS E PROPÓSITOS: A ARQUITETURA DA PESQUISA

Este relatório descreve uma dissertação em desenvolvimento no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade de Brasília. A pesquisa investiga como a estrutura societária das concessionárias ferroviárias brasileiras e o grau de concentração do setor influenciam a capacidade de financiamento de longo prazo via mercado de capitais, em especial pelo uso das debêntures incentivadas previstas nas Leis nº 12.431/2011 e nº 14.801/2024 (Pereira & Miterhof, 2021; Véras de Freitas & Altoé Junior, 2024). Parte-se da hipótese de que as diferenças de governança e transparência entre companhias de capital aberto, submetidas a regras de divulgação e múltiplos investidores, e concessionárias de capital fechado, com menor fiscalização e maior opacidade informacional, afetam de forma decisiva a atratividade desses instrumentos junto a investidores institucionais e bancos multilaterais (Ragazzo & Gomes Cuesta, 2021; Rao, 2020). Considerando que as debêntures representam a principal inovação recente no financiamento da infraestrutura, a pesquisa busca iluminar seus limites e potencialidades em um ambiente de regulação restritiva, concentração setorial e crescente pressão por critérios ESG (Teixeira et al., 2023; Yamahaki & Breviglieri, 2022). O estudo combina revisão sistemática da literatura, análise documental normativa e modelagem econométrica de dados em painel de doze concessões federais entre 2007 e 2024, com foco no impacto da estrutura societária sobre indicadores de liquidez, endividamento e rentabilidade (Barros et al., 2020; Wooldridge et al., 2010). Pretende-se, assim, oferecer evidências que subsidiem o aprimoramento das políticas públicas de infraestrutura e contribuam para a superação das barreiras estruturais ao financiamento privado de longo prazo no setor ferroviário brasileiro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO E ESTADO DA ARTE

Frischtak et al. (2016) e Heinen (2023) indicam que o financiamento de infraestrutura no Brasil vem sendo progressivamente transferido ao mercado privado, em virtude de restrições fiscais e da necessidade de modernização logística. Nesse contexto, as debêntures incentivadas, instituídas pela Lei nº 12.431/2011 e recentemente aprimoradas pela Lei nº 14.801/2024, emergiram como instrumento central para atrair investidores institucionais por meio de incentivos fiscais e exigências adicionais de transparência e governança (Pereira & Miterhof, 2021; Ragazzo & Gomes Cuesta, 2021). No entanto, estudos apontam que a efetividade desses mecanismos depende da capacidade das concessionárias atenderem requisitos normativos e estruturarem projetos com alto grau de previsibilidade contratual (Yamahaki & Breviglieri, 2022). A literatura especializada enfatiza que a governança institucional e a estrutura societária das concessionárias exercem influência decisiva na percepção de risco dos investidores e na viabilidade de operações de crédito de longo prazo (Rao, 2020; Véras de Freitas & Altoé Junior, 2024). Concessionárias com capital aberto tendem a dispor de mecanismos mais consolidados de divulgação contábil, *compliance* regulatório e gestão de riscos, fatores que favorecem a emissão de títulos de dívida e a captação de recursos em bases sustentáveis (Murcia, 2024). Já concessionárias de capital fechado enfrentam maior opacidade informacional e menor fiscalização externa, o que amplia restrições reputacionais e agrava a concentração financeira em poucas operadoras (Ragazzo &

Gomes Cuesta, 2021). Paralelamente, cresce a relevância de critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) no financiamento ferroviário, alinhados à transição climática e às novas diretrizes internacionais de investimentos responsáveis (Santos & Araujo, 2025; Teixeira et al., 2023). Apesar desse avanço, estudos revelam que o marco regulatório brasileiro ainda carece de padronização de métricas ESG e de instrumentos que articulem metas ambientais às estratégias de financiamento (Caetano Roos et al., 2024). Essa lacuna amplia o risco de assimetrias informacionais e limita o potencial das debêntures incentivadas como instrumento de financiamento verde (Ge et al., 2025). No entanto, experiências internacionais demonstram que a adoção de práticas robustas de governança e divulgação ambiental pode ampliar significativamente a atratividade dos projetos ferroviários perante investidores globais (Čižiūnienė et al., 2024; Zou & Feng, 2024). No Brasil, contudo, o acesso a instrumentos financeiros alinhados a critérios climáticos e de sustentabilidade ainda permanece restrito às operadoras com maior capacidade institucional e inserção no mercado de capitais (Murcia, 2024). Esse quadro reforça a necessidade de aprofundar análises empíricas sobre o papel da estrutura societária e da governança na superação de barreiras ao financiamento ferroviário de longo prazo.

3. O DESENHO METODOLÓGICO

A pesquisa adota uma abordagem metodológica mista, combinando revisão sistemática da literatura, análise documental normativa e modelagem econométrica de dados em painel. A primeira etapa consiste na realização de uma revisão sistemática baseada no protocolo PRISMA (Page et al., 2021), aplicada a artigos, relatórios técnicos e documentos oficiais publicados entre 2011 e 2025. O objetivo é mapear o estado da arte sobre financiamento ferroviário via mercado de capitais, com ênfase em debêntures incentivadas, risco regulatório, estrutura societária e critérios ESG. Na sequência, desenvolve-se uma análise documental centrada na evolução normativa das debêntures incentivadas, abrangendo as Leis nº 12.431/2011 e nº 14.801/2024, regulamentações da CVM, resoluções da ANTT e acórdãos do TCU. Essa etapa visa identificar os requisitos legais, restrições operacionais e marcos regulatórios que moldam o ambiente de financiamento das concessões ferroviárias. A análise busca também evidenciar potenciais assimetrias no acesso ao mercado de capitais em função da configuração societária das operadoras. Por fim, a etapa empírica envolve a modelagem econométrica da relação entre estrutura societária e capacidade de financiamento de longo prazo das concessionárias federais entre 2007 e 2024. Serão estimados modelos de regressão múltipla (MQO) e dados em painel com efeitos fixos e aleatórios (Wooldridge et al., 2010), avaliados por testes de *Hausman* e *Breusch-Pagan* LM (Breusch & Pagan, 1979; Hausman et al., 1978). Sempre que aplicável, serão utilizados métodos de diferenças em diferenças e variáveis instrumentais para mitigar problemas de endogeneidade (Barros et al., 2020). As variáveis independentes incluirão indicadores de liquidez, endividamento e rentabilidade, enquanto as variáveis dependentes contemplarão a abertura de capital e a emissão de debêntures incentivadas. A implementação será realizada na linguagem R, com *scripts* em R *Markdown* para garantir reprodutibilidade analítica (de Lima et al., 2022).

4. RESULTADOS PRELIMINARES E PERSPECTIVAS

A revisão sistemática realizada entre 2011 e 2025 permitiu mapear 268 artigos distribuídos em quatro núcleos temáticos (financiamento via mercado de capitais, regulação e governança, análise de risco e critérios ESG no transporte ferroviário) e revelou que a literatura especializada ainda opera em uma zona de conforto marcada por abordagens normativas e descritivas. Apesar do discurso recorrente sobre modernização e transparência, são raros os estudos que colocam a estrutura societária sob escrutínio empírico e que quantificam de fato o impacto do capital aberto ou das debêntures incentivadas sobre o desempenho financeiro das concessionárias. Evidenciou-se, em particular, que empresas de capital aberto, por estarem sujeitas a múltiplos acionistas e a exigências formais de divulgação, oferecem maior transparência e fiscalização sobre a execução dos financiamentos, ao passo que companhias de capital fechado operam com opacidade informacional, limitando o monitoramento dos credores e ampliando riscos. Essa lacuna reforça a impressão de que parte do debate nacional permanece ancorada em premissas pouco testadas e em diagnósticos genéricos sobre atratividade de investimentos. Esses resultados preliminares não apenas validam a relevância da investigação proposta, como também lançam um desafio: trazer evidências concretas para um campo que frequentemente se contenta com retórica institucional e análises fragmentadas. Ao identificar a ausência de modelos quantitativos robustos que integrem riscos regulatórios, métricas ESG e estrutura societária, o estudo aponta para a necessidade urgente de avançar além das zonas cinzentas do discurso e testar empiricamente o que de fato diferencia empresas com acesso amplo ao mercado de capitais daquelas que permanecem confinadas à dependência estatal ou à baixa governança. É esse tensionamento (entre promessa normativa e prática efetiva) que orienta as próximas etapas

da pesquisa, centradas na modelagem econométrica e na comparação dos diferentes perfis de governança das concessionárias ferroviárias brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barros, L. A. B. C., Bergmann, D. R., Henrique Castro, F., & da Silveira, A. D. M. (2020). Endogeneidade em regressões com dados em painel: Um guia metodológico para pesquisa em finanças corporativas. *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, *22*(Special Issue), 437–461. https://doi.org/10.7819/RBGN.V22I0.4059

Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1979). A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrica*, *47*(5), 1287. https://doi.org/10.2307/1911963

Caetano Roos, E., Siqueira de Souza, J., & Kliemann Neto, F. J. (2024). Project risks and regulation in transport infrastructure: A study in Brazilian agencies concessions planning process. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *23*, 101031. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101031

Čižiūnienė, K., Matijošius, J., Sokolovskij, E., & Balevičiūtė, J. (2024). Assessment of Implementing Green Logistics Principles in Railway Transport: The Case of Lithuania. *Sustainability*, *16*(7), 2716. https://doi.org/10.3390/su16072716

de Lima, D. A., Helito, C. P., de Lima, L. L., Clazzer, R., Gonçalves, R. K., & de Camargo, O. P. (2022). How to perform a meta-analysis: a practical step-by-step guide using R software and RStudio. *Acta Ortopédica Brasileira*, *30*(3), e248775. https://doi.org/10.1590/1413-785220223003E248775

Ge, P., Tang, C., Chen, Y., Liu, Y., & Zhu, R. (2025). Green Bonds: Greenwashing or Genuinely Green? A Study Based on Stock Mispricing. *Managerial and Decision Economics*. https://doi.org/10.1002/mde.4534

Hausman, J., Hausman, & Jerry. (1978). Specification Tests in Econometrics. *Econometrica*, *46*(6), 1251–1271.

Murcia, F. D.-R. (2024). ESG Disclosure by Brazilian Public Companies. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(2), e07616. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-174

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, *372*. https://doi.org/10.1136/BMJ.N71

Pereira, T. R., & Miterhof, M. T. (2021). Uma nota sobre a eficiência fiscal das debêntures incentivadas em infraestrutura no Brasil. *Revista Brasileira de Economia*, *75*(2). https://doi.org/10.5935/0034-7140.20210008

Ragazzo, C. E. J., & Gomes Cuesta, K. S. (2021). Governança Regulatória para Incentivos Fiscais: Prevenção à Corrupção. *Direito Público*, *18*(98). https://doi.org/10.11117/rdp.v18i98.3970

Rao, V. (2020). An Empirical Analysis of Factors Responsible for the Use of Capital Market Instruments in Infrastructure Project Finance. *Asian Development Review*, *37*.

Santos, J. V., & Araujo, F. G. (2025). Infraestrutura de transporte sustentável: ferrovias como elemento de mitigação climática. *Revista Políticas Públicas & Cidades*, *14*(1), e1513. https://doi.org/10.23900/2359-1552v14n1-10-2025

Teixeira, F., Feijó, C., & Feil, F. (2023). Financiamento à infraestrutura no contexto da transição climática no Brasil e o potencial papel do BNDES. *Cadernos Do Desenvolvimento*, *18*(35), 106–140. https://doi.org/10.29327/2148384.18.35-3

Véras de Freitas, R., & Altoé Junior, J. E. (2024). Limites ao estabelecimento superveniente de bandas de demanda em contratos de concessão. *Revista de Direito Administrativo e Infraestrutura | RDAI*, *8*(31), 119–156. https://doi.org/10.48143/rdai.v8i31.633

Wooldridge, J., Wooldridge, & Jeffrey. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. *1*, 1064.

Yamahaki, C., & Breviglieri, G. V. (2022). Atração de investimentos privados para a infraestrutura no Brasil. *Revista de Administração Pública*, *56*(3), 413–425. https://doi.org/10.1590/0034-761220210403

Zou, W., & Feng, J. (2024). International Transportation Infrastructure and China Enterprises Green Innovation: Evidence from the China Railway Express. *Sustainability*, *16*(18), 8160. https://doi.org/10.3390/su16188160

Francisco Gildemir Ferreira da Silva (gildemir@ufc.br), Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Exatas (ICE), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Programa de Pós-Graduação em Transporte, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil. Universidade Federal do Ceará – UFC, Campus do Pici, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

Raphael Vieira dos Santos (raphael.vieira@infrasa.gov.br), INFRA S.A. Setor de Autarquia Sul (SAUS), Quadra 01, Bloco G, Lotes 3 e 5, Asa Sul, Brasília, DF, Brasil. Universidade de Brasília – UnB, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Exatas (ICE), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Programa de Pós-Graduação em Transporte, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil.

MITIGAÇÃO DOS IMPACTOS DE *RANSOMWARE* NO SETOR DE TRANSPORTES

Daniel Valério Leite[1,3], **Li Weigang**[1,2]
[1]Universidade de Brasília (UnB), Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT)
[2]Programa de Pós-Graduação em Informática (PPGI), Laboratório de Modelo Computacional e Inteligência Artificial para Transporte (TransLab/UnB)
[3]Universidade da Polícia Rodoviária Federal (UniPRF)

RESUMO
O setor de transportes é muito visado por cibercriminosos por ser uma área rentável. Empresas particulares e públicas de transportes têm seus dados criptografados por meio do principal ataque ao segmento, chamado *RansomWare* (RW), e a chave de descriptografia é fornecida mediante extorsão. O objetivo é avaliar e escolher um algoritmo de inteligência artificial (IA) eficiente na detecção de RW. O método se faz por meio do processamento de um *dataset* atual de ataques de RW para criar um modelo de detecção de IA robusto. O trabalho se concentra no setor de transportes devido à natureza específica da pesquisa. No entanto, o método de IA pode ser aplicado a outros setores que sofrem com *ransomware*. Os resultados mostraram que a detecção previa de RW possibilita a tomada de decisão rápida das autoridades e com isso evitar danos as instalações físicas, perdas de dados, perdas econômicas ou a indisponibilidade dos serviços.

1. PROBLEMAS E JUSTIFICATIVAS

A questão dos ciberataques é uma realidade crescente no setor de transportes, afetando tanto o Brasil quanto outras nações. Este artigo propõe uma técnica de Inteligência Artificial (IA) para identificar ataques do tipo *ransomware*, uma das formas de extorsão mais utilizadas por cibercriminosos. O *ransomware* é um malware que impede usuários ou entidades de acessarem seus arquivos, criptografando-os e exigindo um pagamento de resgate para a chave de descriptografia. Frequentemente, pagar o resgate se torna a opção mais simples e economicamente viável para restaurar o acesso aos documentos. O mercado de *ransomware* se profissionalizou, com a ascensão do modelo *Ransomware* como Serviço (RaaS), onde criadores de malware vendem ou alugam o código para que outros cibercriminosos executem ataques de extorsão (UNECE, 2023).

O impacto financeiro desses ataques é devastador. O Instituto Nacional de Combate ao Cibercrime (INCC) estima que os ciberataques podem ter diminuído em 18% o PIB do Brasil em 2024, resultando em perdas de cerca de R$ 2,3 trilhões e a eliminação de mais de 2,5 milhões de empregos (FecomercioSP, 2025). A relevância do tema para o setor de transportes é alarmante. Entre 2023 e 2024, o Brasil foi classificado como o quinto país mais afetado por *ransomware* (ver Figura 1). O setor de transportes, em particular, figura no top 10 dos segmentos mais atacados, respondendo por 35% dos ataques (ver Figura 2). Os prejuízos são substanciais: as empresas de transporte pagam, em média, quase US$ 2,5 milhões em resgate para ter seus dados descriptografados (SOPHOS, 2024), conforme ilustrado na Figura 3.

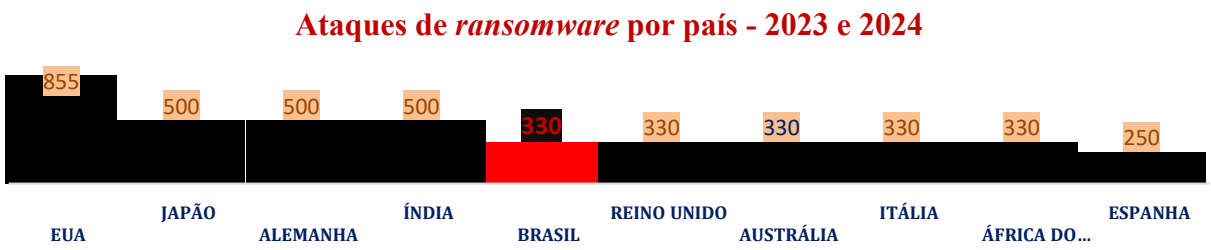


Figura 1: Quantidade de casos de *ransomware* por país

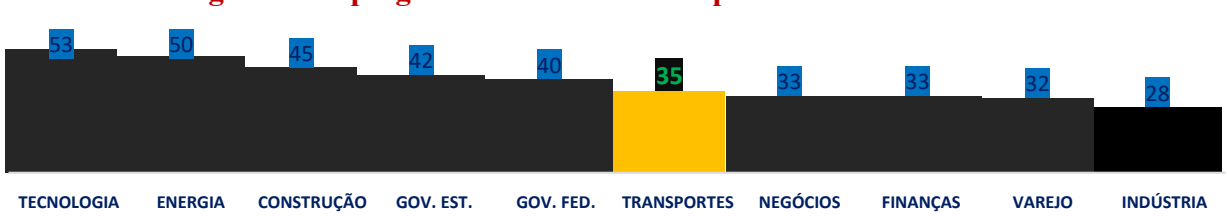


Figura 2: Quantidade de casos de *ransomware* por setor



Figura 3: Pagamentos de extorsão de *ransomware* por alguns setores

2. PROPOSTA DA PESQUISA

O *ransomware* se tornou uma ameaça global, causando a interrupção de serviços e até o fechamento de empresas no setor de transportes. No Brasil, o prejuízo estimado com ciberataques em 2024 foi de R$ 1,5 trilhão, com as empresas enfrentando uma média de 1.770 ataques por semana (Fiesp, 2024). Em 2017, a gigante de transportes Maersk sofreu um ataque de *ransomware* que interrompeu suas operações e gerou um custo de US$ 300 milhões. Diante desse cenário, este estudo propõe um método de Inteligência Artificial (IA) para detectar ataques de *ransomware*. A IA é uma ferramenta promissora para identificar atividades maliciosas e anomalias. Portanto, algoritmos de IA serão treinados e testados com um banco de dados contendo ataques de *ransomware* para avaliar qual deles apresenta a maior taxa de acerto na detecção. Além da acurácia, o trabalho também aborda um aspecto diferencial: o tempo de construção do modelo de IA. Esse fator é diretamente relacionado à velocidade de detecção dos ciberataques, um elemento crucial para a proteção eficaz de sistemas em tempo real.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

A literatura traz alguns artigos sobre detecção de *ransomware* usando a IA, conforme a tabela 1.

Tabela 1: Informações sobre a revisão bibliográficas acerca da IA e do RW

Autores	Entidades	Técnicas de IA	Ataque	*dataset*	Acurácia
Djenna et al., 2023	Symmetry**	Dynamic DL/Heuristic-based	RW	CICA and Mal 2017	99%
Sharma et al., 2021	Forensic Science International**	Gaussian Mixture + Variance Threshold	RW	RansomProber 2017	98.08%
Poudyal et al., 2020	IEEE*	Support Vector/Adaboost + J48	RW	VirusTotal2020	99.54%

(*) Q1 / (**) Q2 Scimago

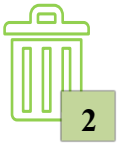
Djenna et al., 2023 usaram um *dataset* de 2017 com 4.354 malwares e 6.500 benignos, bem como não possui apenas *ransomwares*, mas também *adware,* SMS *malware, scareware*. Sharma et al., 2021 usaram um *dataset* de 2017 com 2076 *ransomwares* e 2000 benignos. Poudyal et al., 2020 usaram um *dataset* de 2020 com 550 *ransomwares* e 540 amostras normais.

4. MÉTODO

O método utilizado consiste na coleta de dados do *dataset UGransome* 2024, pré-processamento dos dados, métricas de avaliação para chegar nos resultados, conforme ilustrado pela figura 4.



Coleta dos dados: *dataset UGransome* 2024 com 15 tipos de *ransomwares*: *WannaCry* (em 2017, se espalhou em mais de 200 mil computadores em mais de 150 países fazendo vítimas como FedEx, Honda, Nissan), *SamSam* (em 2018, ficou famoso por atacar órgãos da cidade de Atlanta, o departamento de transporte do Colorado e o Porto de San Diego, nos EUA, paralisando serviços repentinamente causando um prejuízo estimado de 30 milhões de dólares), *Locky, TowerWeb, CryptXXX, Cryptohitman, CryptoLocker, NoobCrypt, DMALocker, Globe, CryptoLocker, Flyper, EDA2, JigSaw, APT e Razy* (Kaggle, 2024).



Limpeza dos dados: técnica *CfsSubsetEval* seleciona instâncias relevantes. Filtro *removeduplicates* eliminando registros duplos. Logo, *dataset* fica mais leve e evita o viés dos testes.



Randomizar os dados: técnica *randomize* em que embaralha as instâncias e garante melhores resultados.



Balancear dados: técnica *SpreadSubSample* – diminui a classe maior para equilibrar com as menores.



Carregar os dados e setar a IA: *Software IA WEKA* de mineração de dados.



Opções de teste: *Cross validation* com 5 kfold = realizará 4 treinos e 1 teste por 5 vezes.



Métricas de avaliação: Acurácia: aponta a acuracidade em % da IA. Tempo: velocidade em que o modelo de IA é construído em segundos.



Resultados das detecções: O *dataset* possui 3 classes, *Synthetic Signature* (SS), *Stands for Signature* (S), *Anomaly* (A), ligadas a famílias específicas de *ransomware*, a serem classificadas pela IA. Logo, foi avaliado taxas de assertividade: acurácia e tempo de construção do modelo.

Figura 4: Detalhamento dos passos aplicados ao método proposto

5.RESULTADOS

Os melhores resultados foram obtidos com o uso da técnica de balanceamento *SpreadSubSample*. O conjunto de dados utilizado neste estudo é significativamente mais robusto do que os empregados em outros trabalhos, como os mencionados na Tabela 1, cujos *datasets* variavam de pouco mais de mil a dez mil registros. Nosso *dataset*, por sua vez, foi atualizado em 2024 com 15 famílias de *ransomwares* e continha mais de 146.000 registros, reduzidos para 97.000 após o pré-processamento. A maior dimensão e complexidade do nosso *dataset* representam um desafio adicional para a classificação. No entanto, o algoritmo *FilteredClassifier* alcançou resultados notáveis. Conforme demonstrado na Tabela 2, o *FilteredClassifier* atingiu uma acurácia de 98,30% com um tempo de construção de modelo de apenas 0,44 segundos. Esses resultados ressaltam a capacidade do algoritmo em lidar com cenários complexos de forma eficiente.

Tabela 2: Resultados de Acurácia x Tempo

IA	Acurácia	Tempo
FilteredClasssifier	98.30%	0.44 segundos

Agradecimentos

Agradecer à Universidade da Polícia Rodoviária Federal (PRF) e ao CNPq/CAPES pelo apoio e colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Djenna, A. et al. (2023) Artificial intelligence-based malware detection, analysis, and mitigation. *Symmetry*, v. 15, n. 3, p. 677. https://doi.org/10.3390/sym15030677

FecomercioSP - Federação do Comércio de Bens, Serviços e Turismo do Estado de São Paulo (2025) A economia 'invisível' dos ataques cibernéticos e o custo da inércia. Disponível em: <https://www.fecomercio.com.br/noticia/a-economia-invisivel-dos-ataques-ciberneticos-e-o-custo-da-inercia> (acesso em: 23/06/2025).

Fiesp – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (2024) VI Congresso de Segurança Cibernética, Proteção de Dados e Governança de IA. Disponível em: <https://evento.fiesp.com.br/vicongressodesegurancacibernetica/>. (acesso em: 23/06/2025).

Kaggle (2024) UGRansome dataset. Disponível em: <https://www.kaggle.com/datasets/nkongolo/ugransome-dataset>. (acesso em: 23/06/2025).

Poudyal, S. et al. (2020) AI-powered ransomware detection framework. *In: 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). IEEE*. p. 1154-1161. DOI: 10.1109/SSCI47803.2020.9308387

Sharma, S. et al. (2021) RansomDroid: Forensic analysis and detection of Android Ransomware using unsupervised machine learning technique. *Forensic Science International: Digital Investigation*, v. 37, p. 301168. https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2021.301168

Senarak, C. (2024) Port cyberattacks from 2011 to 2023: a literature review and discussion of selected cases. *Maritime Economics & Logistics*, *26*(1), 105-130. https://doi.org/10.1057/s41278-023-00276-8

SOPHOS (2024) The State of Ransomware 2024. Disponível em: < https://news.sophos.com/en-us/2024/08/14/the-state-of-ransomware-in-state-and-local-government-2024/>. (acesso em: 23/06/2025).

UNECE - United Nations Economic Commission for Europe (2023) Cyber Resilience of Critical Energy Infrastructure. Available at: <https://unece.org/sites/default/files/2023-12/Pipeline_Cyberattack_case.study_.2023_rev.2_0.pdf>. (acesso em: 23/06/2025).

Weaver, G. et al. (2022) Estimating economic losses from cyber-attacks on shipping ports: An optimization-based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 137, p. 103423. https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103423

Daniel Valério Leite (dan.valerio@hotmail.com)
Li Weigang (weigang@unb.br)
Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Transportes, *Campus* Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, Brasil

UMA ANÁLISE COMPARATIVA DAS POLÍTICAS DE *PRICING* NOS PORTOS ORGANIZADOS BRASILEIROS

Pedro Luiz Neves Scucuglia, Francisco Gildemir Ferreira da Silva
Universidade de Brasília

RESUMO
O comércio internacional brasileiro apresentou um crescimento de mais de 400% entre 2000 e 2023, impulsionado, sobretudo, pelo excepcional desempenho da pauta exportadora (MDIC, 2024). Concentrando cerca de 90% da corrente de comércio do país, os portos representam ativos de infraestrutura fundamentais para a regular fluidez das mercadorias originárias ou destinadas ao mercado externo. Além disto, devemos ter em mente que as instalações portuárias desempenham um papel de relevo no contexto de diversas cadeias produtivas, representando elos essenciais para a logística de distribuição de diversas mercadorias no mercado doméstico, através da navegação interior e da cabotagem. Neste contexto, a discussão sobre custos logísticos mostra-se fundamental, sendo o custo portuário um de seus componentes. Assim, estudar os principais elementos do custo portuário tem se demonstrado relevante. Nesse sentido, esta dissertação busca compreender o ratio por trás da política de pricing das Autoridades Portuárias e a sua extensão sobre as decisões de negócios dos usuários correntes e potenciais dos portos.

1. PROPOSTA DE PESQUISA E SEU OBJETIVO GERAL

O Brasil é um país privilegiado em termos de vocação portuária, possuindo uma extensa linha costeira de mais de 8,5 mil quilômetros, incluídos os recortes litorâneos, e possui uma grande variedade de portos marítimos, fluviais e estuarinos (Alfredini, P., & Arasaki, E. 2014). OCDE (2022) indica que os portos podem ser definidos como locais "com instalações para os navios mercantes atracarem e carregarem ou descarregarem mercadorias ou passageiros de ou para embarcações marítimas", e são ativos fundamentais para o desenvolvimento econômico das nações, por facilitarem o comércio nacional e internacional em larga escala.

A movimentação portuária brasileira vem crescendo a taxas robustas ao longo da última década, perfazendo um CAGR de mais de 3,4% (ANTAQ, 2025). Sendo o Brasil um importante exportador de commodities, o bom desempenho dos portos é observado concomitantemente aos recordes de produção agropecuária. CONAB (2024) indica que a safra 24/25 representará um novo recorde, com projeção de produção de 322 milhões de toneladas de grãos (+8%). No contexto do setor industrial, estudos apontam para um fortalecimento do comércio internacional brasileiro no futuro. Fatores como o *nearshoring* poderão impactar sensivelmente a capacidade produtiva brasileira, de sorte a ampliar e diversificar suas exportações para produtos de maior valor agregado (FGV, 2021).

Para além dos fatores ligados ao comércio exterior, ressalta-se que o sistema portuário desempenha funções essenciais na qualidade de elo para diversas cadeias produtivas domésticas. A navegação por cabotagem, por exemplo, envolve o transporte de mercadorias de um porto marítimo ao outro, é amplamente utilizada no Brasil na indústria de óleo e gás – em 2020, mais de 75% da movimentação portuária das cargas de petróleo e seus derivados ocorrem por meio da cabotagem. A navegação interior, por sua vez, é aquela realizada em hidrovias interiores de percurso nacional ou internacional, sendo de relevo para o transporte de grãos agrícolas, bauxita, entre outras cargas, nas principais bacias hidrográficas do país (Antaq, 2021).

No tocante à participação dos portos dentro dos custos logísticos gerais, o IPEA (2011) constatou que a percepção dos usuários e especialistas é de que as tarifas praticadas são elevadas se comparadas aos principais concorrentes, prejudicando a competitividade dos produtos exportados. O Instituto constatou grande divergência de estruturas tarifárias entre os portos, dificultando a tomada de decisão pelos agentes envolvidos com o comércio exterior. Verificaram-se assimetrias entre as estruturas tarifárias dos portos analisados e variações de custos tarifários dentro de um mesmo segmento de cargas, superando a casa dos 100%.

O objetivo geral da pesquisa é efetuar uma análise comparativa das políticas de precificação dos portos organizados brasileiros, de sorte a identificar eventuais distorções e assimetrias entre operações semelhantes em instalações distintas, buscando compreender o racional utilizado pelas autoridades portuárias para o seu pricing. Ademais, buscaremos analisar como os custos em cada porto influenciam as decisões de negócio dos usuários.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Caracterização do sistema portuário brasileiro

O sistema portuário brasileiro é composto por 34 portos públicos (denominados "portos organizados", de acordo com as normas que regem o assunto), e por mais de duas centenas de portos privados ("instalações autorizadas"), constituindo uma complexa rede estrutural que cobre toda a faixa litorânea brasileira, de norte a sul. Nesta etapa do referencial teórico, situaremos a pesquisa em termos como está estruturado e quais são as principais características do sistema portuário, tanto do ponto de vista físico, bem como sob a perspectiva institucional. Mais especificamente, serão abordados os seguintes tópicos:

- Infraestrutura portuária brasileira: localização dos portos brasileiros e produção ao longo dos últimos anos.
- Arcabouço institucional: principais órgãos e seus respectivos papéis.

2.2. Modelos de governança dos portos

De acordo com Notteboom et al (2022), os portos são infraestruturas críticas para uma economia, contribuindo para a realização do comércio e do movimento de cargas. Nesse sentido, as questões relacionadas à governança portuária tornaram-se centrais nas agendas da política portuária. Acrescentam os autores que os governos revisitaram os objetivos dos portos e reformaram as estruturas e estratégias existentes para corresponder ao ambiente econômico contemporâneo. Ao mesmo tempo, a gestão, as operações e o desenvolvimento portuários são intensivos em capital, consomem terras escassas (públicas), geram externalidades (ruído, emissões) e envolvem muitos tomadores de decisão e partes interessadas, como a autoridade portuária, operadores de terminais, operadores ferroviários, empresas de transporte rodoviário, provedores de logística e cidades portuárias. Nessa etapa do referencial teórico, discutiremos os principais modelos de governança portuária, bem como as principais funções da autoridade portuária moderna, com foco na realidade do sistema brasileiro. Abordaremos os seguintes tópicos:

- Dinâmica de relacionamento entre a Autoridade Portuária e os usuários do porto (arrendatários, agentes, armadores e operadores portuários).
- Processo de reforma institucional, promovida pelos marcos regulatórios;
- Discussão sobre as tendências para a gestão portuária no Brasil: concessão de portos (ex: case CODESA/Porto de Vitória) e concessão de canais de acesso (ex: projetos Santos e Paranaguá).

2.3. Economia portuária e processo de formação de preços

Conforme Notteboom *et* al. (2022), há séculos os oceanos são utilizados para diversas atividades humanas, como a pesca, o transporte e o comércio. Com o avanço da globalização, o crescimento econômico e os avanços tecnológicos, a utilização dos oceanos com propósito econômico cresceu substancialmente, paralelamente ao desenvolvimento da indústria marítima. Os autores utilizam o termo "economia marítima" para caracterizar o vasto leque de atividades relacionadas à exploração de recursos marítimos ou com a utilização do oceano para fins comerciais e de transporte. À medida que adicionamos ao conceito o uso sustentável dos oceanos e o crescente papel das tecnologias da informação, passamos a ter em perspectiva a "economia azul". Como podem representar um investimento econômico substancial, espera-se que os portos forneçam valor suficiente para justificar esses investimentos, sendo percebidos como catalisadores econômicos para as regiões que atendem. Duas abordagens distintas podem ser seguidas ao avaliar a importância estratégica e econômica dos portos: a primeira consiste em medir a sua importância econômica através de parâmetros econômicos e financeiros distintos. A segunda abordagem é de natureza mais qualitativa e tenta avaliar a importância e o valor dos portos marítimos para o desenvolvimento econômico e o desempenho de seu mercado.

Assim, considerando sendo o porto um elo logístico fundamental para o comércio entre as nações, este não pode ser visto como um fim em si mesmo, premissa de planejamento usualmente aplicada ao transporte, de maneira geral. Nesse contexto, a precificação portuária pode não apenas ser um aspecto altamente controverso da economia portuária (Haralambides, 2002), mas também é complexa devido às diferentes estratégias de precificação e teorias por trás dela (Nguyen et al, 2016). Os portos devem assegurar que as suas instalações sejam utilizadas da forma mais eficaz sendo o principal objetivo da precificação contribuir para esse esforço (UNCTAD, 1995). Com efeito, a procura de serviços e instalações pelos usuários do porto será normalmente afetada pelo nível do benefício líquido que permanece nas suas mãos após a aplicação das taxas portuárias. Cada porto tem a capacidade de determinar esse benefício líquido a um nível que incentivará a utilização económica dos ativos portuários.

2.4. Competitividade portuária

Nesta etapa do referencial teórico, serão abordados os aspectos relacionados à competitividade portuária, relevantes para a compreensão do problema de pesquisa. De acordo com Nguyen et al (2016), a precificação desempenha um papel relevante na gestão portuária, enfatizando quatro elementos principais: 1) a precificação deve levar em consideração o nível de competição entre os portos, a competitividade do porto e seu papel estratégico em relação a outros portos na mesma região. 2) dada a dinâmica da competição de mercado, os preços devem ser fixados de maneira a atingir os objetivos corporativos, sejam eles voltados ao desenvolvimento comercial, econômico ou social. 3) A maioria dos portos exercem dois papéis conflitantes entre si: de um lado, são entidades privadas que buscam o lucro; de outro, são um ativo público, que possuem papel instrumental na promoção do comércio e do desenvolvimento econômico e social. 4) Dado o seu papel e seu poder de mercado, a fixação de preços é sujeita ao monitoramento e aprovação por parte das autoridades responsáveis. Portanto, neste tópico, o referencial teórico abordará para além da teoria tradicional de formação de preços portuários, com foco nos aspectos de concorrência e competitividade portuária.

3. MÉTODO

A pesquisa adotará uma abordagem mista, combinando métodos qualitativos e quantitativos para analisar as políticas de *pricing* nos portos organizados brasileiros. Serão examinados documentos regulatórios, tarifas portuárias e estatísticas de movimentação, além de realizadas entrevistas semiestruturadas com gestores, reguladores e usuários portuários. A análise quantitativa incluirá a comparação de tarifas entre portos e a mensuração do impacto dos custos sobre as decisões dos usuários. Por sua vez, a análise qualitativa utilizará técnicas de análise de conteúdo para compreender o racional por trás da precificação. A seleção dos casos considerará portos com diferentes estruturas de governança, permitindo uma avaliação ampla das distorções e impactos das políticas de *pricing* no setor portuário.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se obter uma visão compreensiva sobre as políticas de *pricing* adotadas pelas autoridades portuárias brasileiras, de tal sorte a identificar eventuais distorções e assimetrias entre os preços praticados para serviços portuários semelhantes no país. A partir disto, procuramos oferecer uma contribuição para a teoria construída até o momento, entendendo que a temática é pertinente, sobretudo naquilo que concerne às discussões sobre o denominado “Custo-Brasil”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfredini, P., & Arasaki, E. (2014). Engenharia portuária. Editora Blucher.

ANTAQ (2021). Anuário Estatístico. https://www.gov.br/antaq/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes-da-antaq/estatisticos-aquaviarios

CONAB (2024). Boletim da Safra de Grãos. https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-dasafra-de-graos.

FGV (2021). Fundação Getúlio Vargas. Análise das mudanças nas cadeias internacionais de produção e potenciais impactos para o Brasil. São Paulo. 99 p.

Haralambides, H. Competition, Excess Capacity, and the Pricing of Port Infrastructure. Marit Econ Logist 4, 323–347 (2002). https://doi.org/10.1057/palgrave.ijme.9100053

IPEA. Estrutura tarifária dos principais portos nacionais. Revista Desafios do Desenvolvimento. Ano 8. Edição 64 - 10/02/2011

NGUYEN, A. CHIN, J. TONGZONK, M. BANDARA, M. Analysis of strategic pricing in the port sector: The network approach Maritime Econ. Logist., 18 (2016), pp. 264-281

Notteboom, T., Athanasios, P., Rodrigue, J.P. Port Economics, Management and Policy. New York: Routledge, 690 pages / 218 illustrations. ISBN 9780367331559. doi.org/10.4324/9780429318184.

OECD (2022), Relatórios de Avaliação Concorrencial da OCDE: Brasil, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/283dc7c1-pt.

UNCTAD (1995). UNCTAD. Strategic Port Pricing. /SDD/PORT/2, UNCTAD, 1995, Geneva.

Pedro Luiz Neves Scucuglia (pedro.scucuglia@gmail.com)
Francisco Gildemir Ferreira da Silva (gildemir@gmail.com)
Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Programa de Pós-Graduação em Transportes
Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília-DF

Políticas Públicas de Transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DO PROCESSO DE CÁLCULO PARA O REPASSE DO PNATE

Ana Paula Ferreira da Silva[1], **Nicolly Castro de Jesus**[1], **Willer Luciano Carvalho**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este artigo traz uma análise comparativa dos modelos de repasse do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE), criado pela Lei nº 10.880/2004, para garantir o acesso à educação. Como resultado pode-se observar que o modelo original, centrado apenas no número de alunos transportados, ignorava desigualdades regionais e sociais. Já o novo modelo, mais sensível e abrangente, passou a considerar variáveis como área, transporte e desempenho educacional. Assim, o PNATE muda de rumo: transforma o transporte escolar em instrumento estratégico e essencial à concretização do direito à educação no Brasil.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com o artigo 208º da Constituição Federal (BRASIL, 1988), o Estado tem o dever de prover a educação, incluindo atendimentos em todas as etapas da educação básica, por meio de programas suplementares, como transporte, material didático escolar, assistência à saúde e alimentação. Assim, destaca-se o Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE), na sua primeira versão pela FAE, em 1993 (MOURA; CRUZ, 2013), e que, anos depois, foi consolidado pela Lei nº 10.880/2004 (BRASIL, 2004). Logo, a finalidade é realizar o financiamento do Transporte Escolar.

Ao longo da sua existência, a metodologia de repasse do PNATE passou por alterações para aprimorar as variáveis de repasse. O modelo original baseava-se em analisar o número de alunos transportados, conforme o Censo Escolar (BRASIL, 2004). Essa abordagem, mostrava-se insensível às vastas disparidades geográficas e socioeconômicas. O programa evoluiu para um novo modelo, que passou a incorporar um conjunto de variáveis mais complexas (CECATE-CENTRO OESTE, 2020).

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre o modelo de repasse original e o atual do PNATE. A pesquisa, fundamentada na abordagem de análise de políticas públicas de Souza (2006), examina as alterações metodológicas, as justificativas para sua implementação e os impactos dessas mudanças na promoção de uma distribuição de recursos mais justa e eficaz.

2. TRANSPORTE ESCOLAR NO BRASIL

O direito à educação é garantido pelo Estatuto da Criança e do Adolescente (BRASIL, 1990), embora ainda existam obstáculos à sua efetivação. A Lei nº 9.394 formalizou o transporte escolar como forma de promover o acesso igualitário ao ensino (BRASIL, 1996).

2.1. Aspectos Gerais do PNATE

O PNATE repassa verbas para manutenção da frota, enquanto o Programa Caminho da Escola é voltado à aquisição de veículos para regiões de difícil acesso, conforme a Lei nº 10.880/2004 (BRASIL, 2004). O apoio financeiro é monitorado por diferentes instâncias, como o FNDE, o INEP/MEC, o Ministério da Educação e os conselhos do FUNDEB. Cada órgão tem atribuições específicas, como cálculo, repasse, fiscalização e verificação da prestação de contas (BRASIL,2015).

2.2. Aspectos do Novo Modelo de Repasse

O Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar apresentou, ao longo de sua existência, diferentes metodologias para estabelecer o valor *per capta* para os municípios brasileiros. O modelo atual considera variáveis relacionadas com o princípio da equidade, igualdade e de meritocracia. (CECATE-CENTRO OESTE, 2020b).

3. METODOLOGIA

A metodologia do estudo baseia-se em Souza (2006), que entende a política pública como um processo com etapas de planejamento, execução e análise. A autora destaca a importância de considerar agentes, instrumentos, critérios de repasse e impactos sociais. Para avaliar a eficácia e equidade das políticas, defende o uso de dados técnicos, práticos e comparativos. Logo, no atual estudo, será abordado as seguintes etapas:

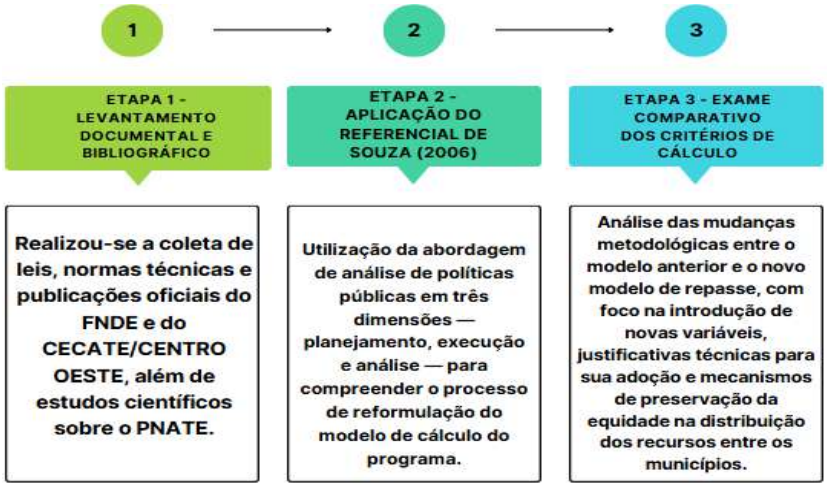


Figura 1: Etapas metodológicas. Fonte: autores (2025)

Essas etapas garantem uma análise fundamentada em fontes oficiais, orientada por teoria e sensível às transformações metodológicas que impactam a alocação de recursos para o transporte escolar no país.

4. ANTIGO MÉTODO DE REPASSE

Para melhorar os repasses do PNATE, o FNDE alterou, em 2006, o cálculo dos recursos, criando o Fator de Necessidade de Recursos do Município (FNR-M), que considerava demandas locais, aspectos socioeconômicos e geográficos (BRASIL, 2006).

O FNR-M considera como variáveis o percentual da população rural do município (informação extraída do IBGE), área do município (extraído do IBGE), o percentual da população abaixo da linha da pobreza (extraído do IPEADATA) e o Índice de Desenvolvimento da Educação Básica – Ideb (BRASIL, 2008). A partir do produto destas variáveis, ordenou-se os municípios em quatro faixas de necessidade: muito baixa, baixa, média e alta. A formulação do FNR-M é apresentada na equação 1, enquanto o enquadramento dos municípios nas faixas de necessidade considera os aspectos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Aspectos Enquadramento UF em 4 faixas. Fonte: BRASIL, 2006

Critério	Resumo
Distribuição por faixa	UFs distribuídas igualmente entre as 4 faixas
Agrupamento por FNR-UF	Faixas compostas por UFs com FNR-UF semelhantes
Diferença entre faixas	Valor entre faixas difere em 5%
Escalonamento interno	Valor per capita da faixa 2 é 2x o aumento da faixa 1; faixa 3 é 3x; faixa 4 é 4x

$$FNR\text{-}M=(Pop.Rural)/100\times Área/100\times(Pop.Linha\ da\ Pobreza)/100\times 1/Ideb \quad (1)$$

Em que: FNR-M = Fator de Necessidade de Recurso por Município, Pop.Rural = População rural do Município, Área = Área total do município, Pop. Linha de Pobreza = População abaixo da linha de pobreza no município, Ideb = Índice de Desenvolvimento da Educação Básica.

5. NOVO MÉTODO DE REPASSE

Os cálculos de distribuição de recursos se diferenciam entre o antigo modelo, baseado no Fator de Necessidade de Recursos do Município (FNR-M), que buscava uma distribuição homogênea (CECATE-CENTRO OESTE,

2020), e o modelo atual, que adota critérios meritocráticos e equitativos relacionados ao transporte escolar. O cálculo atual considera cinco variáveis: área total do município, número de alunos que utilizam transporte rodoviário, número de alunos que utilizam o transporte aquaviário, taxa de redução da distorção idade-série e do abandono escolar. (CECATE-CENTRO OESTE, 2020b).

Essas variáveis foram escolhidas após pesquisa que garantisse sua confiabilidade e adequação à realidade municipal. A área territorial influencia nos custos operacionais, enquanto o número de alunos transportados define a necessidade de veículos, sendo o transporte aquaviário mais custoso (CECATE- CENTRO OESTE 2020b). O mérito educacional busca estimular melhorias no desempenho municipal. A Tabela 2 apresenta as equações necessárias para determinar o valor final a ser distribuído.

Tabela 2: Cálculo de Repasse PNATE. Fonte; CECATE- Centro Oeste 2020

Nome do Cálculo	Fórmula (Equação)	Descrição das Variáveis
Valor per capita com base no montante total	$\left(\frac{RecursoDist}{\sum \left[\frac{NP_{(i)}}{MaxNP} \times TAl_{(i)}\right]}\right) \times \left(\frac{NP_{(i)}}{MaxNP}\right)$	PercaptaD(i): valor por aluno (distribuição) RecursoDist: total disponível INP(i): valor per capita base MaxNP: maior per capita TAl(i): alunos transportados
Valor total sem ajuste	$Total_{(i)} = NP_{(i)} \times TAl_{(i)}$	Total(i): total para o município NP(i): valor per capita base TAl(i): alunos transportados

Para a definição do índice de prioridade de cada município é utilizada a equação 2.

$$IP(i)=((A(i)-MA)/(\delta A))\times CFA+((Aq(i)-MAq)/(\delta Aq))\times CFAq+((R(i)-MR)/(\delta R))\times CFR+((D(i)-MD)/(\delta D))\times CFD+((Ab(i)-MAb)/(\delta Ab))\times CFAb \quad (2)$$

Em que IP(i) é o índice de prioridade de cada município, A(i) é a área de cada município, MA é a média das áreas de todos os municípios do país, δA é o desvio padrão das áreas dos municípios, CFA é a carga fatorial da variável área, Aq(i) é o número de alunos transportados no aquaviário, MAq é a média do número de alunos transportados no aquaviário, δAq é o desvio padrão dos alunos transportados no aquaviário, CFAq é a carga fatorial do número de alunos transportados no aquaviário, R(i) é o número de alunos transportados no rodoviário, MR é a média do número de alunos transportados no rodoviário, δR é o desvio padrão dos alunos transportados no rodoviário, CFR é a carga fatorial do número de alunos transportados no rodoviário, D(i) é distorção idade série do município, MD é a média da distorção idade série, δD é o desvio padrão da distorção idade série, CFD é a carga fatorial da distorção idade série, Ab(i) é a taxa de abandono do município, MAb é a média da taxa de abandono, δAb é o desvio padrão da taxa de abandono, CFAb é a carga fatorial da taxa de abandono.

6. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE REPASSE DO PNATE

A principal diferença entre os modelos está nas variáveis adotadas para a definição do índice de prioridade. Enquanto a metodologia antiga utilizava variáveis que não possuem conexão direta com os objetivos do PNATE ou a complexidade operacional do transporte escolar, a segunda metodologia buscou trazer variáveis que apresentam maior representatividade do fenômeno.

Assim, a primeira metodologia trouxe variáveis como o Ideb e o percentual da população abaixo da linha de pobreza. Não existe estudos que apontem a relação direta ou indireta dessas variáveis com o custo operacional do transporte escolar. Já na nova metodologia, além da área do município trouxe o total de alunos transportados por cada modo, além das variáveis meritocrática.

Entende-se que a área do município apresenta relação direta com a complexidade operacional do município,

uma vez que quanto maior a área, mais distâncias a serem percorridas, impactando nos custos e aumentando os desafios operacionais. Além disso, quanto mais alunos o município transporta, mais complexa também será sua operação e mais onerosa. Aliado a isso, a divisão em aquaviário e rodoviário apresenta coerência, uma vez que o transporte aquaviário traz ainda mais desafios que o rodoviário, dessa forma, municípios que transportam alunos nesse modo apresentam maior complexidade operacional e maiores custos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças nas diretrizes do PNATE indicam avanços na forma como o Estado distribui recursos para garantir o acesso à educação. O modelo anterior, embora funcional, não apresentava variáveis que tivessem ligação direta com a complexidade operacional, se distanciando dos objetivos reais do programa. Já a metodologia atual, buscou incorporar tais dificuldades operacionais, promovendo uma distribuição mais objetiva e mais próxima da realidade da operação do transporte escolar de cada município.

Tais aspectos apontam para uma melhoria no processo de distribuição de recursos, atendendo melhor às necessidades de cada município, no que ser refere à complexidade operacional do transporte escolar. A análise comparativa entre os modelos mostra que essa evolução fortalece a política do transporte e traz subsídios para o seu aprimoramento contínuo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos que direta ou indiretamente tenham colaborado para a Pesquisa, em especial ao FNDE (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação) pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. 292 p.

BRASIL (2006). Resolução/CD/FNDE nº 12, de 5 de abril de 2006. Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo – Brasília – DF, 2006.

BRASIL (2008). Resolução/CD/FNDE nº 10, de 7 de abril de 2008. Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo – Brasília – DF, 2008.

BRASIL (2015). Resolução/CD/FNDE nº 5, de 28 de maio de 2015. Estabelece critérios e procedimentos para a transferência automática de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – (PNATE). Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo – Brasília, DF, 2015. Disponível em: https://www.fnde.gov.br/index.php/acesso-a-informacao/institucional/legislacao/item/7266-resolução-n-5-de-28-de-maio-de-2015. Acesso em: 04 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1996.

BRASIL. Lei nº 10.880, de 9 de junho de 2004. Institui o auxílio-transporte para os alunos da educação básica da zona rural. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.880.htm. Acesso em: 28 maio 2025.

CECATE-CENTRO OESTE (2020). FUNDO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO – FNDE. Fórmula de Repasse PNATE – Volume 2. Brasília: FNDE, 2020.

CECATE-CENTRO OESTE (2020b). FUNDO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO – FNDE. Fórmula de Repasse PNATE – Volume 2. Brasília: FNDE, 2020.

MOURA, Ana Paula Monteiro de; CRUZ, Rosana Evangelista da. A política do transporte escolar no Brasil. In: ANPAE – Associação Nacional de Política e Administração da Educação. Anais do XXVI Simpósio Brasileiro. [S.l.]: ANPAE, 2013. Disponível em: https://anpae.org.br/simposio26/1comunicacoes/AnaPaulaMonteirodeMoura-ComunicacaoOral-int.pdf. Acesso em: 28 maio 2025.

Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). Brasília: FNDE. Disponível em: https://www.gov.br/fnde/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/pnate. Acesso em: 10 jun. 2025.

SOUZA, Celina. Políticas Públicas: uma revisão da literatura. Sociologias, Porto Alegre, ano 8, n. 16, p. 20-45, jul./dez. 2006.

Ana Paula Ferreira Silva (anaferreira2@discente.ufg.br), Nicolly Castro de Jesus (nicolly.castro@discente.ufg.br), Willer Luciano Carvalho (willer_carvalho@ufg.br)

Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes, Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio CEP: 74971-451, Aparecida de Goiânia - GO, Brasil.

ANÁLISE DA DINÂMICA DE DESLOCAMENTOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE COM BASE NA REGIC E DADOS SOCIECONÔMICOS

Ana Leticia Ramos Bezerra, Fernanda Catarina Ribeiro da Luz
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

RESUMO
Este artigo analisa os fluxos de deslocamentos intermunicipais na Região Metropolitana do Recife (RMR), utilizando dados da Pesquisa de Regiões de Influência das Cidades (REGIC) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O estudo considera os índices de atração e ligação entre municípios, além de dados socioeconômicos. Os resultados evidenciam Recife como principal destino para todas as variáveis analisadas, além de identificar pares origem-destino de maior intensidade, como Olinda–Recife. A análise mostrou que os padrões de deslocamento estão associados não apenas à hierarquia urbana, mas também à configuração econômica local em que municípios de perfil industrial funcionam como potenciais polos de descentralização. Evidenciou-se ainda a importância da infraestrutura de transporte na articulação dos deslocamentos pendulares. Os achados indicam a necessidade de políticas públicas voltadas à ampliação da conectividade metropolitana e ao fortalecimento da infraestrutura de transporte de alta capacidade.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Recife, por sua posição como capital do estado de Pernambuco, exerce um papel centralizador, atraindo grande parte dos deslocamentos intermunicipais da região. Os municípios ao seu redor apresentam dependência em relação à capital (IBGE, 2020a). Conforme Peres *et al.* (2018), a pesquisa REGIC, realizada pelo IBGE, é uma ferramenta central para compreender as dinâmicas de interação entre municípios, identificando fluxos de deslocamento e relações de atração e dependência econômica e social. Estudar a mobilidade urbana em regiões metropolitanas, como a Região Metropolitana do Recife (RMR), é importante para enfrentar os desafios relacionados à integração territorial, desigualdades no acesso a serviços e mobilidade metropolitana.

Cabendo ainda salientar que a literatura tem evidenciado a utilização da pesquisa REGIC como ferramenta de análise das dinâmicas urbanas em diversas regiões metropolitanas brasileiras. Santana, Silva e Oliveira (2021) analisaram a REGIC aplicada à Região Metropolitana de Londrina - PR, utilizando o Índice de Atração para avaliar a atratividade de cidades pequenas e locais em áreas como comércio e saúde. No estudo realizado por Maia *et al*. (2023), a REGIC é utilizada para evidenciar as articulações territoriais na Região Metropolitana de Natal. O conceito de rede permite delimitar a região em análise através da percepção das redes e seus fluxos desencadeados entre os municípios de destino e de origem das migrações pendulares. Silva e Queiroz (2023) utilizam a pesquisa para analisar as dinâmicas urbanas no Ceará. O artigo destaca que o comportamento dos fluxos (pessoas, comércio e serviços) está relacionado às dinâmicas territoriais e à hierarquia urbana definida pela REGIC. Os deslocamentos são destacados como um reflexo da redistribuição de oportunidades econômicas e educacionais, favorecendo a descentralização da concentração populacional antes limitada às regiões metropolitanas. Neto, Queiroz e Carvalho (2024) abordam a pesquisa REGIC ao discutir o movimento pendular e a influência de Campina Grande como núcleo central da Região Metropolitana. A partir de dados secundários do Censo 2010 constata que Campina Grande configura-se como o principal atrativo da dinâmica pendular da RMCG, atraindo cerca de 75% dos deslocamentos por motivos de trabalho e estudo e 70% por motivos de estudo.

No entanto, ainda há lacunas para explorar, como os índices de atração e ligação entre municípios, propostos pelo IBGE (2020a), que podem subsidiar análises de fluxos de deslocamentos em regiões metropolitanas. Sendo assim, a pergunta-condutora deste estudo é: Em que medida é possível entender os fluxos de deslocamentos na Região Metropolitana do Recife com base nos dados de atratividade e ligação entre os municípios da REGIC, e dados socioeconômicos do IBGE? O presente estudo tem como proposta analisar as cidades da RMR com maior atratividade para deslocamentos intermunicipais e, com base nos índices de atração e dados do IBGE, entender a demanda por deslocamentos necessária para interligar os municípios.

2. METODOLOGIA

Foram utilizados dados provenientes da REGIC elaborada pelo IBGE (2020a). O detalhamento metodológico da pesquisa é apresentado no documento Regiões de Influência das Cidades 2018: Nota Metodológica, disponibilizado pelo IBGE (2020b). A análise concentrou-se nos questionários de atração e de ligação dos municípios, que trazem variáveis como os percentuais estimados de participação dos destinos em aspectos

relacionados à aquisição de bens (vestuário, calçados, móveis e eletroeletrônicos), serviços de saúde (baixa, média e alta complexidade), ensino superior, atividades culturais e esportivas, além do uso de aeroportos e circulação de jornais. A Tabela 1 apresenta os dados dos questionários de atração e de ligação entre os municípios considerados neste estudo.

Tabela 1: Dados analisados no questionário de atração e ligação entre os municípios

Código	**Descrição das variáveis - Atração**
IA_Q1[1]	Como destino para moradores de outros municípios para compra de itens de calçados e vestuário
IA_Q2[1]	Como destino para moradores de outros municípios para compra de móveis e eletroeletrônicos
IA_Q3[1]	Como destino para moradores de outros municípios para serviços de saúde de baixa e média complexidades
IA_Q4[1]	Como destino para moradores de outros municípios para serviços de saúde de alta complexidade
IA_Q5[1]	Como destino para moradores de outros municípios para ensino superior
IA_Q6[1]	Como destino para moradores de outros municípios para atividades culturais
IA_Q7[1]	Como destino para moradores de outros municípios para atividades esportivas
IA_Q8[1]	Como destino para moradores de outros municípios para aeroporto
IA_Q10[1]	Do município de destino sobre os mais frequentes de transporte público coletivo
Código	**Descrição das variáveis - Ligação**
IA_Q1[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para compra de vestuário e calçados
IA_Q2[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para compra de móveis e eletroeletrônicos
IA_Q3[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para serviços de saúde de baixa e média complexidades
IA_Q4[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para serviços de saúde de alta complexidade
IA_Q5[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para ensino superior
IA_Q6[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para atividades culturais
IA_Q7[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para atividades esportivas
IA_Q8[1]	Do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para aeroporto
IA_Q10[1]	Do município de destino sobre os mais frequentes de transporte público coletivo partindo do município de origem

[1]Índice de atração

Araçoiaba e Ilha de Itamaracá não participaram do questionário de atração da REGIC. Quanto as cidades participantes do questionário de ligação, foram analisadas as ligações com os pares origem destino, com a origem sendo Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ipojuca, Ilha de Itamaracá, Itapissuma, Moreno, Olinda, Paulista e São Lourenço da Mata e destino Recife. Jaboatão dos Guararapes não foi considerado na pesquisa do questionário de ligação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta essa sintetização com a caracterização da cidade quanto a população, a hierarquização dos centros urbanos brasileiros e a região de influência em relação a vinculação imediata consolidada.

Tabela 2: Caracterização das cidades conforme a pesquisa REGIC e dados socioeconômicos do IBGE

Cidade	**População (IBGE, 2022)**	**PIB *per capita* (IBGE, 2021)**	**Setores econômicos predominantes (IBGE, 2021)**	**Hierarquia dos centros urbanos (IBGE, 2018)**
Recife	1.488.920	33.094,37	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Jaboatão dos Guararapes	644.037	22.680,83	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Olinda	349.976	14.700,91	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Paulista	342.167	16.596,43	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Cabo de Santo Agostinho	203.440	65.022,05	Serviços[3]/Indústria	Metrópole (1C) [2]
Camaragibe	147.771	13.940,29	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Igarassu	115.196	29.003,48	Serviços[3]/Indústria	Metrópole (1C) [2]
São Lourenço da Mata	111.249	12.568,1	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Abreu e Lima	98.462	17.123,06	Serviços[3]/Administração[4]	Metrópole (1C) [2]
Araçoiaba	19.243	7.732,35	Administração[4]/ Serviços[3]	Metrópole (1C) [2]
Ilha de Itamaracá	24.540	11.051,57	Administração[4]/ Serviços[3]	Metrópole (1C) [2]
Ipojuca	98.932	150.647,79	Indústria/ Serviços[3]	Metrópole (1C) [2]
Moreno	55.292	13.990,88	Administração[4]/ Serviços[3]	Metrópole (1C) [2]
Itapissuma	27.749	87.814,64	Indústria/ Serviços[3]	Metrópole (1C) [2]

[2]Município integrante do Arranjo Populacional do Recife/PE

[3]Serviços - Exclusive Administração, defesa, educação e saúde públicas e seguridade social

[4]Administração, defesa, educação e saúde públicas e seguridade social

A análise dos deslocamentos intermunicipais na RMR não pode ser dissociada da infraestrutura de transporte

público existente. O Sistema Estrutural Integrado (SEI) constitui a espinha dorsal do transporte público na RMR, articulando ônibus e metrô por meio de terminais de integração. Organizado em linhas alimentadoras, troncais, perimetrais, interteminais e circulares permite deslocamentos intermodais com tarifa única, favorecendo o transporte de massa e a conexão entre municípios (GRANDE RECIFE CONSÓRCIO DE TRANSPORTE, 2025). A Figura 1 apresenta a configuração da RMR e a área de abrangência do SEI.

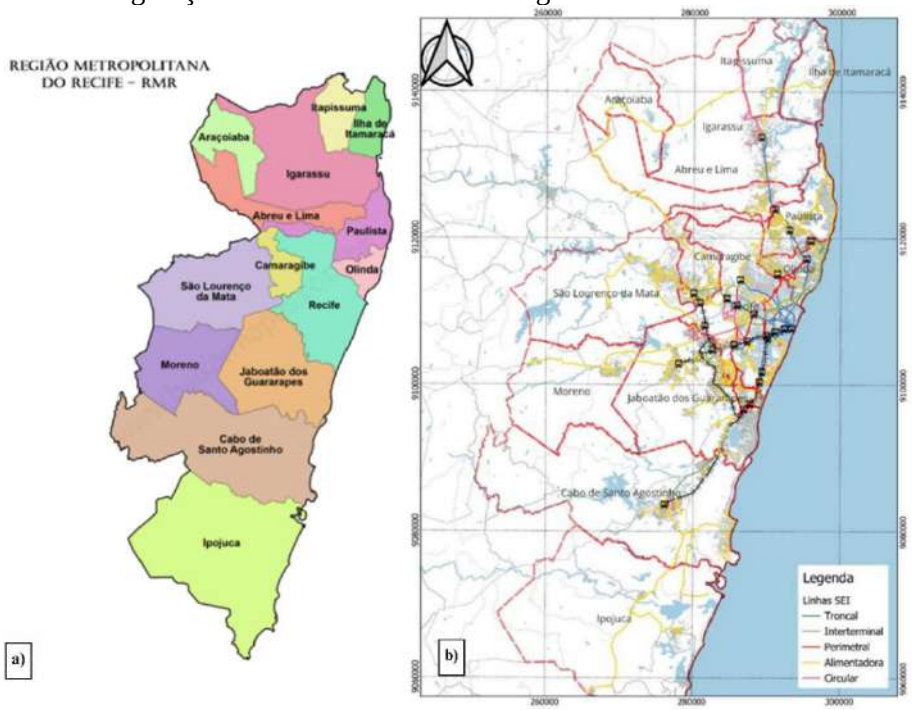


Figura 1: (a) Região Metropolitana do Recife (b) Área de abrangência do SEI
Fonte: Adaptado de Cardozo (2025)

3.1 Dados do questionário de atração dos municípios

A Tabela 3 ilustra a relação entre os Índices de Atração para as variáveis Q1 a Q10 em cada município. A análise permite identificar padrões de centralidade entre os municípios, destacando aqueles que concentram maior influência para motivação de deslocamentos.

Tabela 3: Relação entre o IA Q1 ao IA Q10 de cada município – Escala de cor em relação a cada índice (por coluna)

Município	IA Q1	IA Q2	IA Q3	IA Q4	IA Q5	IA Q6	IA Q7	IA Q8	IA Q10
Recife	1.739.624	2.151.226	1.901.380	5.106.135	2.294.139	2.084.167	3.770.236	6.108.431	200.047
Jaboatão dos Guararapes	117.348	133.069	61.773	21.226	85.593	85.726	49.398	0	4.436
Olinda	62.374	85.526	199.319	85.793	113.588	245.542	27.426	0	0
Paulista	0	0	0	0	0	817	1.310	0	7.353
Cabo de Santo Agostinho	72.838	93.997	101.312	45.986	19.820	101.055	24.603	0	62.665
Camaragibe	52.771	54.121	33.709	0	677	0	14.982	0	37.959
Igarassu	6.999	6.833	13.083	0	68.702	42.813	6.815	0	46.129
São Lourenço da Mata	20.688	31.884	36.744	1.869	0	10.449	250.364	0	39.809
Abreu e Lima	65.798	73.100	40.514	7.709	0	20.311	0	0	0
Ipojuca	0	1.512	38.327	0	15.415	17.870	4.927	0	16.950
Moreno	0	0	0	255	0	0	1.519	0	45.862
Itapissuma	431	0	0	0	0	4.371	2.031	0	0

Fonte: Adaptado de IBGE (2020a).

O municípios de maior destaque é Recife, apresentando os valores mais altos de IA do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para diversas finalidades. Os índices mais altos referem-se a saúde de alta complexidade (IA Q4) e ao aeroporto (IA Q8), neste último caso, evidenciado por Recife ser o único munícipio a dispor de terminal aeroportuário na RMR. A configuração econômica apresentada na Tabela 2 revela padrões que ajudam a compreender os fluxos de deslocamento na região e sua conexão com os dados de IA (Tabela 3). A maioria dos municípios apresenta predominância do setor de serviços, frequentemente, associado à administração pública. Esse perfil é observado em cidades como Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Camaragibe, São Lourenço da Mata e Abreu e Lima, que, embora

concentrem grande parte da população da RMR, possuem economias voltadas majoritariamente para atividades voltadas a serviços e funções administrativas. Destacando Recife como o principal polo de atração de deslocamentos para trabalho e acesso a serviços especializados. Por outro lado, há municípios com perfil econômico mais voltado à administração pública, mas com menor dinamismo produtivo e baixo PIB per capita, como Araçoiaba, Ilha de Itamaracá e Moreno. Esses territórios, com menor densidade populacional e estrutura econômica, dependem fortemente da articulação com os centros urbanos maiores para suprir demandas por emprego, educação e saúde.

Em contraste, municípios como Cabo de Santo Agostinho, Igarassu, Ipojuca e Itapissuma apresentam perfil industrial mais acentuado, com PIB per capita expressivamente superior à média regional. Esses municípios funcionam como polos produtivos, capazes de atrair deslocamentos internos e externos, e representam potenciais vetores de descentralização econômica e territorial. A presença de atividades industriais nesses territórios pode contribuir para a redistribuição dos fluxos de mobilidade, desde que acompanhada por investimentos em infraestrutura e políticas de integração regional. Esse agrupamento evidencia que os padrões de deslocamento na RMR estão fortemente condicionados pela estrutura econômica dos municípios. A centralidade de Recife não se sustenta apenas pela hierarquia urbana, mas também pela concentração de atividades econômicas e serviços de maior complexidade. A análise crítica desses perfis permite vislumbrar cenários de reorganização territorial, com potencial para reduzir a sobrecarga sobre o polo central e promover maior equilíbrio na mobilidade metropolitana.

3.2 Dados do questionário de ligação entre os municípios

Para a estruturação dos resultados, foram considerados indicadores como o percentual estimado de participação dos destinos no total de deslocamentos e os índices de atração exercidos pelos municípios, conforme apresentado na Figura 2.

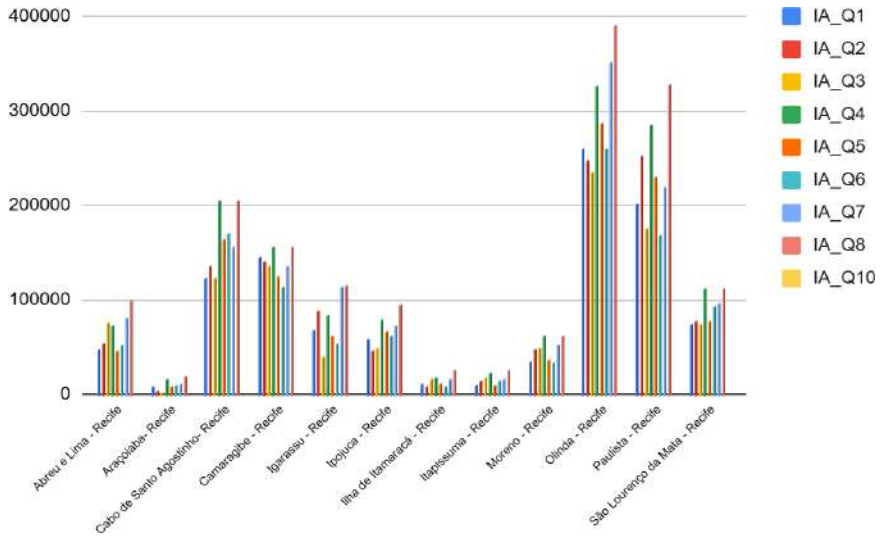


Figura 2: Relação entre origem/destino e os índices de atração do destino sobre o total de deslocamentos dos moradores do município de origem para as finalidades analisadas
Fonte: Adaptado de IBGE (2020a).

Esses dados podem ser entendidos ao visualizar a Figura 1 que apresenta a abragência do sistema que integra o transporte público da RMR, havendo terminais de integração nos munícipios que compõem os pares origem-destino com maior ligação conforme apresenta a Figura 2: Olinda - Recife, Paulista - Recife, Cabo de Santo Agostinho - Recife e Camaragibe – Recife, as quais são conectados pelo SEI. A elevada intensidade dos fluxos provenientes dos municípios periféricos reforça a necessidade de sistemas de transporte de alta capacidade, como corredores exclusivos e soluções de integração modal. A REGIC oferece dados que podem ser usados para identificar prioridades de investimento em mobilidade urbana. Municípios com alto IA devem ser considerados como nós estratégicos na rede de transporte metropolitano. A descentralização de serviços pode reduzir os deslocamentos pendulares e promover equidade territorial. Assim, é possível fundamentar a necessidade de políticas públicas que promovam maior equilíbrio territorial, incentivem a redistribuição funcional de serviços e fortaleçam a conectividade regional por meio de sistemas de transporte integrados.

4. CONCLUSÕES

Este artigo analisou os fluxos de deslocamento na RMR com base nos índices de atração e ligação da pesquisa REGIC, articulados a dados socioeconômicos do IBGE, evidenciando a demanda por deslocamentos necessária para interligar os municípios. Os dados analisados revelam padrões de deslocamento concentrados, sustentados por fatores como hierarquia urbana, especialização dos serviços e configuração econômica local. Esses elementos permitem refletir sobre a forma como a infraestrutura urbana metropolitana está integrada e hierarquizada, evidenciando desigualdades no acesso aos serviços e na distribuição das oportunidades territoriais. Tal compreensão contribui diretamente para o planejamento de um sistema de transporte metropolitano mais equitativo e funcional, orientado pela identificação dos principais eixos de demanda. Nesse contexto, a análise revelou que a centralidade de Recife é reforçada pela oferta de serviços de alta complexidade e pela infraestrutura de transporte público, articulada por meio do SEI, que viabiliza os deslocamentos pendulares entre os principais polos da RMR. Assim, este trabalho contribui para que pesquisadores e gestores públicos aprofundem as discussões sobre dinâmica de deslocamentos em regiões metropolitanas, indicando a necessidade de políticas públicas voltadas à redistribuição funcional de serviços, à ampliação da conectividade regional e ao fortalecimento da infraestrutura de transporte de alta capacidade. Recomenda-se, para aprofundamentos futuros, a integração dos dados da REGIC com dados de outras pesquisas, visando à modelagem dos padrões pendulares e à avaliação da eficácia das redes de transporte na promoção da equidade territorial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Bezerra Neto, W. S., Queiroz, S. N., & Carvalho, R. M. (2024). Pendularidade na Região Metropolitana de Campina Grande (RMCG). Colóquio - Revista do Desenvolvimento Regional, 21(3), 3–26.

Cardozo, R. J. M. Fatores que influenciam o uso do transporte público na Região Metropolitana do Recife: uma análise por modelagem de equações estruturais. 2025. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2025.

GRANDE RECIFE CONSÓRCIO DE TRANSPORTE. *Sistema Estrutural Integrado (SEI)*. Disponível em: https://www.granderecife.pe.gov.br/transporte/sistema-estrutural-integrado/. Acesso em: 12 set. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (2022). Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produto Interno Bruto dos Municípios**.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível EM: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?t=pib-por-municipio&c=2607901

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Regiões de Influência das Cidades 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2020a. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101728.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Regiões de Influência das Cidades 2018: Nota Metodológica. Rio de Janeiro: IBGE, 2020b. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101729.

Maia, C. M.; Medeiros, S. R. F. Q.; Barbosa, J. R. A.; Silva, A. A. (2023) Região Metropolitana de Natal/RN: reconfiguração da rede urbana, cidades de pequeno porte e as articulações territoriais no espaço metropolitano. *Informe Gepec*, v. 27, n. 2, p. 71–92.

Peres, J. L. P.; Adriano, H. S. R.; Serafim, A. P. A. C. C.; Olalquiaga, A. A. (2018) O Estatuto da Metrópole e as regiões metropolitanas: uma análise teórico-conceitual à luz do conceito miltoniano de território usado. *Cadernos Metrópole*, v. 20, n. 41, p. 267–288.

Santana, T. H. A.; Martins da Silva, M. O.; Oliveira, E. L. (2021) Cidades de pequeno porte: uma proposta conceitual e comparativa da região metropolitana de Londrina/PR a partir das Regiões de Influência das Cidades. *Geomae*, Campo Mourão, v. especial Sinapeq, p. 418–433.

Silva, W. R.; Queiroz, S. N. (2023) Dinâmicas urbanas na configuração das cidades cearenses: análise com base no REGIC 2018. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v. 12, n. 3, p. 883.

Ana Leticia Ramos Bezerra (ana.ramosb@ufpe.br)
Fernanda Catarina Ribeiro da Luz (fernanda.rluz@ufpe.br)

ANÁLISE DA REDUÇÃO DA ACIDENTALIDADE NAS RODOVIAS FEDERAIS BRASILEIRAS USANDO SÉRIES TEMPORAIS INTERROMPIDAS

Tálisson Lins Rocha[1], Victor Hugo Barroso Barbosa[1], Viviane Adriano Falcão[1], Izabelle Marie Trindade Bezerra[2], Amanda dos Santos Gomes[2]

[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo investigar o impacto das mudanças na legislação de trânsito sobre a redução da ocorrência de acidentes em rodovias federais brasileiras entre 2007 e 2020, utilizando Séries Temporais Interrompidas. Foram aplicados métodos estatísticos, paramétricos e não paramétricos, a dados fornecidos pela Polícia Rodoviária Federal (PRF). Os resultados revelaram uma subnotificação significativa dos sinistros. Observou-se também tendência de crescimento quinzenal para todos os acidentes no período estudado, com estagnação dos acidentes graves após 2015. Há indícios de que a desativação de radares móveis contribuiu para um aumento de aproximadamente 7,78% em todos os acidentes e 4,20% nos acidentes graves em 2019. Esses resultados evidenciam que os acidentes leves e graves respondem de forma diferente às mudanças na legislação e que alterações nos valores das multas mostraram-se mais efetivas para reduzir os acidentes leves, enquanto a Lei Seca teve impacto mais significativo nos acidentes graves.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os acidentes rodoviários representam um problema social e econômico significativo no Brasil. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2021), o custo anual gira em torno de 10 bilhões de reais. Entre 2007 e 2020, a PRF registrou mais de 2 milhões de acidentes nas rodovias federais brasileiras, com mais de 40% envolvendo vítimas com lesões corporais. A ocorrência desses acidentes decorre da interação de vários fatores, como falhas humanas, condições das vias, estado dos veículos e fatores climáticos. Para mitigar seus efeitos, foram desenvolvidas normas de segurança, mudanças na geometria viária, regulamentação de velocidade e introdução de dispositivos obrigatórios nos veículos.

Compreender as causas dos acidentes rodoviários é essencial para orientar estratégias eficazes de prevenção. Essa compreensão permite direcionar políticas públicas, como campanhas educativas, melhorias na infraestrutura e fiscalização rigorosa, visando reduzir os impactos sociais e econômicos. Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo, por meio de Séries Temporais Interrompidas, analisar o impacto das mudanças na legislação de trânsito e na forma de contabilização dos acidentes sobre a redução de sua ocorrência em rodovias federais brasileiras, no período de 2007 a 2020. Com isso, espera-se contribuir para a área de estudo fornecendo informações relevantes para a tomada de decisão em relação às intervenções nas rodovias federais brasileiras e para a redução da ocorrência de acidentes ou mesmo minimização dos danos causados.

As próximas seções deste trabalho estão divididas da seguinte forma: na seção 2, apresenta-se o referencial teórico e a revisão de literatura pertinente ao tema; na seção 3, apresenta-se a metodologia; na seção 4, apresentam-se os resultados acompanhados de discussão; e na seção 5, apresentam-se as conclusões da pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Martins (2011), a evolução dos estudos sobre as causas dos acidentes passou por etapas: em um primeiro momento, os acidentes foram teorizados e suas possíveis causas passaram de aleatórias para o produto de um desalinho nas interações entre os componentes do sistema. Em etapa posterior, foi iniciado o estudo de soluções para as ocorrências ou mitigação dos danos (Elvik *et al*., 2009). Essas soluções concentraram-se principalmente intervenções na geometria viária, de velocidade de operação e na fiscalização das vias.

Entretanto, além dessas variáveis, fatores humanos, condições da via, condições climáticas e comportamentos de trânsito inadequados também são fatores decisivos para a ocorrência de acidente. Diante disso, é importante pesquisar as mudanças legais e a contabilização de acidentes, para que assim seja possível verificar, a partir dos resultados encontrados, quais e como afetam a quantidade e gravidade dos acidentes.

Em um contexto de avaliação de políticas públicas, as Séries Temporais Interrompidas (STI) são frequentemente utilizadas para investigar o efeito causal de uma intervenção específica em uma variável de

interesse ao longo do tempo. Essa abordagem permite comparar o comportamento da variável antes e depois da interrupção e avaliar se há uma mudança significativa e atribuível a essa intervenção. Segundo os professores da Escola Médica de Harvard, Wagner *et al*. (2002), o método de STI é a mais forte abordagem quase experimental para avaliar efeitos longitudinais das intervenções ao longo do tempo. Exemplos relevantes nesse contexto são os trabalhos de Antunes e Cardoso (2015) e Amat e Rodrigues (2021).

As mudanças observadas em STI podem ser classificadas em dois tipos principais: mudanças de nível e mudanças de tendência. A mudança de nível refere-se a uma redução brusca e significativa em um determinado ponto no tempo. Essa redução pode ser causada por eventos ou intervenções abruptas, como a instalação de um radar em uma determinada localidade para controle de velocidade. Por outro lado, a mudança de tendência refere-se a uma alteração gradual na inclinação da regressão ao longo do tempo. Essa mudança indica uma redução no coeficiente linear da regressão, sugerindo uma tendência de queda ou aumento mais suave na variável de interesse. Um exemplo desse tipo de mudança seria a substituição gradual dos freios convencionais por freios com sistema ABS em veículos automotivos.

No campo específico dos transportes, o estudo de séries temporais é amplamente utilizado em diversos países: alguns trabalhos buscaram definir modelos de previsão de acidentes como Sobreira e Cunto (2014); outros investigaram a relação do consumo de álcool e os efeitos da chamada "Lei Seca" com a mortalidade no trânsito (Ramsted, 2008; Nistal-Nuño, 2017; Abreu *et al*., 2018); Andrade e Antunes (2019) analisaram os efeitos do policiamento e de ações de educação de trânsito sobre os acidentes; Feng *et al.* (2020) complementaram modelando variáveis como condições climáticas e feriados para identificar padrões, destacando que os acidentes são influenciados especialmente por feriados e condições climáticas e concluindo que um aumento de 1% no tempo de patrulhamento resulta em uma redução de 0,15% na frequência de acidentes; Bonander *et al*. (2015) adicionaram à linha de pesquisa a formação dos condutores, concluindo que há redução de acidentes com lesões a partir de uma intervenção que tornara mais restritivo o processo de obtenção da carteira de habilitação.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida conforme as seguintes etapas: revisão de literatura; coleta de dados; análise dos dados e interpretação dos resultados. Foram investigadas as mudanças ocorridas na legislação relacionadas à segurança rodoviária e suas ferramentas (fiscalização e punição) e na forma como os acidentes são registrados pela PRF no período de 2007 a 2020, com o propósito de identificar possíveis impactos e tendências. Foi utilizado o *Big Data* da PRF referente a acidentes nas rodovias federais brasileiras, ao qual foram aplicados métodos estatísticos: STI, utilizada como abordagem estatística principal, e, paralelamente, testes não paramétricos para testar a validade dos resultados (Pettitt e Kruskal-Wallis) e para escolher os melhores modelos (Teste R, *deviance* do R^2 e envelope de Half Normal Plot).

A partir da análise do referencial teórico, foram definidas as variáveis para o estudo. Os acidentes foram divididos em 3 categorias ("*Todos os acidentes*", "*Acidentes leves*" e "*Acidentes graves*"). Foram testados modelos considerando combinações de diferentes variáveis, famílias estatísticas (Poisson, Binomial Negativa e Quase-Poisson) e funções de ligações (Log, Identidade e Raiz), o que gerou ao final um total de mais de 700 modelos de regressões, utilizando Séries Temporais Interrompidas e Modelos Lineares Generalizados.

Em virtude da grande quantidade de dados (conjunto de mais de 2 milhões de acidentes, totalizando um *Data Frame* com mais de 60 milhões de células, distribuídas em 14 arquivos *.csv*), classificou-se o estudo como um caso de *Big Data*, o que inviabilizava o seu manuseio e modelagem por meio de planilhas eletrônicas convencionais. Diante dessa limitação, optou-se por utilizar o *software* R. Foi necessária a utilização de programação Phyton para tratar os dados. Após a limpeza dos dados, procedeu-se à contabilização e modelagem dos acidentes válidos, dividindo-os em períodos quinzenais.

Após a definição do primeiro *Data Frame*, deu-se início ao processo de investigação das variáveis a serem testadas no modelo de regressão. Para isso, foi realizada revisão de literatura abrangente e pesquisa documental nos principais jornais do país, a fim de identificar uma sequência de fatores que poderiam influenciar o número de acidentes nas rodovias federais brasileiras, por meio de *strings* como "*Lei de mudança nos valores das multas*", "*Lei seca e suas modificações*" e "*Lei de mudanças nas penalidades no trânsito*", atentando-se às

data de aprovação e data em vigor das legislações.

Foram identificadas, então, mudanças na legislação relacionadas ao consumo de bebidas alcoólicas no Brasil (Nistal-Nuño, 2017) e a infrações de trânsito (Feng *et al*., 2020). A partir do gráfico da série temporal dos acidentes, observou-se a possibilidade de sazonalidade nos dados e a presença de um possível ponto de inflexão no comportamento dos acidentes, o que levou à inclusão de variáveis relacionadas à sazonalidade e ao tempo ao quadrado no estudo. Esses fatores foram considerados importantes para analisar a influência das leis de trânsito no número de acidentes.

Propôs-se, então, considerar as seguintes covariáveis no estudo: (a) sazonalidade com harmônicos; (b) sazonalidade em blocos; (c) tempo; (d) tempo ao quadrado; (e) subnotificação das ocorrências de acidentes a partir de 2015 em decorrência da implementação pela PRF da Declaração de Acidente de Trânsito (DAT); (f) implementação da Lei Seca em 2008; (g) alteração da Lei Seca em 2012; (h) alteração da Lei Seca em 2018; (i) aumento nos valores das multas ou penalidades em 2014; (j) aumento nos valores das multas ou penalidades em 2016; e (k) utilização de radares móveis pela PRF. Destaca-se que apenas as variáveis *a*, *b*, *c* e *d* não são binárias.

Nessa esteira, foi realizada a análise exploratória dos dados, a qual envolveu a criação de gráficos para compreender o comportamento da série temporal e obter as primeiras inferências. Primeiramente, foi aplicado o teste de Pettitt para identificar mudanças significativas e determinar a inclusão de variáveis explicativas adicionais no modelo de regressão. Com base nessas análises, foram realizados ajustes nas variáveis e apresentadas mudanças de tendência que não puderam ser explicadas pela análise realizada, juntamente com seus índices de significância. Depois, foi realizado o teste de sazonalidade com duas metodologias, de Kruskall-Wallis e Friedman, a fim de definir se a sazonalidade seria uma medida estatística efetiva a ponto de mantê-la ou rejeitá-la. Os acidentes foram divididos em três categorias, conforme já mencionado, e foram modeladas 4 séries derivadas para cada categoria: modelo 1 (de janeiro/2007 a junho/2015 - pré-intervenção da DAT); modelo 2 (julho/2015 a janeiro/2020 - pós-intervenção da DAT); modelo 3 (toda a série com a aplicação da intervenção de 2015 - com a aplicação da STI sobre a intervenção da DAT); modelo 3T (modelo de controle - modelo 3 desconsiderando a intervenção referente à subnotificação 2015); e modelo 4 (o melhor modelo de controle - toda a série sem a aplicação da intervenção de 2015 - sobre a intervenção da DAT).

Após a conclusão dos testes e a definição dos modelos, deu-se início à etapa de modelagem das séries temporais, visando a aplicação do método de STI. Nessa etapa, foram realizadas iterações para a seleção dos modelos estatísticos mais adequados para dados de contagem, considerando as distribuições de Poisson, Binomial Negativa e Quase-Poisson, bem como as funções de ligação Logarítmica, Raiz e Identidade. Essas iterações foram realizadas para cada um dos três estados (acidentes leves, graves e todos) e para cada um dos quatro modelos pré-definidos (1, 2, 3 e 4), levando em consideração todas as intervenções identificadas. Nessa etapa também foi necessário a verificação da superdispersão dos modelos para que fosse possível aplicar a família estatística que conseguisse melhor analisar a distribuição dos dados.

Por fim, também foram realizadas as avaliações dos modelos desenvolvidos, utilizando diversos métodos, a fim de selecionar a melhor regressão com o conjunto mais adequado de covariáveis para os quatro modelos de cada tipo de acidente. Essas avaliações incluíram: o critério de informação de Akaike (AIC) para os modelos de Poisson e Binomial Negativo; o teste F para verificar se os modelos 3 considerando a subnotificação seriam mais efetivos do que os modelos 3T e 4, que desconsideram a subnotificação; a análise gráfica da sobreposição dos quatro modelos para verificar se os modelos 1 e 2 estavam de acordo com o modelo 3, indicando um bom ajuste individual e global; o teste do *deviance* do R^2 para inferir o grau de ajuste do sistema por meio dos resíduos; o envelope para os modelos sem superdispersão a fim de verificar a qualidade dos ajustes e possíveis áreas de divergências; e o Half Normal Plot para as regressões com superdispersão, a fim de indicar a qualidade dos ajustes obtidos com a seleção das covariáveis, família e função de ligação da análise dinâmica.

4. RESULTADOS

4.1. Tendência

Considerando todos os acidentes, os resultados do teste de Pettitt indicaram forte influência das intervenções legais sobre a mudança de tendência na série temporal. O principal ponto de inflexão foi a subnotificação de

2015. Outras mudanças significativas coincidem com marcos legais: nov/2009 (Lei 12.009/2009 – mototaxistas), 16/08/2008 (Lei 11.705/2008 – Lei Seca), 16/08/2016 (Lei 13.281), 01/06/2014 (Lei 12.971), 16/12/2017 e 01/04/2018 (Lei 13.546/2017 – alteração da Lei Seca) e 16/05/2019 (proibição dos radares móveis).

A partir da análise do teste de Pettitt e da aplicação de séries temporais interrompidas para as categorias "todos os acidentes", "acidentes leves" e "acidentes graves", identificou-se indício de subnotificação geral de 25,77%, iniciada em fevereiro/2015, provavelmente com a redução das visitas da PRF a casos sem lesão corporal. Embora a DAT devesse impactar apenas acidentes leves (52,85%), também foram detectados sinais de subnotificação em acidentes graves (6,97%), possivelmente pela omissão intencional de vítimas devido a irregularidades nos veículos, condutores e/ou passageiros. Assim, acidentes com pequenas lesões tendem a ser excluídos do banco de dados.

4.2. Sazonalidade

Após a análise do teste de Pettitt, foi estudada a sazonalidade nas 3 categorias (graves, leves e todos), a partir dos testes de Kruskal-Wallis e Friedman: o primeiro comprovou a grande relação sazonal entre as quinzenas iguais de anos diferentes; e o segundo revelou a relação da quinzena com outras do mesmo ano. Dessa forma, com essa análise juntamente com a verificação gráfica das séries temporais foi retirada a covariável "*sazonalidade 2π*" por não apresentar teoricamente a relação que a série temporal expõe a partir dos testes e análises, assim sendo considerada a sazonalidade em blocos a qual foi mais representativa.

4.3. Modelos

A modelagem teve início com a categoria "todos os acidentes" e, após testar diferentes famílias para dados de contagem, adotou-se a Quase-Poisson como opção mais adequada. A validação foi feita com Half Normal Plot, simulando envelopes teóricos para mais de 60 modelos. O modelo escolhido (modelo 3) abrange toda a série histórica com intervenção em 2015, combinando variáveis e três funções de ligação (log, identidade e raiz). Os resultados indicaram: crescimento quinzenal de 0,85% nos acidentes, possivelmente ligado ao aumento da frota; redução de 4,46% com a Lei Seca de 2008 e de 2,26% com sua alteração em 2012, sugerindo efeito saturado; queda de 10,10% com mudanças nas multas em 2014; subnotificação de 25,77% após a DAT; aumentos inesperados associados às alterações nas multas (2016) e na Lei Seca (2018), demandando estudos futuros; e, com 90% de representatividade, aumento de 7,78% nos acidentes após a retirada dos radares móveis (ago–dez), sendo esta uma das estimativas mais robustas devido à natureza reversível da intervenção.

Para a categoria "acidentes leves", também foi selecionado o modelo 3 (Quase-Poisson, raiz), cujos resultados indicaram: aumento quinzenal de 0,957% em relação ao total de acidentes; redução após as mudanças na legislação de multas em 2014, tanto na aprovação quanto na entrada em vigor; subnotificação superior a 50% com a implantação da DAT, como esperado; aumentos não explicados após as alterações nas multas (2016) e na Lei Seca (2018); e uma redução significativa de 12,9% com a aprovação da alteração da Lei Seca em 2018.

Para "acidentes graves", foi adotado o modelo 3 (Binomial Negativo, log), que apontou crescimento de 0,48% por quinzena no período pré-intervenção. A Lei Seca de 2008 não foi significativa, mas a de 2012 reduziu os acidentes em 7,34%. A alteração na legislação de multas em 2014 foi a mais eficaz, com reduções de 4,17% (aprovação) e 5,7% (entrada em vigor), provavelmente devido ao impacto sobre ultrapassagens perigosas. Apesar da DAT focar acidentes leves, houve subnotificação de 6,97% nos graves, indicando perda de dados relevantes. A Lei Seca de 2018 resultou em redução de 3,94%, porém observou-se um aumento inexplicado de 9,74% no início do ano, demandando investigação. Por fim, a retirada dos radares móveis gerou aumento de 4,2%, corroborando o resultado semelhante do modelo 2 (4,5%).

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que, ao longo do tempo, os acidentes têm crescido no Brasil: no período estudado (2007-2020), a taxa de crescimento quinzenal foi de 0,85% para todos os acidentes, 0,96% para leves e 0,48% para graves. Dessa forma, constata-se que os acidentes leves têm crescimento mais elevado em relação aos graves. No entanto de 2015 a 2020, a série de acidentes graves permaneceu estável, com a covariável *tempo* não sendo significativa para explicação da variável dependente.

A análise dos resultados revela uma significativa subnotificação de acidentes após a implementação da DAT nas rodovias federais, com perda estimada de 25,77% dos registros no período analisado. Essa subnotificação é mais acentuada nos acidentes leves (52,85%), mas também afeta os graves (6,97%), o que é preocupante, já que a DAT deveria impactar apenas os casos sem lesão corporal. Esse fenômeno compromete a qualidade das informações e limita a compreensão real dos efeitos das políticas e intervenções no trânsito.

A análise dos efeitos da retirada dos radares móveis em 2019 indicou um aumento médio de 7,78% em todos os acidentes e de 4,2% nos acidentes graves, evidenciando o impacto positivo desses equipamentos na segurança viária. Os radares móveis são fundamentais para inibir comportamentos de risco e promover a conscientização dos condutores, contribuindo diretamente para a redução de acidentes e a preservação de vidas. Portanto, sua presença está associada a um trânsito mais seguro.

Em suma, o estudo mostra que acidentes leves e graves reagem de forma distinta às mudanças legislativas. Multas mais rigorosas e o endurecimento da pontuação foram eficazes na redução dos acidentes leves, enquanto medidas mais severas na Lei Seca e contra ultrapassagens perigosas reduziram os acidentes graves. Esses achados oferecem subsídios valiosos para políticas públicas de segurança viária. Contudo, é importante destacar que as conclusões se baseiam em análises estatísticas, e cada acidente pode ser resultado de múltiplos fatores combinados. Este estudo apresenta poucas limitações intrínsecas em relação à metodologia utilizada, que consiste em STI. Essas limitações foram amplamente superadas pela aplicação de outras metodologias complementares, que ajudaram a corroborar ou refutar as análises realizadas.

Para futuros estudos indicasse analisar a influência do maio amarelo nos acidentes a fim de melhorar os modelos, estudar efetivamente as causas do aumento dos acidentes em 2016 e principalmente no início de 2018, e a diminuição em 2013, dados obtidos pelo teste de Pettitt mas não modelados, também o estudo pode ser melhorado a partir de análise de influência/sensibilidade dos dados em cada modelo. Por fim, essas análises fornecem insights valiosos para embasar políticas e ações de segurança no trânsito, visando à redução dos acidentes e à preservação de vidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, D.; E. Souza e T. Mathias (2018) Impacto do Código de Trânsito Brasileiro e da Lei Seca na mortalidade por acidentes de trânsito. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 34, n. 8.

Amat, H. e F. Rodrigues (2021) Aplicação da análise de séries temporais interrompidas a um "experimento natural": avaliação do impacto da restrição de venda de antimicrobianos sem receita médica sobre a etiologia e resistência antimicrobiana em infecções urinárias em Botucatu (SP). *Brazilian Journal of Infectious Diseases*, v. 25.

Andrade, F.; J. Antunes e J. Ferreira (2019) Tendência do número de vítimas em acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras antes e depois da Década de Ação pela Segurança no Trânsito. *Revista de Saúde Pública*.

Antunes, J. e M. Cardoso (2015) Uso da análise de séries temporais em estudos epidemiológicos. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 24, n. 3, p. 565–576.

Bonander, G.; R. Andersson e F. Nilson (2015) The effect of stricter licensing on road traffic injury events involving 15 to 17-year-old moped drivers in Sweden: A time series intervention study. *Accident Analysis & Prevention*, v. 83, p. 154–161.

Confederação Nacional dos Transportes (CNT) (2021) Consultas Dinâmicas dos Acidentes Rodoviários.

Elvik, R. et al. (2009) *The handbook of road safety measures*. 2º vol., Estados Unidos: Emerald.

Feng, M.; X. Wang e M. Quddus (2020) Developing multivariate time series models to examine the interrelations between police enforcement, traffic violations, and traffic crashes. *Analytic Methods in Accident Research*, v. 28.

Martins, V. (2011) Implementação de Radares Fixos na Cidade de Lisboa. Dissertação (Mestrado em Ciências Policiais) – Instituto Superior de Ciências Policiais e Segurança Interna. Lisboa, Portugal, p. 85.

Nistal-Nuño, B. (2017) Segmented regression analysis of interrupted time series data to assess outcomes of a South American road traffic alcohol policy change. *Public Health*, v. 150, p. 51–59.

Ramstedt, M. (2008) Alcohol and fatal accidents in the United States—A time series analysis for 1950–2002. *Accident Analysis & Prevention*, v. 40, n. 4, p. 1273–1281.

Sobreira, L. e F. Cunto (2014) Análise de variações temporais na estimação de acidentes em segmentos arteriais urbanos. *Transportes*, v. 22, n. 3.

Wagner, A. K.; S. B. Soumerai; F. Zhang e D. Ross-Degnan (2002) Segmented regression analysis of interrupted time series studies in medication use research. *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*.

Talisson Lins Rocha (talisson.rocha@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Centro Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil

ATITUDE DA POPULAÇÃO DO DISTRITO FEDERAL EM RELAÇÃO À TARIFA ZERO NO TRANSPORTE PÚBLICO

Jéssica Fernandes Tavares, Otavio Henrique da Silva
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO
Este estudo objetivou analisar a atitude da população do Distrito Federal acerca da tarifa zero no transporte público, considerando a implementação do programa "Vai de Graça". Foi elaborada uma escala de atitude composta por dez afirmações, avaliadas por meio de escala Likert de cinco pontos, cujo somatório foi associado à atitude em relação à política pública. A pesquisa contou com 181 participantes, apresentando margem de erro de 7,11% e nível de confiança de 95%. A escala apresentou consistência interna adequada (α de Cronbach = 0,837). Os respondentes foram classificados como favoráveis (*f*=49,2%), indiferentes (*f*=48,1%) e desfavoráveis (*f*=2,8%) à tarifa zero. Testes estatísticos indicaram diferenças significativas (p<0,05) quanto ao modo de transporte utilizado, impacto da tarifa zero no uso do transporte público e percepção sobre a manutenção da política pública. Grupos que utilizam transporte público de forma crescente, preferem modos sustentáveis e apoiam a ampliação da política demonstraram atitudes mais favoráveis.

1. INTRODUÇÃO

O transporte público desempenha um papel fundamental nas cidades, especialmente por seu caráter social e democrático ao representar o único meio motorizado seguro, acessível e confortável para as pessoas de baixa renda. Além disso, oferece uma alternativa ao uso do automóvel, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população ao reduzir a poluição, os congestionamentos e os sinistros de trânsito (Ferraz *et al*., 2024).

Nesse sentido, diversas estratégias têm sido implementadas pelas administrações públicas brasileiras com o objetivo de ampliar o acesso ao transporte coletivo e fortalecer sua natureza inclusiva. Destaca-se, por exemplo, a política de tarifa zero, uma iniciativa que visa garantir a gratuidade no transporte urbano, como forma de assegurar o direito à mobilidade para toda a população como um direito social (Lopes, 2017). Atualmente, essa estratégia já é adotada, de maneira irrestrita, em mais de 130 cidades do país (Câmara dos Deputados, 2025). Em Brasília, um exemplo relevante é o programa "Vai de Graça", instituído pelo Governo do Distrito Federal (GDF), por meio do Decreto nº 46.924/2025 (Distrito Federal, 2025), que estabelece a gratuidade no transporte público, apenas aos domingos e feriados.

No entanto, apesar de seu potencial benefício às comunidades, a implementação dessa medida requer um planejamento cuidadoso, uma vez que pode impactar significativamente as finanças públicas dos municípios (Costa e Sampaio, 2024). Nesse processo, a participação social representa um componente essencial para o êxito da estratégia. Compreender as percepções, expectativas e níveis de aceitação da população em relação às ações governamentais permite ajustes estratégicos que favorecem a eficiência da gestão pública.

Dessa forma, este estudo teve como objetivo analisar a percepção da população do Distrito Federal em relação à política pública de tarifa zero no transporte coletivo. Para tanto, foi realizada uma pesquisa de atitude com a população local, visando identificar opiniões sobre a continuidade e a possível ampliação do programa "Vai de Graça", compreender o impacto percebido no uso do transporte público, além de relacionar essas percepções ao perfil sociodemográfico dos respondentes.

2. MÉTODO

Para avaliar a atitude da população do DF em relação à tarifa zero no transporte público, considerando a implementação e eventual expansão do programa "Vai de Graça", foi elaborado e aplicado um questionário em plataforma digital, divulgado por meio de redes sociais. Inicialmente, foi realizado um estudo piloto, a fim de identificar possíveis ajustes necessários e calcular o desvio padrão da população. Posteriormente, com a aplicação da pesquisa final, este desvio padrão foi utilizado para cálculo do erro amostral.

O instrumento de pesquisa foi composto, inicialmente, por dez afirmações avaliadas em uma escala Likert de cinco pontos, variando de 1 (discordo totalmente) a 5 (concordo totalmente), conforme Tabela 1. O somatório dos itens reflete o nível de favorabilidade à política de tarifa zero. Foram incluídos tanto itens de conteúdo positivo, nos quais os escores aumentam com a maior concordância dos respondentes, quanto itens com conteúdo negativo, com o objetivo de evitar viés de resposta. Essas afirmativas expressam atitudes

desfavoráveis em relação à medida, e, portanto, possuem pontuação invertida em relação às respostas originais. Assim, quanto maior a pontuação na escala, mais favorável é a atitude do indivíduo em relação à tarifa zero.

Tabela 1: Afirmações e média da pontuação da escala de atitude

Item	Afirmação
1.	A tarifa zero é uma política pública justa para toda a população.
2.	Passagens gratuitas beneficiam principalmente as pessoas de baixa renda.
3.	A gratuidade é importante para promover o lazer da população.
4.	A tarifa zero é positiva, pois movimenta mais os comércios da cidade.
5.*	O Governo não deveria gastar dinheiro público promovendo passagem gratuita de BRT, ônibus e metrô, mas sim com outras áreas prioritárias.
6.	A tarifa zero melhora o trânsito para todos, diminuindo congestionamentos.
7.*	Me preocupo que a tarifa zero resulte em aumento de impostos.
8.*	A tarifa zero faz com que as pessoas usem o transporte público mais do que realmente precisam.
9.	A tarifa zero diminui a poluição do ar da cidade, pois reduz o número de carros nas ruas.
10.*	Acho que tarifa gratuita pode atrapalhar os usuários do transporte público por lotar demais os veículos.

Nota: *Afirmação de conteúdo negativo.

Dessa forma, a atitude em relação à tarifa zero foi determinada pelo somatório das pontuações atribuídas às dez afirmações, com valores que variam entre 10 e 50 pontos. Para classificar os respondentes, foram estabelecidas três categorias de atitude: “desfavorável” (10 a 22 pontos), “indiferente” (23 a 37 pontos) e “favorável” (38 a 50 pontos). A partir dos dados obtidos na aplicação do questionário, avaliou-se a consistência interna da escala de atitude construída por meio do coeficiente α de Cronbach. Conforme (Terwee *et al*., 2007), valores de α superiores a 0,6 indicam confiabilidade aceitável, enquanto valores superiores a 0,95 não são desejáveis, uma vez que sugerem redundância entre os itens que compõem a escala.

Além da escala de atitude, o questionário contém outras perguntas fechadas. Primeiro, os participantes manifestaram opinião sobre a continuidade da tarifa zero, atualmente implementada no DF, indicando se o programa deveria ser encerrado, mantido ou ampliado para contemplar também os sábados ou todos os dias da semana. Adicionalmente, entre os respondentes que não possuíam direito à gratuidade aos domingos e feriados antes da implementação do programa 'Vai de Graça', investigou-se o impacto percebido da adoção da tarifa zero sobre o uso do transporte público, com base na comparação da frequência de utilização anterior e posterior à medida. E para aqueles que utilizam o transporte público aos domingos e feriados, foram levantados os principais motivos dos deslocamentos, tais como lazer, trabalho, estudo, atividades religiosas, entre outros. Por fim, o questionário incluiu questões destinadas à caracterização do perfil pessoal dos participantes, contemplando gênero, faixa etária, renda familiar mensal, conforme classes sociais definidas pelo IBGE (2013), com base no número de salários mínimos (SM), e o principal modo de transporte utilizado em seus deslocamentos diários.

Diante disso, por meio do software Microsoft Excel 2019, assumindo que os dados seguem uma distribuição normal, foram realizadas análises estatísticas das médias da pontuação da escala de atitude entre os distintos grupos, adotando-se um nível de significância de 5%. Para a comparação envolvendo apenas dois grupos (gênero), foi aplicado o teste t de Student, presumindo variâncias equivalentes. Para as variáveis com mais de duas categorias empregou-se a análise de variância ANOVA de uma via (faixa etária, renda familiar mensal, principal modo de transporte utilizado, impacto da tarifa zero no uso do transporte público e percepção sobre a manutenção política pública atual). Para os casos em que o teste ANOVA de uma via indicou diferença significativa entre as opiniões dos respondentes, realizou-se uma análise post-hoc por meio do teste de LSD de Fisher para comparações múltiplas. Este teste permite comparar os pares de grupos, identificando especificamente quais apresentam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O questionário piloto foi aplicado entre os dias 19 e 21 de maio de 2025, obtendo-se 30 respondentes. O desvio padrão das respostas de cada afirmação foi calculado, resultando em um desvio padrão máximo de 1,59. Além disso, constatou-se adequação do instrumento de pesquisa, de forma que não foram relatadas dúvidas dos respondentes consultados.

A pesquisa final foi realizada entre os dias 02 e 07 de junho de 2025, quatro meses após a implementação do programa "Vai de Graça", sendo obtidas 181 respostas. O erro amostral foi calculado considerando o desvio padrão máximo obtido no estudo piloto, resultando em uma margem de erro de ±7,11%, considerando uma margem de confiança de 95%. A análise da consistência interna da escala resultou em um coeficiente α de Cronbach de 0,837, valor que indica um nível adequado de confiabilidade dos itens que a compõem.

A partir das respostas obtidas junto aos participantes da pesquisa, observa-se que 72,9% concordam que a tarifa zero é uma política pública justa para todos. Além disso, 90,6% concordam com a afirmação referente ao impacto positivo da tarifa zero para pessoas de baixa renda, em contraposição a 7,2% que discordam. Destaca-se, também, que 84,5% concordam que a gratuidade contribui para a promoção do lazer da população e 76,8% entendem que a tarifa zero colabora para movimentar mais os comércios da cidade. Além disso, mais da metade dos respondentes concorda que a medida contribui para diminuir congestionamentos (55,2%) e a poluição do ar (54,7%). Ademais, 69,1% discordam que o Governo local deveria utilizar o dinheiro público em outras áreas prioritárias. Quanto à preocupação de que a tarifa zero resulta em aumento de impostos, 43,1% dos respondentes concordaram e 40,3% discordam. Finalmente, 58,0% discordam que a tarifa gratuita pode lotar demais os veículos e prejudicar o usuário do transporte público.

A Tabela 2 apresenta o perfil pessoal dos respondentes, o resultado médio da escala de atitude sobre a tarifa zero para os diferentes grupos de participantes, bem como o resultado o valor-p encontrado após condução dos testes estatísticos para comparação de médias.

Tabela 2: Perfil pessoal e informações relacionadas à atitude dos respondentes de opinião acerca da tarifa zero

Grupos		*f* (%)	Média da pontuação da escala (*m*) e Desvio padrão (*DP*)	Atitude	*p*
Gênero	Feminino	48,1%	38,3 ± 6,93	Favorável	0,99
	Masculino	51,9%	38,3 ± 8,61	Favorável	
Faixa Etária	De 18 a 30 anos	23,2%	38,7 ± 6,25	Favorável	0,85
	De 31 a 40 anos	49,2%	38,6 ± 8,54	Favorável	
	De 41 a 50 anos	14,9%	38,2 ± 6,88	Favorável	
	De 51 a 60 anos	7,2%	36,2 ± 9,49	Indiferente	
	Acima de 60 anos	5,5%	37,2 ± 8,22	Favorável	
Renda familiar[1]	Classe A	8,8%	36,5 ± 7,57	Indiferente	0,22
	Classe B	11,6%	41,8 ± 5,52	Favorável	
	Classe C	41,4%	38,3 ± 8,44	Favorável	
	Classe D	28,7%	38,0 ± 6,53	Favorável	
	Classe E	9,4%	36,7 ± 10,50	Indiferente	
Principal modo de transporte utilizado	A pé e bicicleta	5,5%	42,6 ± 7,14	Favorável	0,02*
	Carro e motocicleta	67,4%	37,2 ± 7,70	Favorável	
	Ônibus e Metrô + ônibus	27,1%	40,0 ± 7,82	Favorável	
Impacto da tarifa zero no uso do transporte público aos domingos e feriados	Não usava e continua não usando.	59,6%	36,3 ± 7,74	Indiferente	< 0,01*
	Não usava e passou a usar	18,7%	41,4 ± 7,43	Favorável	
	Usava e continua usando na mesma frequência	13,5%	37,7 ± 8,17	Favorável	
	Usava e passou a usar mais.	8,2%	44,4 ± 4,26	Favorável	
Percepção sobre a manutenção da política pública atual da tarifa zero no DF	Deve ser encerrada	5,5%	22,2 ± 4,85	Desfavorável	< 0,01*
	Deve ser mantida, só aos domingos e feriados	27,1%	33,4 ± 6,67	Indiferente	
	Deve ser ampliada para os sábados	34,3%	38,9 ± 4,72	Favorável	
	Deve ser ampliada para todos os dias da semana	33,1%	44,4 ± 4,68	Favorável	

Em que: * Valor significativo (p<0,05)

Notas: [1]Classe A: mais de 20 SM; Classe B: 10 a 20 SM; Classe C: 4 a 10 SM; Classe D: 2 a 4 SM; Classe E: menos de 2 SM.

De forma geral, tem-se que a maioria dos respondentes se identifica com o gênero masculino (n=94), possui idade entre 31 e 40 anos (n=89), renda familiar mensal enquadrada na Classe C (n=75) e utiliza o carro como principal modo de transporte (n=118). Dentre os respondentes que utilizam transporte público aos domingos e

feriados no DF, os três principais motivos apontados foram lazer, visita a familiares e amigos, e realização de compras. Levando em consideração as pontuações médias relacionadas à escala, analisando os respondentes individualmente, cinco deles foram categorizados como desfavoráveis (*f*=2,8%), 87 como indiferentes (*f*=48,1%), e 89 como favoráveis (*f*=49,2%).

Todos os grupos, independentemente do gênero ou modo de transporte, foram favoráveis à tarifa zero. Contudo, os grupos de 51 a 60 anos e das classes A e E mostraram atitude indiferente, enquanto os demais apresentaram percepção favorável. Esses achados sugerem a necessidade de estratégias de comunicação e gestão que abordem as especificidades de cada segmento populacional para otimizar a adesão à política.

Quanto à continuidade do programa "Vai de Graça", observou-se que os respondentes que defenderam o encerramento do programa (*n*=10) apresentaram atitude classificada como desfavorável. Aqueles que consideraram adequada a manutenção do programa como está (*n*=49) foram categorizados como indiferentes, enquanto os que defenderam sua ampliação (*n*=22) demonstraram atitude favorável em relação à tarifa zero.

Com base no valor da escala atribuído a cada participante da pesquisa, foi possível comparar a atitude entre os grupos de respondentes. Como mostra a Tabela 1, os testes t e ANOVA de uma via indicaram que não há diferença estatisticamente significativa ($p>0,05$) nas respostas dos usuários quanto ao gênero ($p=0,99$) e faixa etária ($p=0,85$). Por outro lado, há diferença significativa ($p<0,05$) quando comparados os respondentes em relação ao modo de transporte utilizado ($p=0,02$), o impacto da tarifa zero no uso do transporte público ($p<0,01$) e a percepção sobre a manutenção da política pública atual no DF ($p<0,01$). Para essas últimas três categorias, realizou-se uma análise post-hoc, utilizando o teste de LSD de Fisher para comparações múltiplas, de modo a investigar em quais comparativos residem tais diferenças (Tabela 3).

Tabela 3: Resultado do teste de LSD de Fisher para análise post hoc para os grupos em que foram observadas diferenças significativas ($p<0,05$) em relação à atitude

Categoria	Comparativos em que foram observadas diferenças significativas[1]	*p*
Principal modo de transporte utilizado	A pé e bicicleta *vs* Carro e motocicleta	0,03
	Carro e motocicleta *vs* Ônibus e Metrô + ônibus	0,03
Impacto da tarifa zero no uso do transporte público aos domingos e feriados	Não usava e continua não usando *vs* Não usava e passou a usar.	< 0,01
	Não usava e continua não usando *vs* Usava e passou a usar mais	< 0,01
	Usava e continua usando na mesma frequência *vs* Usava e passou a usar mais	< 0,01
Percepção sobre a manutenção da política pública atual da tarifa zero no DF	Deve ser encerrada *vs* Deve ser ampliada para os sábados	< 0,01
	Deve ser encerrada *vs* Deve ser ampliada para todos os dias da semana	< 0,01
	Deve ser encerrada *vs* Deve ser mantida, só aos domingos e feriados	< 0,01
	Deve ser ampliada para os sábados *vs* Deve ser ampliada para todos os dias da semana	< 0,01
	Deve ser ampliada para os sábados *vs* Deve ser mantida, só aos domingos e feriados	< 0,01
	Deve ser ampliada para todos os dias da semana *vs* Deve ser mantida, só aos domingos e feriados	< 0,01

Notas: [1] $p<0,05$.

No que se refere ao modo de transporte utilizado, observou-se que os usuários de carro ou motocicleta apresentaram pontuação média diferente ($p<0,05$), mais baixa, em relação àqueles que se deslocam a pé e bicicleta ou por transporte coletivo. Esse resultado, relacionado à uma atitude menos favorável à tarifa zero entre os usuários de transporte individual motorizado é de certa forma esperada, considerando o menor impacto direto da política nesse grupo. Em relação ao impacto da gratuidade após a implementação do programa "Vai de Graça", os respondentes que usavam e passaram a usar mais o transporte gratuito apresentaram escores médios diferentes ($p<0,05$), significativamente mais altos em comparação com os que não usavam e continuam não usando, os que não usavam e passaram a usar e os que usavam e continuam usando na mesma frequência, sugerindo que o aumento no uso está associado a uma percepção mais positiva do programa. Por fim, também foram observadas diferenças significativas ($p<0,05$) entre os grupos quanto à percepção sobre a manutenção

da tarifa zero. Aqueles que defendem o encerramento da política apresentaram os menores escores, enquanto os que apoiam sua ampliação para todos os dias apresentaram os mais altos. Os que preferem a manutenção apenas aos domingos e feriados também diferiram dos que apoiam a ampliação, refletindo uma gradação clara: quanto maior o apoio à continuidade e expansão do programa, mais positiva é a percepção dos respondentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da escala de atitude proposta neste estudo, avaliou-se a atitude da população do DF em relação à política da tarifa zero no transporte público, considerando a implementação do programa "Vai de Graça" e sua possível expansão. Destaca-se que 72,9% dos respondentes consideram a tarifa uma política pública justa. A maioria concorda que a tarifa zero beneficia pessoas de baixa renda (90,6%), promove o lazer (84,5%), ajuda o comércio local (76,8%) e contribui para reduzir congestionamentos (55,2%) e poluição (54,7%).

A escala de atitude apresentou adequada consistência (α de Cronbach igual a 0,837). Apenas 2,8% dos participantes são contra a tarifa zero, 49,2% são favoráveis e 48,1% indiferentes. A análise por grupos sociodemográficos demonstrou que a favorabilidade predominou em praticamente todas as categorias, com exceção do grupo de faixa etária entre 51 e 60 anos e das classes sociais A e E, que apresentaram uma atitude indiferente. Tais diferenças indicam a necessidade de estratégias comunicacionais e de gestão que considerem as especificidades de cada segmento populacional para o aprimoramento do programa.

Testes estatísticos (t de Student e ANOVA de uma via) indicaram não haver diferenças significativas (p>0,05) nas atitudes dos respondentes em relação ao gênero, faixa etária e renda familiar. No entanto, há diferença na opinião quando observado o modo de transporte utilizado (p=0,02), o impacto da tarifa zero no uso do transporte público (p<0,01) e a percepção sobre a manutenção da política pública atual no DF (p<0,01). A análise post hoc sugere que a atitude mais favorável à tarifa zero está associada ao uso crescente do transporte gratuito, ao apoio à ampliação da política e à preferência por modos sustentáveis, enquanto usuários de transporte individual motorizado e defensores do fim da tarifa são menos favoráveis.

Por fim, destaca-se a importância de compreender a atitude da população em relação à tarifa zero, pois essas informações podem orientar decisões de gestores e planejadores de transporte, tanto no DF quanto em outras cidades. Valorizar a participação popular pode tornar os sistemas de transporte mais inclusivos, acessíveis e sustentáveis. Complementarmente, acredita-se que novos estudos podem aprofundar a análise dos impactos operacionais e ambientais da tarifa zero, considerando indicadores como aumento da demanda, redução do uso de veículos particulares, diminuição de congestionamentos e redução das emissões de poluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ferraz, A. C. P. C.; I. G. E. Torres; A. N. R. Silva; M. N. P. V. Romão; F. H. Hirosue e J. T. Bastos (2024) *Transporte Público Coletivo Urbano*. São Carlos: RiMa Editorial.

Costa, M. G. e J. O. U. Sampaio (2024) Análise da viabilidade financeira da implementação da política de tarifa zero no transporte público urbano por ônibus em grandes municípios brasileiros. *Revista Delos*, v. 17, n. 61, p. 01-26. DOI: 10.55905/rdelosv17.n61-057.

Câmara dos Deputados (2025) Especialistas defendem gratuidade para o transporte público em debate na Câmara. Disponível em: https://www.camara.leg.br/noticias/1156229-especialistas-defendem-gratuidade-para-o-transporte-publico-em-debate-na-camara/ (acesso em 06/07/2025).

IBGE (2013) Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE.

Lopes, N. A. P. (2017) Realidade ou utopia: Tarifa Zero em Viçosa/MG? *Revista Vértices*, v. 19, n. 3, p. 111-138. DOI: 10.19180/1809-2667.v19n32017p111-138.

Terwee, C. B., S. D. M. Bot, M. R. Boer, D. A. W. M. van der Windt, D. L. Knol, J. Dekker, L. M. Bouter e H. C. W. Vet (2007) Quality criteria were proposed for measurement properties of health status questionnaires. *Journal of Clinical Epidemiology*, v. 60, p. 34–42. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2006.03.012

Distrito Federal (2025) Decreto nº 46.924/2025, de 28 de fevereiro de 2025. Brasília: Diário Oficial do Distrito Federal.

Jéssica Fernandes Tavares (jessicaft78@gmail.com)
Otavio Henrique da Silva (otavio.silva@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes
Anexo SG-12, 1° andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA POLÍTICA NACIONAL DE MOBILIDADE URBANA NO RECIFE: UMA ANÁLISE BASEADA EM INDICADORES

Iury Ribeiro de Melo, Viviane Adriano Falcão, Leonardo Herszon Meira
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este artigo analisa os impactos da Política Nacional de Mobilidade Urbana na promoção da mobilidade urbana sustentável na cidade do Recife. Para isso, aplicou-se uma adaptação do Índice de Mobilidade Urbana, baseado em 22 indicadores organizados nos pilares de acessibilidade, governança e mobilidade, com dados coletados entre 2000 e 2024. Os resultados revelam que a PNMU teve efeito catalisador, intensificando tendências já existentes, especialmente nos pilares de acessibilidade e governança, com avanços associados à institucionalização de políticas locais e à ampliação da infraestrutura de transporte e ao escopo econômico. O pilar da mobilidade apresentou melhora mais discreta, refletindo desafios estruturais e culturais. A principal limitação da pesquisa foi a escassez de dados históricos, evidenciando a necessidade de fortalecer os sistemas de monitoramento. Conclui-se que a PNMU contribuiu positivamente para a mobilidade sustentável no Recife, reforçando a importância do uso de indicadores como instrumentos de avaliação e aprimoramento das políticas públicas de mobilidade.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização brasileiro entre as décadas de 1960 e 1980 foi marcadamente desordenado, transformando cidades em grandes aglomerações urbanas (Costa, 2008). Atualmente, com 84% da população em áreas urbanas, essa transição impactou diretamente o deslocamento (IBGE, 2010; Carvalho, 2016). O descompasso entre desenvolvimento urbano e infraestrutura de transporte gerou problemas econômicos, sociais e ambientais, comprometendo a qualidade de vida. A formação de periferias e a segregação socioeconômica agravaram a situação, afetando saúde, meio ambiente, mobilidade e integração social (Santos e Santos, 2024). A dependência do automóvel particular e a ineficiência do transporte público resultam em congestionamentos, lentidão e poluição, diminuindo acessibilidade e qualidade de vida (Freitas *et al*. 2015; Silva e Mello, 2017).

Nesse cenário, a criação da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída pela Lei Federal nº. 12.587/2012 (Brasil, 2012), representou um avanço no enfrentamento dos desafios de mobilidade. Ela estabelece diretrizes para integrar modos de transporte, priorizar opções coletivas e não motorizadas, democratizar o espaço urbano e promover deslocamentos sustentáveis. Em 2015, a Agenda 2030 da ONU reforçou essa visão com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 11, que foca em cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (ONU, 2015). A PNMU alinha-se a essa meta, desencorajando o transporte individual e fortalecendo modos coletivos e ativos. Isso representa uma mudança de paradigma, passando do planejamento centrado em veículos para um focado em acessibilidade, qualidade de vida e nas pessoas (Caccia, 2015).

No ciclo das políticas públicas — modelo que descreve as etapas sequenciais pelas quais uma política governamental passa — a avaliação é a fase final, muitas vezes negligenciada. Ela determina o alcance dos objetivos e a contribuição das políticas para os compromissos estatais (Brasil, 2023). Na mobilidade urbana, essa avaliação é necessária para entender o impacto de ações como as da PNMU na sustentabilidade e qualidade de vida. Para isso, o uso de indicadores é indispensável, por conta do seu poder de simplificar fenômenos complexos (Gudmundsson *et al*., 2016), reunindo informações para avaliar desempenho, guiar ações futuras e monitorar o desenvolvimento sustentável (Bezerra *et al*., 2023). A combinação de indicadores em um índice oferece uma visão completa, caracterizando o ambiente urbano e auxiliando na compreensão de problemas multidimensionais (Costa, 2008).

Diante do exposto, destaca-se a cidade do Recife, que, embora seja a nona mais populosa do Brasil e detenha o maior PIB *per capita* do Nordeste, enfrenta graves problemas de mobilidade urbana, sendo considerada a cidade com o pior nível de congestionamento do país (TOMTOM, 2024; IBGE, 2025). Castro *et al*. (2025) indicam que a mudança na densidade populacional da cidade revela um espraiamento urbano, com possível esvaziamento do centro e expansão periférica desordenada, intensificando desafios de mobilidade, infraestrutura e sustentabilidade. Assim, este artigo analisa o impacto da PNMU no desenvolvimento da mobilidade urbana sustentável no Recife, buscando responder: "em que medida a PNMU contribuiu para o

avanço da mobilidade urbana sustentável na cidade do Recife?".

2. METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar a mobilidade sustentável em cidades latino-americanas, Huertas *et al*. (2021) propuseram o Índice de Mobilidade Urbana (UMI), estruturado a partir de um conjunto de 45 indicadores relacionados ao desempenho da mobilidade urbana. Para o caso específico da cidade do Recife, a aplicação do índice considerou 22 desses indicadores, selecionados com base na disponibilidade de dados para o período entre os anos de 2000 e 2024, conforme apresentado na Tabela 1. Considerando a possível indisponibilidade de dados, os autores optaram por não atribuir pesos aos indicadores propostos. Além disso, o índice foi organizado, originalmente, em pilares (Acessibilidade, Governança e Mobilidade) permitindo que a avaliação da mobilidade urbana sustentável seja realizada tanto a partir de cada pilar, quanto por meio do valor geral (considerando todos os indicadores simultaneamente). Essa limitação não invalida a análise, mas impõe restrições à comparação com outras cidades ou com o modelo original. Assim, a aplicação parcial do UMI é válida para fins de análise temporal intraurbana, como a evolução da mobilidade no Recife.

Tabela 1: Indicadores de Mobilidade Urbana Sustentável do UMI

	Categoria	Indicador	Unidade	Valor mín.	Valor máx.
Acessibilidade	Infraestrutura física	Comprimento das faixas de transporte público	km/ha	0,001	0,003
		Comprimento das vias cicláveis	km/10^{6}hab	0	123,76
	Escopo econômico	Acessibilidade ao transporte (Porcentagem das despesas familiares com transporte)	%	18,1%	20%
		PIB per capita	USD/hab	1188	7622
		Valor da passagem do transporte público	USD/viagem	0,18	0,77
	Suprimento energético	Número de postos de gasolina	estações/10^{6}hab	140	286
	Veículos para a mobilidade de pessoas e bens	Veículos particulares por habitante*	veíc/hab	0,17	0,47
		Porcentagem de veículos híbridos ou elétricos	%	0%	1%
	Distribuição da cidade	Densidade urbana*	hab/ha	67,86	73,03
Governo	Organização e regulamentações	Existência de organismos reguladores da mobilidade	[0/1]	0	1
		Participação de organizações civis e comunidades relacionadas à mobilidade sustentável	[0/1]	0	1
		Presença de políticas/regulamentações públicas relacionadas à mobilidade	[0/1]	0	1
		Existência de programa de inspeção e manutenção	[0/1]	0	1
		Existência de uma regulamentação de emissões para veículos novos	[0/1]	0	1
		Existência de estratégias e implementação para melhorar a mobilidade urbana	[0/1]	0	1
Mobilidade	Padrões de mobilidade	Viagens anuais per capita	viagens/hab	1,67	3,28
		Viagens a pé	%	5,29%	28,92%
		Viagens de bicicleta	%	1,7%	5%
		Viagens de transporte público	%	43%	47,85%
		Viagens de veículos privados*	%	15%	36%
		Tempo de viagem em veículo particular*	min	27,17	28
		Tempo de viagem em transporte público*	min	43	56,01

*Indicador com conotação negativa

Fonte: Adaptado de Huertas *et al*. (2021)

Devido à heterogeneidade nas escalas dos dados utilizados para o cálculo dos indicadores, foram definidos valores de referência mínimos e máximos para cada indicador com base nos dados disponíveis para a cidade. A partir desses limites, conforme definido pelos autores, procedeu-se à normalização dos dados, aplicando-se a Equação 1 para os indicadores com conotação positiva e a Equação 2 para aqueles com conotação negativa.

$$Valor\ do\ indicador\ normalizado(\%) = \frac{Valor\ do\ indicador - Valor\ mínimo}{Valor\ máximo - Valor\ mínimo} \quad (1)$$

$$Valor\ do\ indicador\ normalizado(\%) = 1 - \frac{Valor\ do\ indicador - Valor\ mínimo}{Valor\ máximo - Valor\ mínimo} \quad (2)$$

Por não haver peso relativo entre os indicadores, os valores do UMI (%) foram obtidos a partir da média dos

valores normalizados dos indicadores pertencentes a cada pilar e ao índice geral. Os dados foram separados em dois intervalos: pré-PNMU (2000 a 2011) e pós-PNMU (2012 a 2024). A seguir, foram ajustadas retas de regressão linear, conforme a Equação 3, cuja formulação, segundo Gujarati e Porter (2011), permite estimar a tendência dos dados ao longo do tempo.

$$Y = b_1 + b_2 X \quad (3)$$

3. RESULTADOS

Com o objetivo de analisar o impacto da instituição da PNMU sobre os diferentes grupos que compõem a mobilidade sustentável, foram calculados os valores do UMI individualmente para cada pilar do índice. Para uma avaliação global do impacto, também foi determinado o valor geral do índice. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores do UMI para o Recife

UMI – Pré-PNMU	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	
UMI Acessibilidade (%)	19,6	22,3	25,2	27,1	30,6	33,2	35,4	37,8	34,2	37,0	39,9	43,1	
UMI Governo (%)	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	
UMI Mobilidade (%)	49,1	48,7	48,4	48,1	47,9	47,6	47,4	47,2	47,0	46,8	46,6	46,5	
UMI Geral (%)	41,8	42,8	43,9	44,6	45,9	46,9	47,7	48,6	47,1	48,2	49,3	50,6	
UMI – Pós-PNMU	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
UMI Acessibilidade (%)	46,0	48,2	55,0	54,6	59,2	51,4	48,8	54,3	57,1	63,3	68,8	72,8	76,7
UMI Governo (%)	66,7	66,7	66,7	66,7	83,3	66,7	66,7	66,7	66,7	83,3	83,3	83,3	83,3
UMI Mobilidade (%)	46,4	46,3	46,2	46,1	46,0	45,9	45,8	47,7	49,5	51,4	53,3	55,2	57,1
UMI Geral (%)	51,7	52,6	55,4	55,2	61,6	53,8	52,7	55,6	57,3	65,0	67,8	70,1	72,3

Primeiramente foi elaborado o Gráfico 1, que apresenta a evolução dos valores do pilar “Acessibilidade” ao longo do período analisado. Observa-se que, mesmo antes da instituição da PNMU, já havia uma tendência de crescimento da acessibilidade na cidade. No entanto, a comparação entre os coeficientes angulares das retas de regressão ajustadas para os períodos pré-PNMU e pós-PNMU revela um leve aumento no coeficiente após a implementação da política. Esse resultado indica que a instituição da PNMU teve um impacto positivo sobre esse pilar, contribuindo para acelerar a melhoria da acessibilidade no Recife.

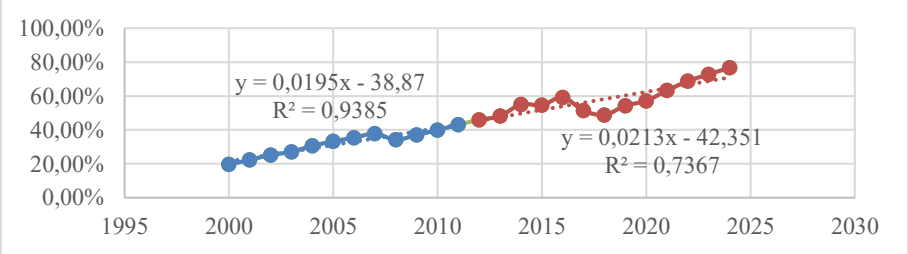


Gráfico 1: Evolução do UMI para o pilar Acessibilidade

Então foi elaborado o Gráfico 2, para o pilar “Governo”. Como todos os indicadores que o compõem são binários, a presença ou ausência de cada item contribui proporcionalmente com cerca de 16,67% para o valor final do “UMI Governo”. Nesse contexto, observa-se, um aumento no valor do índice em 2016, atribuído à realização de oficinas participativas promovidas pela prefeitura durante o processo de elaboração do Plano de Mobilidade Urbana do Recife. Posteriormente, em 2021, a formalização da Política Municipal de Mobilidade Urbana consolidou esse processo, justificando o crescimento observado no gráfico a partir desse ano (Recife, 2024). Assim, pode-se dizer que a PNMU impactou positivamente esse pilar no desenvolvimento de uma mobilidade sustentável na cidade, levando à elaboração de um Plano e de uma Política de Mobilidade Urbana.

Em seguida, foi elaborado o Gráfico 3, referente ao pilar “Mobilidade”. Observa-se que esse componente apresentava uma tendência de queda até o ano de 2018, a partir do qual os valores começaram a crescer progressivamente, superando, nos anos subsequentes, os níveis observados no início da série histórica. É relevante destacar que a melhoria nos indicadores de mobilidade foi percebida apenas seis anos após a promulgação da PNMU e três anos após o início da elaboração do Plano de Mobilidade Urbana do Recife. Ainda assim, os resultados sugerem que a PNMU exerceu um impacto positivo sobre esse pilar no município.

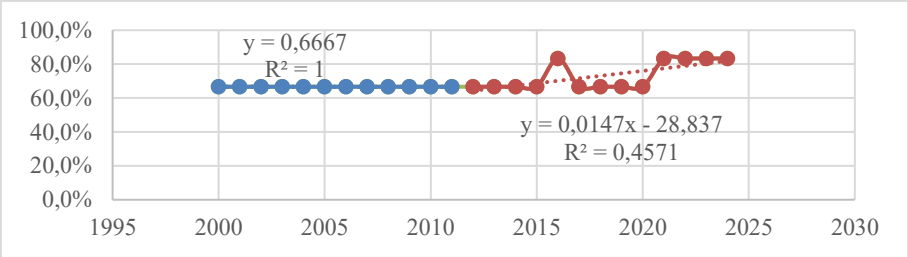


Gráfico 2: Evolução do UMI para o pilar Governo

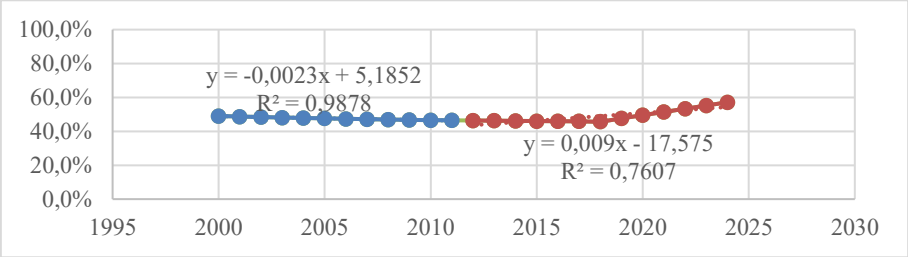


Gráfico 3: Evolução do UMI para o pilar Mobilidade

Por fim, foi elaborado o Gráfico 4, apresentando os valores gerais do UMI para o Recife. Verifica-se que já havia uma tendência de crescimento da mobilidade urbana sustentável na cidade antes da instituição da PNMU. No entanto, essa tendência se intensificou após a promulgação da política. Com isso, em 2024, o município alcançou um valor de 72,3% no índice, o que, segundo a classificação proposta por Huertas *et al*. (2021), representa um nível elevado de mobilidade sustentável para cidades latino-americanas.

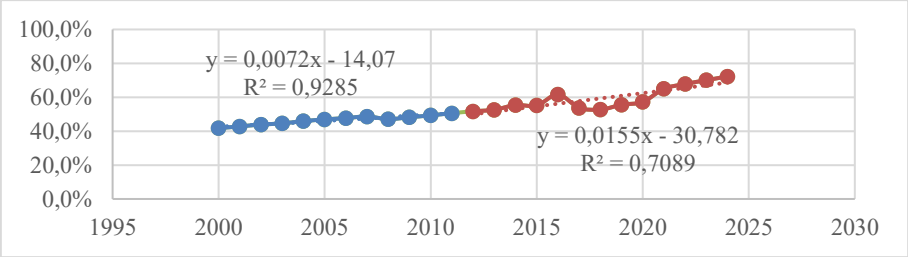


Gráfico 4: Evolução geral do UMI

A análise dos valores do UMI para cada pilar e do índice geral indicam que, embora Recife já apresentasse avanços em acessibilidade e governança antes da PNMU, esses pilares se fortaleceram após sua implementação. A acessibilidade teve crescimento, refletindo melhorias na infraestrutura física e no escopo econômico, enquanto a governança avançou pontualmente com novos marcos institucionais. Já a mobilidade evoluiu de forma mais lenta, devido à complexidade das mudanças nos padrões de deslocamento, que exigem tempo, investimentos e políticas integradas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicam que, embora algumas melhorias estivessem em curso, a PNMU contribuiu para o avanço da mobilidade urbana sustentável na cidade do Recife. A análise do índice indica que a política impulsionou as transformações correntes, especialmente nos pilares de acessibilidade e governança. O crescimento desses indicadores após a promulgação da política demonstra seu potencial como indutora de mudanças na mobilidade urbana do Recife. A aplicação do UMI no Recife evidenciou o impacto positivo da PNMU no fortalecimento da mobilidade urbana sustentável. A análise dos pilares do índice mostra que o Recife já possuía certa estrutura organizacional e regulamentação antes da PNMU. Os padrões de acessibilidade já apresentavam trajetória ascendente, que foi potencializada após a implementação da política. No entanto, os padrões de mobilidade ainda não atingiram níveis ideais de sustentabilidade, embora uma tendência de melhoria seja notada, sinalizando avanços.

A limitação principal desta pesquisa foi a indisponibilidade de dados históricos, restringindo o cálculo a apenas

22 dos 45 indicadores propostos. Isso ressalta a necessidade de o município investir em bases de dados públicas mais completas e atualizadas. Essa dificuldade evidencia os desafios na avaliação de políticas públicas de mobilidade urbana, dada a ausência de infraestrutura para coleta, sistematização e divulgação de dados públicos confiáveis.

Dessa forma, conclui-se que a PNMU contribuiu para o avanço da mobilidade urbana sustentável no Recife, mesmo com resultados variáveis entre os pilares. A experiência destaca que políticas nacionais, adaptadas ao contexto local e acompanhadas de planejamento urbano eficaz, podem promover progressos importantes. A mensuração sistemática por meio de indicadores é, portanto, uma ferramenta essencial para o aprimoramento contínuo das políticas públicas. Para estudos futuros, recomenda-se a ampliação da análise para todos os municípios da Região Metropolitana do Recife, a fim de avaliar o impacto regional da política. Também é sugerida a aplicação do índice em outras capitais brasileiras, permitindo a comparação dos efeitos da política em diferentes contextos urbanos. Além disso, sugere-se a realização de uma pesquisa voltada à análise das ações implementadas, com foco em avaliar a sensibilidade dos indicadores em relação a essas ações.

Agradecimentos
Os autores agradecem à CAPES e à FACEPE pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Bezerra, A. L. R. *et al*. (2023) Aplicação do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável para avaliar a qualidade da mobilidade urbana: um estudo de caso para Patos – PB. *Observatorio de la Economia Latinoamericana*. v.21, n.5, p. 2630-2650 DOI: 10.55905/oelv21n5-016

Brasil (2012) Lei Federal Nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012. Institui a Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU.

Brasil (2023) Avaliação de Políticas Públicas. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/avaliacao-de-politicas-publicas-1 (Acesso em: 13/06/2025)

Caccia, L. S. (2015) *Mobilidade Urbana: Políticas públicas e apropriação do espaço em cidades brasileiras*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFRGS.

Carvalho, C. H. R. (2016) Mobilidade urbana sustentável: conceitos, tendências e reflexões. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6637 (Acesso em: 13/06/2025)

Castro, A. A. B. C *et al*. (2025) Crescimento Urbano das Metrópoles Brasileiras (2000-2022). *Coopex*. DOI: 10.61223/coopex.v16i1.6549

Costa, M. D. S. (2008) *Um índice de mobilidade urbana sustentável*. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos-USP. São Carlos.

Freitas, S. J. C. *et al*. (2013) Os desafios da Mobilidade Urbana. *Percurso Acadêmico*. v. 3, n 6, p. 239-241 DOI: https://doi.org/10.5752/P.2236-0603.2013v0n0p239-241

Gudmundsson, H. *et al*. (2016) Sustainable transportation: indicators, frameworks, and performance management. *Springer*. DOI 10.1007/978-3-662-46924-8

Gujarati, D. N. e Porter, D. C. (2011) *Econometria Básica* (5ª ed.). AMGE Editora.

IBGE (2010) Censo 2010: população do Brasil é de 190.732.694 pessoas. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/13937-asi-censo-2010-populacao-do-brasil-e-de-190732694-pessoas (Acesso em: 13/06/2025)

IBGE (2025) Recife. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife (Acesso em: 26/06/2025)

ONU (2015) Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs (Acesso em: 13/06/2025)

Recife (2024) Plano de Mobilidade Urbana do Recife. Disponível em: https://cttu.recife.pe.gov.br/plano-de-mobilidade-urbana-do-recife (Acesso em: 13/06/2025)

Santos, S. L. e Santos, M. O. (2024) O processo de urbanização e desigualdades – padrões socioespaciais e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Recife. *Estudos Universitários: revista de cultura*, Recife, v. 40, n. 2, p. 95-133. DOI: https://doi.org/10.51359/2675-7354.2023.260417

Silva, C. C. G. e Mello, S. C. B. (2017) Recife, Veneza Brasileira: repensando a mobilidade urbana a partir de seus rios. Cidades. Disponível em: http://journals.openedition.org/cidades/455 (Acesso em: 13/06/2025)

TomTom (2024) Ranking 2024. Disponível em: https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking (Acesso em: 26/06/2025)

Iury Ribeiro de Melo (iury.ribeiro@ufpe.br)
Viviane Adriano Falcão (viviane.afalcao@ufpe.br)
Leonardo Herszon Meira (leonardo.meira@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Av. da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil.

BICYCLE ROBBERY TARGETING CYCLISTS DURING THEIR TRIP: STREET-LEVEL ANALYSIS OF SPATIAL PATTERNS AND RISK FACTORS

Samuel de França Marques, Luis Gustavo Nonato
University of São Paulo

ABSTRACT
Although cycling plays an important role toward sustainable cities, the increasing records of bicycle robberies have threatened the permanence and attraction of new bike users. This paper addresses bicycle robberies in which cyclists were approached during their trip in São Paulo, Brazil, from a street-level perspective. Spatial patterns were analyzed through the network kernel density estimation and local Moran's I, and the local Moran's I output categories were modeled as a function of crime intervening factors in a multinomial logistic regression. Socially vulnerable, central and green areas have shown higher levels of bicycle robberies. Results suggest that female cyclists riding expensive bikes are more likely to be victimized, and offenders may have a preference for approaching cyclists riding on a bike lane. The maps and relationships uncovered in this study support policymakers toward proposing solutions to bike robberies, and provide valuable information to the cycling community and police patrolling.

1. INTRODUCTION AND BACKGROUND

The quest for sustainable urban development has placed the bicycle as one of its main pillars. In addition to contributing to the reduction of externalities related to automobile use, cycling has shown important benefits for people's health, reducing stress and the risk of obesity in children and young people. However, cyclists have a higher risk of having their vehicle stolen then car or motorcycle owners (van Dijk *et al*., 2007), a condition often attributed to the ease of carrying and selling bicycles. Taking into account the expressive underreporting of bicycle crimes (Aliança Bike, 2023; Dai and Gao, 2021) probably due to the belief that the vehicle will hardly be recovered, the lack of public safety for cyclists threatens the goals of sustainable urban development.

Toward proposing solutions to this problem, scholars have analyzed the risk factors of bike crimes based on the main theories that explain how crime opportunities are created. The household density (Chen *et al.*, 2018; Nishisako and Fujino, 2024), employment density (Chen *et al.*, 2018), educational land use (Mburu and Helbich, 2016; Nishisako and Fujino, 2024), number of bike stands (Chen *et al.*, 2018; Levy *et al.*, 2018; Mburu and Helbich, 2016), and bike lanes (Chen *et al.*, 2018) have shown to be positively correlated to bike thefts. Conversely, income (Zhang *et al.*, 2007), age (Chen *et al.*, 2018; Wittebrood and Nieuwbeerta, 2000) and female, compared to male (Van Lierop *et al.*, 2015), have acted as deterrents to bike thefts.

Previous studies differ in the methods and unit of analysis used. Some studies have applied count data models, namely Poisson and negative binomial regressions, accounting for the excess of zero-values in some cases (Chen *et al.*, 2018; Levy *et al.*, 2018; Mburu and Helbich, 2016; Nishisako and Fujino, 2024). Other studies have used a binary logistic regression (Cohen *et al.*, 2024; Van Lierop *et al.*, 2015; Wittebrood and Nieuwbeerta, 2000; Zhang *et al.*, 2007). However, only Nishisako and Fujino (2024) accounted for the presence of spatial patterns. Regarding the unit of analysis, studies that applied a binary logistic regression focused on the individual level, and the remaining ones were based on street segments (Chen *et al.*, 2018; Mburu and Helbich, 2016), rail stations (Levy *et al.*, 2018) and sub-regions (Nishisako and Fujino, 2024).

However, a main gap on bike crimes still persists in the consulted literature. So far studies have addressed only bicycle thefts, a condition in which the bike was stolen from a parking slot without interaction between the victim and offender. When it comes to robberies, there is violence involved, making them more concerning than theft cases. In addition, while bike thefts may occur at specific places, such as the victim's home, a bike parking facility or school, bike robberies predominantly happen in the streets, which calls for the use of a street-level discretization. However, in this case, a challenge emerges regarding the inclusion of the target characteristics. Previous studies using a street-level perspective (Chen *et al.*, 2018; Mburu and Helbich, 2016) did not consider features of the possible targets, since the available data were not given at the individual level. Moreover, only a few research analyzed the presence of spatial dependence on bike crimes. Therefore, the main objective of this paper is to uncover spatial patterns and intervening factors of bicycle robberies in São Paulo, Brazil, from a street-level perspective and considering the crimes that occurred during bike trips. Results of an Origin and Destination Survey are leveraged to provide information on the target characteristics, as described in Section 2.

2. MATERIALS AND METHOD

Bicycle robbery records from January 2022 to November 2024 in São Paulo were collected from the São Paulo State Public Security Secretary (SSP-SP) website. To address only the robberies in which the cyclists were approached during their trip, we selected the occurrences whose victim condition was marked as "passerby" in the SSP-SP spreadsheet. A total of 542 georeferenced bicycle robberies were identified. A sequential analysis of spatial patterns and risk factors was carried out as described in the following subsections.

2.1. Spatial pattern analysis

The first analysis of spatial patterns consisted in applying a network version of the traditional heatmap, known as network kernel density estimation (NKDE), to visualize the streets with higher concentrations of bicycle robberies. The NKDE is similar to a moving window average that considers, in the calculation process, only neighbors within a threshold distance along the network, called the bandwidth. The Epanechnikov kernel (Equation 1) was adopted in the present study (Chan *et al.*, 2023; Jérémy, 2021).

$$F_{p(q)} = \sum_{p \in P} \frac{3}{4} * \left(1 - \frac{dist_G(q,p)^2}{b^2}\right) \quad (1)$$

Where $p(q)$ is the midpoint of the street segment q (also known as lixel, short for linear pixel), and G and b are the road network and bandwidth, respectively. The São Paulo road network was split into 100m lixels and a bandwidth of 500m was considered. In the NKDE, bicycle robberies that occurred along the same lixel are assigned to the lixel midpoint, which is used as a representative of the street segment to carry out the density calculation. The smoothing process performed by the NKDE accounts for the irradiation of the security sensation from a crime-affected street to its neighbor segments, that is, a 100m street segment having no occurrences but surrounded by streets with at least one crime record will not have a density value equal to 0. The density value will be higher than 0.

However, the NKDE does not provide the statistical significance of the identified hotspots. Therefore, the NKDE values were submitted to the local Moran's I (Anselin, 1995), given by Equation 2.

$$I_i = \frac{\sum_j w_{ij}(z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_i (z_i - \bar{z})^2} \quad (2)$$

Where $\bar{z}$ is the mean of the variable of interest z (the NKDE density values), and w_{ij} is a matrix of spatial weights expressing the level of interaction between the segments i and j. The local Moran's I divides the database into four groups: the clusters high-high (the segment and its neighbors have a density value higher than the mean) and low-low (the segment and its neighbors have a density value lower than the mean); and the spatial outliers high-low and low-high, where a different pattern occurs between the segment and its neighbors. High-high and high-low segments are problematic regarding bicycle robberies, and, because low-high segments are surrounded by critical ones, they may become a hotspot in the future if no intervention is carried out. The spatial weights used in the Moran's I calculation were based on the network distance between the lixels' midpoints. As network distances are computationally expensive, this step was carried out for 32 districts in São Paulo, covering approximately 63% of the bicycle robberies in the city.

2.2. Risk factor modeling

To understand the urban features associated with the clustering pattern from the local Moran's I, the Moran's I categories were modeled as a function of crime risk factors in a multinomial logistic regression. Risk factors were collected based on the main theories that explain how crime opportunities can be created: routine activity theory (Cohen and Felson, 1979), crime pattern theory (Brantingham and Brantingham, 1984) and rational choice theory (Cornish and Clarke, 1986). In short, these theories relate the crime occurrence to characteristics of the target and the neighborhood, which can act as a facilitator to crime (exposure) or inhibitor (guardianship). Risk factors were included based on three geographic units related to the street segments: the street segment midpoint, the street segment neighborhood and the street segment itself.

From the lixels' midpoint, we calculated the network distance to the nearest bicycle parking facility and pedestrian bridge based on shapefiles from the GeoSampa website and road network from the OpenStreetMap. In turn, the street segment neighborhood was considered as a 400m network buffer centered in the lixels' midpoint. From this area, data such as population density, employment density, average family income, young percent (up to 17 years), female percent, bike lane length, park and school areas were collected using the 2023 Origin and Destination Survey results (Metrô, 2025) and GeoSampa shapefiles. The third group of variables

refer to aggregated characteristics of the targets such as: number of users (exposure), average cyclist income, average cyclist age and percent of female cyclists. These data were based on the individual-level database from the 2023 OD Survey, from which we extracted all records corresponding to bicycle trips and respective origin and destination coordinates. Afterwards, using the software QGIS 3.40.0, the shortest distance path along the network between the pairs of OD coordinates was found, which was assumed as the possible path taken by the cyclists. Then, aggregation processes were carried out on the OD Survey socioeconomic data to calculate the variables aforementioned. We hypothesized that the cycling speed could also be considered as a risk factor. However, speed data were not available. Since the speed performed by the cyclists depends on the street topography, the lixel slope was included as a proxy for the cyclists' speed at each street segment. The street segment slope was calculated based on elevation data from NASA's Shuttle Radar Topography Mission.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1a and Figure 1b show the results from NKDE and local Moran's I, respectively.

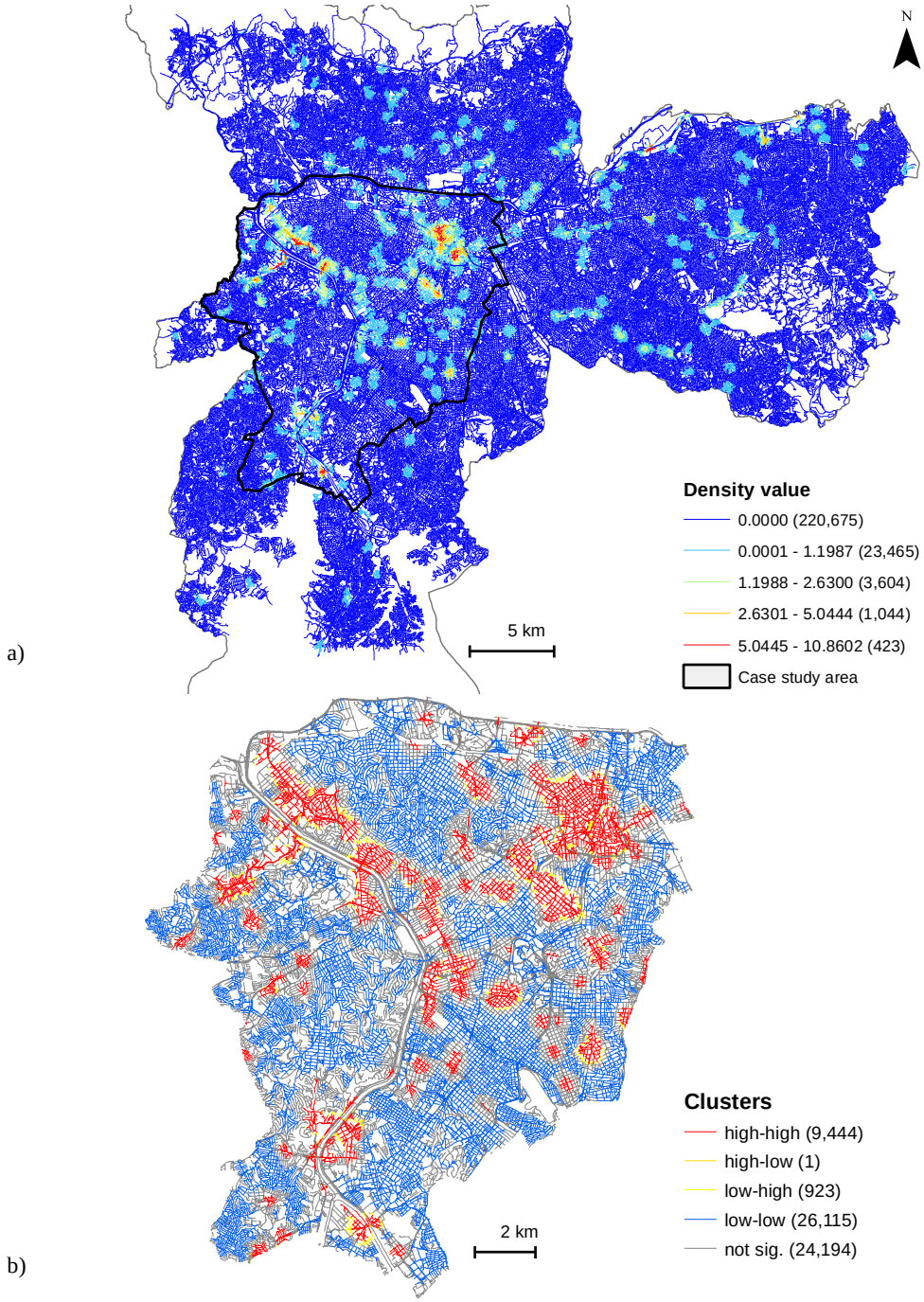


Figure 1: a) Network heatmap; and b) Moran's I clusters of bicycle robberies in São Paulo.

various hotspots occur at bike lanes such as those of Av. Paulista, Av. Professor Fonseca Rodrigues and Av. Escola Politécnica, and the Parque Ecológico and Ponte Cidade Universitária bike lanes. Higher density values can also be found close to public squares (Sé and República) and green areas (Av. Dona Helena Pereira de Moraes). The presence of spatial patterns in bicycle robbery targeting cyclists during their trip is confirmed by the statistically significant results from the local Moran's I (Figure 1b). High-high clusters compose nearly 16% of the street segments in the case study area. The Sé and República (the city center) districts have one of the highest extensions of contiguous high-high streets. Vila Leopoldina, Alto de Pinheiros, Pinheiros and Itaim Bibi also have various critical streets. Some hotspots can also be found in the border among multiple districts, as in the case of Consolação, Jardim Paulista, Bela Vista and Vila Mariana, and the case of Santo Amaro and Vila Andrade.

Low-high streets appear in the adjacency of hotspots (high-high) and coldspots (low-low), acting as an intermediate region where the crime pattern switches from low to high levels. In turn, only one high-low street was identified, which is in an elevated freeway popularly known as Minhocão. The Minhocão is open only for cyclists and pedestrians on weekends, increasing the availability of potential targets. One of the reasons why this is an isolated hotspot refers to the absence of intersections along the Minhocão, reducing the target chances of escaping from a motivated offender. Another possible reason could be the presence of a bike lane immediately below the Minhocão. Table 1 shows the multinomial logistic regression results. Because high-low segments had only one representative, it was not considered in the model.

Table 1: Multinomial logistic regression results ($N = 9{,}435$).

Intervening factor	Low-High (ref = Low-Low)				High-High (ref = Low-Low)			
	Estimate	Std. Error	P-value	Sig.	Estimate	Std. Error	P-value	Sig.
Intercept	-5.6186	0.5235	0.0000	***	-2.3102	0.1852	0.0000	***
Population density (inhab/ha)	0.0050	0.0009	0.0000	***	0.0064	0.0004	0.0000	***
Employment density (jobs/ha)	0.0011	0.0002	0.0000	***	0.0012	0.0001	0.0000	***
Average monthly family income (10^3 BRL)	0.0124	0.0039	0.0017	***	-0.0070	0.0025	0.0058	***
Young (%)	0.0100	0.0082	0.2256		-0.0046	0.0031	0.1401	
Female (%)	0.0098	0.0065	0.1301		0.0128	0.0023	0.0000	***
School area (%)	0.0202	0.0081	0.0122	**	-0.0349	0.0053	0.0000	***
Park area (%)	0.0248	0.0066	0.0002	***	0.0294	0.0029	0.0000	***
Number of cyclists	0.0560	0.0299	0.0612	*	0.1213	0.0110	0.0000	***
Average cyclist family income (10^3 BRL)	0.0079	0.0071	0.2661		0.0110	0.0028	0.0000	***
Average cyclist age	0.0136	0.0066	0.0380	**	0.0026	0.0024	0.2864	
Female cyclist (%)	0.0020	0.0021	0.3485		0.0024	0.0008	0.0031	***
Bike lane length (km/km^2)	0.2120	0.0291	0.0000	***	0.3190	0.0112	0.0000	***
Slope (%)	0.0098	0.0047	0.0355	**	-0.0013	0.0037	0.7299	
Distance to the nearest bike parking facility (km)	-0.2690	0.0903	0.0029	***	-0.4803	0.0333	0.0000	***
Distance to the nearest pedestrian bridge (km)	-0.3050	0.1109	0.0059	***	-0.4553	0.0410	0.0000	***

Note: *, ** and *** are statistically significant at the 90%, 95% and 99% confidence levels, respectively. McFadden R^2 = 0.22.

Low-high and high-high streets are statistically associated with higher levels of population and employment density than low-low segments, indicating that these features are facilitators to bicycle robberies, probably because they reflect the level of activity in the vicinity of a street. Higher levels of people in movement provide more available targets for other types of crime, and usually occur at places very known by offenders (Brantingham and Brantingham, 1984), making it easy for them to escape after stealing a bike. While low-high segments tend to occur at wealthier neighborhoods, for hotspots (high-high) it is the opposite, meaning that lower-income neighborhoods are more susceptible to bike robberies than the others. In turn, a statistically significant coefficient for slope is found only in the low-high category, indicating the low-high streets are associated with higher slope values. Based on the income results and the spatial patterns previously discussed, we can assume that a border effect occurs regarding bike robberies in São Paulo, and this border is characterized not only by a socioeconomic (income) feature, but also by a physical (slope) one.

Crime hotspots are more likely to occur in neighborhoods predominantly populated by females. In addition,

female cyclists have a higher probability of being victimized than male ones. Noting that high-high streets are statistically associated with higher-income cyclists (which were included as a proxy for the bike price), a target profile can be drawn: offenders may be looking for expensive bikes ridden by women, which can be considered, by them, as a more vulnerable target. The positive coefficient for the cyclist age variable in both categories (low-high and high-high) points to a preference for older cyclists, although it was not statistically significant for hotspots. These results are aligned with the rational choice theory (Cornish and Clarke, 1986) and represent an important difference from bike thefts. Women showed a lower likelihood of having their bike stolen, compared to men, in the bike theft study by Van Lierop *et al.* (2015). Conversely, in São Paulo, female cyclists are more likely to be victimized when it comes to bike robberies.

Bike robberies are more likely to occur at parks and close to a bike parking facility and pedestrian bridge, highlighting the need for police attention at these places. These and other factors had the same type of impact on both street categories. However, high-high streets always show higher coefficient values, revealing that, for a given predictor value, a higher probability is found for the hotspot category compared to the low-high one. This is the case of the number of users in the street segment, an important exposure variable. The higher the number of cyclists, the higher the number of available targets will be, which makes the most used segments more cost-effective for motivated offenders. In turn, the density of bike lanes in the street neighborhood reveals that offenders may have a preference for stealing bikes from cyclists riding on a bike lane. As bike lanes are isolated from the regular traffic, they provide an easier way for offenders to escape.

Schools are positively associated with low-high streets and negatively associated with high-high ones, revealing that education areas may characterize intermediate regions between coldspots and hotspots. However, Figure 1b shows various high-high segments surrounding the campus of the University of São Paulo. The negative coefficient for schools in the high-high category may be due to the presence of various schools in the vicinity of low-low segments. Probably, victims of bike robberies at a school area are not in a "passerby" condition, or the impact of the school variable varies spatially, being positive for some segments and negative for others, a hypothesis to be explored in future studies. In addition, the income and female percent coefficients suggest that offenders may be aware of socially vulnerable neighborhoods. Lower-income regions and households with a female head have been associated with a higher vulnerability to crime (Sampson *et al*., 1997). Unfortunately, the data used in our case do not provide information on the family structure, which can be a topic for future research.

4. CONCLUSIONS AND FINAL CONSIDERATIONS

This study analyzed the spatial patterns and risk factors of bicycle robberies targeting cyclists during their trip in São Paulo, Brazil. In our case study, female cyclists riding expensive bikes are more likely to be victimized. Places with higher population and employment levels, as well as lower-income areas, have shown higher levels of bike robberies. Results showed that bike lanes, bike parking facilities, pedestrian bridges and green areas are attractive to motivated offenders, and a border effect defined by income and the street slope occur regarding bike robberies in São Paulo.

The following contributions are highlighted: to the best of our knowledge, this is the first study addressing bike robberies targeting cyclists during their trip, uncovering their risk factors and supporting policymakers toward proposing solutions to this problem. In addition, using a street-level discretization is an underexplored approach when it comes to bike crimes. An important advancement for the crime literature refers to leveraging the OD Survey results to track the possible path taken by the target population and, therefore, include its characteristics into the model. Lastly, Figure 1 provides valuable information for the cycling community and police patrolling, indicating the streets most in need of intervention.

Acknowledgments

This study was financed, in part, by the São Paulo Research Foundation (FAPESP), Brazil (Process Number #2024/15983-4 and Process Number #2022/09091-8).

REFERENCES

Aliança Bike (2023) *Roubos e furtos de bicicletas no estado de São Paulo e na cidade de São Paulo (2018-2022)*. São Paulo, SP. Obtained from https://aliancabike.org.br/wp-content/uploads/docs/2023/03/Roubos-e-furtos-em-SP.pdf

Anselin, L. (1995) Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, *27*(2), 93–115.

Brantingham, P. J., and Brantingham, P. L. (1984) *Patterns in Crime*. Macmillan.

Chan, T. N., Zang, R., Ip, P. L., Leong, H. U., and Xu, J. (2023) PyNKDV: An Efficient Network Kernel Density Visualization Library for Geospatial Analytic Systems. Association for Computing Machinery.

Chen, P., Liu, Q., and Sun, F. (2018) Bicycle parking security and built environments. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *62*, 169–178. doi:10.1016/j.trd.2018.02.020

Cohen, A., Nelson, T., Zanotto, M., Fitch-Polse, D. T., Schattle, L., Herr, S., and Winters, M. (2024) The impact of bicycle theft on ridership behavior. *International Journal of Sustainable Transportation*, *18*(5), 453–463.

Cohen, L. E., and Felson, M. (1979) Social Change and Crime Rate Trends: A Routine Activity Approach. *American Sociological Review*, *44*(4), 588–608. doi:10.2307/2094589

Cornish, D. B., and Clarke, R. V. G. (1986) *The Reasoning Criminal: Rational Choice Perspectives on Offending*. Springer-Verlag. Obtained from https://books.google.com.br/books?id=dWwXjwEACAAJ

Dai, M., and Gao, Y. (2021) Reporting behavior of bicycle theft victims: a test of Black's theory of law. *Security Journal*, 34(1), 148–164. doi:10.1057/s41284-019-00217-2

Jérémy, G. (2021) spNetwork, a package for network kernel density estimation. *The R Journal*. Obtained from https://journal.r-project.org/archive/2021/RJ-2021-102/index.html

Levy, J. M., Irvin-Erickson, Y., and La Vigne, N. (2018) A case study of bicycle theft on the Washington DC Metrorail system using a Routine Activities and Crime Pattern theory framework. *Security Journal*, *31*(1), 226–246.

Mburu, L. W., and Helbich, M. (2016) Environmental Risk Factors Influencing Bicycle Theft: A Spatial Analysis in London, UK. *PLOS ONE*, *11*(9), e0163354. doi:10.1371/journal.pone.0163354

Metrô. (2025) Origin and Destination Survey. Companhia do Metropolitano De São Paulo, Secretaria Estadual dos Transportes Metropolitanos, São Paulo, Brazil. Obtained from https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/pesquisa-origem-e-destino-2023-anexos

Nishisako, M., and Fujino, T. (2024) Predicting the Risk of Bicycle Theft Occurrence Considering Routine Activity Theory and Spatial Correlation BT - Human Interface and the Management of Information. H. Mori & Y. Asahi (Eds), (p. 111–120). Springer Nature Switzerland, Cham.

Sampson, R. J., Raudenbush, S. W., and Earls, F. (1997) Neighborhoods and Violent Crime: A Multilevel Study of Collective Efficacy. *Science*, *277*(5328), 918–924. doi:10.1126/science.277.5328.918

van Dijk, J., van Kesteren, J., and Smit, P. (2007) Criminal Victimisation in International Perspective - Key findings from the 2004-2005 ICVS and EU ICS. UNODC/UNICRI. Obtained from https://unicri.it/sites/default/files/2021-06/ICVS2004_05report.pdf

Van Lierop, D., Grimsrud, M., and El-Geneidy, A. (2015) Breaking into Bicycle Theft: Insights from Montreal, Canada. *International Journal of Sustainable Transportation*, *9*(7), 490–501. doi:10.1080/15568318.2013.811332

Wittebrood, K., and Nieuwbeerta, P. (2000) Criminal Victimization During One's Life Course: The Effects of Previous Victimization and Patterns of Routine Activities. *Journal of Research in Crime and Delinquency*, *37*(1), 91–122.

Zhang, L., Messner, S. F., and Liu, J. (2007) Bicycle-Theft Victimization in Contemporary Urban China: A Multilevel Assessment of Risk and Protective Factors. *Journal of Research in Crime and Delinquency*, *44*(4), 406–426.

Samuel de França Marques (samuelmarques@usp.br)
University of São Paulo, São Carlos School of Engineering, Department of Transportation Engineering, São Carlos, 13566-590, Brazil
Luis Gustavo Nonato (gnonato@icmc.usp.br)
University of São Paulo, Institute of Mathematical and Computer Sciences, Department of Applied Mathematics and Statistics, São Carlos, 13566-590, Brazil

CICLO DE VIDA DO TRANSPORTE FLUVIAL DE PASSAGEIROS NA AMAZÔNIA: PROPOSTA DE POLÍTICA PÚBLICA PARA UMA MATRIZ ENERGÉTICA LIMPA

Guiler Oliveira Garcia Junior, Marcelino Aurelio Vieira da Silva
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
O transporte fluvial de passageiros é essencial na Amazônia, mas opera majoritariamente com combustíveis fósseis, gerando impactos ambientais significativos. Este artigo realiza uma revisão de estudos feitos entre 2019 e 2025 sobre como funciona esse transporte ao longo de toda a sua vida útil, com foco na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como instrumento de apoio à formulação de políticas públicas. A pesquisa identifica impactos ambientais, sociais e econômicos do ciclo de vida, analisa tecnologias energéticas alternativas e políticas públicas existentes, e propõe diretrizes adaptadas à realidade regional para promover uma matriz energética limpa. Os resultados indicam que a integração da ACV em processos de planejamento pode contribuir significativamente para a transição energética sustentável e justa na região amazônica.

1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia, o transporte fluvial é essencial para milhões de pessoas, sobretudo em comunidades isoladas, onde a ausência de infraestrutura terrestre o torna vital (ANTAQ, 2018). Contudo, embora o modo hidroviário seja mais eficiente energeticamente que rodovias e ferrovias, sua operação na região ainda depende de embarcações a combustíveis fósseis, gerando impactos como emissões de GEE, maiores em períodos de seca, além de riscos de derramamento de óleo, ruídos e poluição hídrica, agravados pela vulnerabilidade hidrológica e climática (Garcia, 2025).

Diante da emergência climática global e do avanço das discussões sobre transição energética, ganha relevância o debate sobre a reformulação do modelo de transporte fluvial amazônico. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta estratégica para mensurar os impactos ambientais ao longo de todas as etapas de um sistema de transporte, desde a extração de matérias-primas e fabricação das embarcações até a operação e o descarte (Gadepalli et al., 2023). Assim, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: como a ACV do transporte fluvial de passageiros na Amazônia pode orientar a formulação de políticas públicas voltadas à transição para uma matriz energética limpa e sustentável?

A relevância de tal questionamento se justifica pela existência de uma lacuna significativa na literatura quanto à aplicação prática da ACV em sistemas fluviais da região amazônica. Embora haja avanços relevantes em relação à eficiência energética e tecnologias de baixa emissão em outros cenários, são escassos os estudos que integram essas soluções às condições logísticas e sociais específicas da Amazônia (Barros, 2022). Além de que, muitos trabalhos abordam a ACV de forma técnica e fragmentada, sem articular seus resultados às necessidades de formulação de políticas públicas inclusivas e adaptadas ao território (García e Blanco, 2019).

Neste artigo, pretende-se realizar uma análise abrangente da produção científica e institucional recente sobre o ciclo de vida do transporte fluvial de passageiros na Amazônia, destacando os principais impactos ambientais, sociais e econômicos associados à sua cadeia operacional. A pesquisa também examina propostas tecnológicas voltadas à substituição dos combustíveis fósseis por fontes alternativas de menor emissão, bem como iniciativas de políticas públicas voltadas à descarbonização do setor, avaliando sua aderência às realidades locais. A partir dessa base, busca-se construir diretrizes integradas que combinem evidências técnico-científicas e o reconhecimento das dinâmicas socioambientais da região.

Além disso, pretende-se preencher lacunas específicas da literatura. Primeiramente, ao aplicar a ACV de forma direcionada ao transporte de passageiros na região, o estudo busca avançar sobre um campo ainda pouco explorado, visto que grande parte das análises existentes está centrada em modos terrestres e urbanos (Chester e Horvath, 2012; Carvalho, 2020). Em segundo lugar, é almejado superar a desarticulação entre dados ambientais e formulação de políticas públicas do transporte hidroviário no Brasil. Uma vez que a integração de ferramentas como a Análise de Ciclo de Vida permite qualificar as decisões estratégicas nesse setor, promovendo uma abordagem mais sustentável e resiliente diante das crescentes pressões ambientais (Garcia, 2025).

Por fim, o trabalho busca integrar variáveis técnicas, sociais e culturais, reconhecendo que soluções sustentáveis exigem não apenas viabilidade tecnológica, mas também aceitação social, viabilidade econômica e alinhamento com o modo de vida das comunidades ribeirinhas (Hernández-Fontes et al., 2021; WWF-Brasil, 2022). Dessa forma, espera-se que este artigo ofereça uma análise crítica e integrada que relacione a ACV, a formulação de políticas públicas e a realidade amazônica, contribuindo com diretrizes adaptadas para uma transição energética no transporte fluvial que funcione no meio ambiente, na sociedade e nas instituições.

1.1 Referencial Teórico

1.1.1 Conceitos Fundamentais da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

ACV é uma ferramenta metodológica que permite quantificar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço. Essa abordagem abrange desde a extração de matérias-primas até o descarte final, passando pela produção, distribuição e uso, sendo comumente chamada de abordagem "do berço ao túmulo" (*cradle-to-grave*) (Gadepalli et al., 2023).

Existem diferentes tipos de ACV, a depender do escopo do estudo. Além da tradicional *cradle-to-grave*, destacam-se a *cradle-to-gate*, que considera o ciclo até o ponto de saída da fábrica, e a *cradle-to-cradle*, que incorpora a lógica da economia circular, com a reintrodução dos resíduos no processo produtivo (Gadepalli et al., 2023). A escolha da abordagem depende do objetivo da análise e da disponibilidade de dados.

No setor de transportes, a ACV permite avaliar não apenas o consumo energético na operação, mas também impactos ligados à fabricação de veículos, infraestrutura e combustíveis. Chester e Horvath (2012) mostram que, em modos como o ferroviário, os impactos fora da operação podem superar as emissões durante o uso.

Na Amazônia, sua aplicação ao transporte hidroviário ajuda a identificar pontos críticos, como emissões de gases de efeito estufa GEE, uso de combustíveis fósseis, poluição hídrica e geração de resíduos oleosos. Essa análise possibilita quantificar impactos em diferentes cenários hidrológicos e apoiar estratégias de mitigação e planejamento sustentável (Garcia, 2025).

1.1.2 ACV no Contexto de Políticas Públicas

A ACV tem se consolidado como um importante instrumento para o planejamento e a formulação de políticas públicas, pois fornece uma base técnico-científica para decisões mais informadas. Sua aplicação permite avaliar o desempenho ambiental de diferentes alternativas tecnológicas e subsidiar a escolha de soluções com menor impacto ao longo do tempo (WWF-Brasil, 2022).

No panorama da transição energética e das metas climáticas globais, a integração da ACV às políticas públicas está alinhada às metas de transição energética e climática globais. O uso da ACV nas políticas de mobilidade pode ajudar a evitar soluções que, embora eficientes em um aspecto, sejam prejudiciais em outros — como, por exemplo, a eletrificação sem considerar a origem da eletricidade ou os impactos da cadeia produtiva das baterias (IEMA,2023).

A literatura aponta que a inclusão da ACV em processos regulatórios, como o licenciamento ambiental e o planejamento logístico, pode ampliar a eficácia das ações públicas, além de fortalecer a governança e a transparência na tomada de decisão (Garcia, 2025).

1.1.3 Particularidades da Amazônia

A região amazônica apresenta características únicas que exigem uma abordagem diferenciada na formulação de políticas públicas voltadas ao transporte e à sustentabilidade. A vastidão territorial, a baixa densidade populacional, a infraestrutura precária e a dependência do transporte fluvial tornam a região vulnerável a soluções padronizadas que não consideram sua realidade específica (ANTAQ, 2018).

Além dos desafios logísticos, há também aspectos socioambientais complexos. Grande parte da população ribeirinha vive em situação de vulnerabilidade social e tem acesso limitado a serviços básicos, o que exige soluções inclusivas e adaptadas às condições locais. Como destacam Hernández-Fontes et al. (2021), a

introdução de tecnologias limpas e eficientes no transporte fluvial precisa levar em conta aspectos culturais, de acessibilidade econômica e de capacitação técnica das comunidades envolvidas.

Outro fator crítico é a alta sensibilidade ambiental da região. A poluição hídrica, a emissão de GEE e o risco de acidentes com combustíveis fósseis representam ameaças não apenas à biodiversidade, mas também à saúde das populações locais (Fontes et al., 2023). Nesse cenário, soluções como embarcações híbridas ou elétricas, adaptadas para região, ganham relevância como alternativas viáveis e sustentáveis (Melo et al., 2024).

A aplicação da ACV na Amazônia, portanto, deve considerar não apenas os aspectos ambientais, mas também os sociais e culturais, de modo a promover uma transição energética justa e eficaz. Essa abordagem integrada é essencial para garantir que as políticas públicas sejam não apenas sustentáveis do ponto de vista técnico, mas também viáveis e legítimas para as populações que delas dependem (WWF-Brasil, 2022).

2. METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza qualitativa, com caráter exploratório e descritivo, fundamentada em uma revisão sistemática da literatura científica e institucional. O recorte temporal compreende janeiro de 2019 a março de 2025, escolhido por refletir a fase de maior crescimento da produção acadêmica e técnica sobre sustentabilidade e transporte fluvial, em comparação ao período anterior (2010–2018), quando havia menor integração entre mobilidade, energia e meio ambiente. O período selecionado buscou captar os avanços recentes ligados à mitigação das mudanças climáticas, sobretudo após o Acordo de Paris e o fortalecimento do debate sobre transição energética no Brasil

As buscas foram realizadas nas bases *Scopus*, *Web of Science*, *SciELO* e *Google Scholar*, além de relatórios de instituições como WRI Brasil, Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) e WWF-Brasil. Para busca, foram empregadas combinações de palavras-chave em português e inglês, como *"transporte fluvial de passageiros"*, *"life cycle assessment AND inland navigation"*, *"low carbon waterway transport"* e *"alternative fuels AND Amazon"*. O processo incluiu triagem por títulos e resumos, aplicação de critérios de inclusão/exclusão, leitura integral dos textos selecionados e sistematização dos resultados.

Foram incluídos apenas estudos com rigor metodológico que abordassem transporte fluvial amazônico, ACV aplicada à mobilidade, alternativas energéticas e políticas públicas ambientais. Trabalhos centrados em modos terrestres ou aéreos, ou sem integração socioambiental, foram excluídos.

A análise dos dados foi organizada em quatro eixos: (i) impactos ambientais e socioeconômicos do ciclo de vida do transporte fluvial; (ii) tecnologias energéticas alternativas em desenvolvimento ou implantação; (iii) políticas públicas existentes e seus níveis de articulação com dados ambientais; e (iv) propostas e lacunas identificadas na literatura, com vistas à formulação de diretrizes adaptadas ao contexto amazônico.

3. RESULTADOS

A análise da literatura especializada permitiu traçar um diagnóstico do transporte fluvial na região, evidenciando sua centralidade na mobilidade e os entraves que comprometem sua sustentabilidade. Os estudos mostram que o transporte hidroviário continua sendo a principal via de deslocamento para milhões de habitantes em áreas isoladas, onde a ausência de infraestrutura terrestre torna a navegação interior essencial para o acesso a serviços básicos (ANTAQ, 2018).

Esse setor estratégico, no entanto, apresenta fragilidades estruturais persistentes. Os dados indicam problemas como infraestrutura precária, operação informal, baixa regulação e vulnerabilidade socioambiental. Entre os principais impactos estão as emissões de gases de efeito estufa, a poluição hídrica por resíduos oleosos e combustíveis, e a poluição sonora que afeta a fauna aquática. Motores obsoletos e a falta de sistemas adequados de descarte agravam a degradação ambiental, conforme o WWF-Brasil (2022).

O ciclo de vida das embarcações e dos combustíveis fósseis é um dos principais pontos críticos do setor. Os estudos mostram que a fase operacional responde pela maior parte das emissões de GEE, especialmente em períodos de seca, quando o consumo aumenta. Também destacam os impactos da construção de infraestrutura

portuária, reforçando a necessidade de estratégias integradas para mitigar danos ao longo de todo o ciclo de vida (Garcia, 2025)

Nesse contexto, ACV desponta como uma ferramenta essencial para subsidiar decisões que visem à transição para uma matriz energética menos poluente. A literatura aponta para o potencial da ACV na identificação de pontos críticos e na comparação entre alternativas tecnológicas, ainda que sua aplicação prática na formulação de políticas públicas na Amazônia seja incipiente (García e Blanco, 2019).

Iniciativas voltadas à inovação tecnológica já vêm sendo testadas na região, com destaque para projetos-piloto de embarcações elétricas e híbridas conduzidos por instituições como a UFAM, o INPA e organizações como o WWF-Brasil. Esses estudos demonstram a viabilidade técnica do uso de fontes renováveis, como a energia solar, na propulsão de barcos de pequeno e médio porte, especialmente em rotas curtas e com menor demanda de carga.

No campo institucional, a literatura mostra que, embora o transporte hidroviário conste em planos nacionais, como o Plano Nacional de Logística e o Plano Amazônia Sustentável, ainda há pouca integração com ferramentas de análise ambiental como a ACV. As políticas públicas carecem de maior articulação entre entes federativos e de incentivos concretos à adoção de tecnologias sustentáveis. O déficit regulatório também surge como obstáculo relevante, sobretudo no licenciamento ambiental de embarcações e terminais (Barros, 2022).

Quanto à sistematização, a revisão reuniu 14 trabalhos entre artigos científicos, teses e relatórios institucionais. A maioria abordou quatro eixos: (i) impactos ambientais e sociais do transporte fluvial (2019; 2025); (ii) propostas de tecnologias alternativas, como eletrificação e energia solar (2019; 2021; 2022); (iii) aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida ao setor de transportes, ainda incipiente regionalmente (2025); e (iv) análises de políticas públicas e instrumentos de planejamento voltados à sustentabilidade (2020; 2025). Essa síntese evidencia lacunas, sobretudo na articulação entre evidências ambientais e decisões políticas, reforçando a necessidade de políticas mais integradas e baseadas em ciência.

4. DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam a centralidade do transporte fluvial na Amazônia, mas também desafios estruturais e ambientais que comprometem sua sustentabilidade. A literatura indica que a fase operacional das embarcações é a maior responsável pelas emissões de GEE, enquanto a precariedade da infraestrutura e a falta de regulação agravam a vulnerabilidade socioambiental. Esses achados reforçam a necessidade de incorporar metodologias como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ao planejamento estratégico.

A discussão também aponta que, embora haja avanços em projetos-piloto de embarcações elétricas e híbridas, sua implementação em larga escala enfrenta barreiras financeiras, institucionais e regulatórias. Nesse sentido, a ausência de mecanismos de financiamento estruturado e de incentivos fiscais direcionados limita a viabilidade da modernização da frota.

No Brasil, a aplicação em políticas públicas ainda enfrenta desafios, com lacunas na incorporação de evidências ambientais, muitas vezes subordinadas a critérios econômicos de curto prazo. Isso é particularmente evidente na Amazônia, onde a falta de dados locais e a baixa integração institucional comprometem a eficácia das políticas sustentáveis (Barros, 2022).

Além disso, as políticas públicas ainda não incorporam de forma consistente ferramentas de análise ambiental. A baixa articulação entre entes federativos e órgãos reguladores gera políticas fragmentadas, pouco alinhadas às especificidades regionais. Isso reforça a necessidade de abordagens multiescalares, integrando conhecimento científico, inovação tecnológica e participação comunitária para uma transição energética justa.

5. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que o transporte fluvial de passageiros na Amazônia, apesar de sua importância social e logística, depende fortemente de combustíveis fósseis e gera impactos ambientais significativos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é crucial para identificar pontos críticos e orientar políticas de descarbonização e modernização do setor.

Entre as contribuições, a literatura recente (2019–2025) evidencia avanços e lacunas em quatro eixos: impactos ambientais e sociais, tecnologias alternativas, aplicação da ACV e políticas públicas, com dificuldades na integração de dados ambientais aos processos decisórios. Como limitações, incluem análises setoriais de pequena escala, escassez de dados regionais e falta de estudos comparativos de custo-benefício das tecnologias energéticas aplicáveis ao transporte fluvial amazônico.

Para pesquisas futuras, sugere-se: (i) ampliar estudos de ACV com base em dados primários coletados junto a operadores locais; (ii) avaliar a viabilidade econômica e social da eletrificação da frota em diferentes cenários hidrológicos; (iii) investigar modelos de governança colaborativa que integrem comunidades ribeirinhas e órgãos públicos; e (iv) desenvolver análises prospectivas de políticas de incentivo, com foco em linhas de crédito verdes e mecanismos de financiamento climático.

Em síntese, a adoção de políticas públicas baseadas em evidências, sustentadas por ferramentas como a ACV, pode transformar o transporte fluvial amazônico em um vetor de sustentabilidade, inclusão social e resiliência climática, alinhando-se às metas globais de transição energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. *Diagnóstico do transporte hidroviário na Região Amazônica*. Brasília: ANTAQ, 2018.

BARROS, B. R. C. de. *Transporte hidroviário interior na Amazônia: avaliação sobre governança e sustentabilidade*. 2022. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: http://repositorio.unb.br/handle/10482/46161. Acesso em: 12 mai. 2025.

CARVALHO, T. *Eficiência energética no transporte aquaviário brasileiro*. Brasília: IEMA, 2020.

CHESTER, M.; HORVATH, A. Environmental assessment of passenger transportation modes in the United States. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 18, n. 3, p. 144–153, 2012.

FONTES, J. V. et al. Marine accidents in the Brazilian Amazon: an overview of causes and implications. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 3, 2023.

GADEPALLI, R. et al. Life-cycle assessment of passenger transport: an Indian case study. Paris: ITF/OECD, 2023.

Garcia, Breno Tostes de Gomes. Análise do Impacto da Variação Hidrológica no Ciclo de Vida do Transporte por Hidrovia de Interior: O Caso do Rio Madeira. 2025. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.pet.coppe.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/teses/2025. Acesso em: 18 de mai. 2025.

GARCÍA, K.; BLANCO, M. R. M. Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways. *Sustainability*, v. 11, n. 22, 6332, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/su11226332.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Toward more sustainable river transportation in remote regions of the Amazon, Brazil. *Applied Sciences*, v. 11, n. 21, p. 10298, 2021.

HUNT, J. D. et al. Cleaner engineering challenges for a South America waterway system. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 6, p. 100403, 2022.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE – IEMA. *O futuro da energia: cenários para a transição energética no Brasil*. São Paulo: IEMA, 2023.

MELO, R. F. et al. Machine learning predictive model for ship fuel consumption in the Amazon. *Journal of Cleaner Production*, v. 427, p. 139606, 2024.

Melo, R. F.; Figueiredo, N. M.; Tobias, M. S. G.; Afonso, P. A Machine Learning Predictive Model for Ship Fuel Consumption. Applied Sciences, v. 14, 7534 (2024).

WRI BRASIL. *O potencial do transporte fluvial sustentável na Amazônia*. São Paulo. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/. Acesso em: 19 abr. 2025.

WWF-BRASIL. *Guia para ampliar a mobilidade elétrica fluvial na Amazônia Legal*. Brasília. Disponível em: https://www.wwf.org.br/. Acesso em: 5 abr. 2025.

Guiler Oliveira Garcia Junior (guiler.junior@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brasil
Marcelino Aurelio Vieira da Silva (marcelino@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brasil

CONFIABILIDADE DOS DADOS DE SINISTROS E ESTRATÉGIAS PARA ANÁLISE ESPACIAL: APLICAÇÕES NO PROJETO DE AVALIAÇÃO DA FAIXA AZUL EM SÃO PAULO

Luis Fernando Meyer[1], **Beatriz Francisco**[1], **Mariana Novaski**[2], **João Pedro Araújo**[1], **Felipe Siqueira**[1]
[1]Instituto Cordial, [2]Bloomberg Initiative for Global Road Safety

RESUMO
Este artigo tem como objetivo apresentar os processos e métodos utilizados na transformação de dados de sinistros e do sistema viário e como eles foram utilizados dentro do projeto de avaliação de impacto da implantação de faixas de circulação dedicadas aos motociclistas (Faixa Azul) no município de São Paulo. Foi necessário analisar a base de sinistros do Infosiga-SP, e corrigir inconsistências entre endereços e coordenadas geográficas por meio de geocodificação com API do Google e reposicionamento espacial dos pontos no sistema viário. Os resultados revelaram discrepâncias sobre a localização dos sinistros, o que comprometeria análises espaciais mais precisas. As estratégias adotadas contribuíram para maior confiabilidade dos dados e evidenciam caminhos metodológicos para aprimorar a coleta e o uso de dados georreferenciados em políticas públicas voltadas à segurança viária.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A segurança viária vem ganhando cada vez mais destaque político e social como um campo que necessita de urgente avanço para enfrentar o número de mortes prematuras decorrentes de sinistros de trânsito. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), mais de 1,19 milhão de pessoas morrem todos os anos no trânsito no mundo (WHO, 2023) e pedestres, ciclistas e motociclistas representam quase metade dessas vítimas (OPAS).

Em 2023, o Brasil atingiu 34 mil óbitos decorrentes de lesões no trânsito, segundo o Sistema de Informação sobre Mortalidade do DATASUS (SIM/DATASUS), sendo o quarto ano consecutivo de aumento de mortes. Historicamente os pedestres eram as principais vítimas no trânsito no país e tomavam especial atenção do poder público (Instituto Cordial, 2024). Entretanto, a partir de 2013, os motociclistas ultrapassaram os pedestres e continuam crescendo, a cada ano, como as principais vítimas do trânsito no Brasil – em 2001 representavam quase 10% dos óbitos, passando para 40% em 2020 (Fundación MAPFRE, 2022). Hoje, esse grupo apresenta-se como um dos modos de maior atenção para a política pública e pressiona tanto os indicadores de segurança viária quanto o sistema de saúde. A essa preocupação soma-se o crescente aumento da frota e circulação de motocicletas nas cidades, relacionada a fatores como o incentivo de políticas fiscais para aquisição de veículos, a piora na qualidade do transporte público coletivo (Fundación MAPFRE, 2022), o uso socioeconômico (transporte de carga e pessoas) e a flexibilidade operacional (Instituto Cordial, 2023).

Na cidade de São Paulo, o número de motociclistas mortos superou o de pedestres pela primeira vez em 2019 e, após a pandemia de Covid-19, houve o agravo da sinistralidade envolvendo esses usuários (Instituto Cordial, 2024). Diante disso, o município implementou algumas estratégias voltadas à segurança desse modal. Em 2021, através do Plano de Metas 2021–2024, a Secretaria Municipal de Mobilidade e Trânsito (SMT) adotou a ampliação das ‘Frentes Seguras’, também conhecidos como ‘Motobox’, com o objetivo de criar uma área de espera para motociclistas em cruzamentos semaforizados e evitar conflitos com outros veículos – estratégia que resultou na redução de 20,5% no número de feridos graves e uma relação de benefícios 25 vezes superior ao seu custo (Luchesi e Meyer, 2021). Complementarmente, outras ações foram implementadas como a proibição da circulação de motocicletas nas pistas expressas das Marginais e a oferta de cursos para profissionais de motofrete e de pilotagem segura para motociclistas (Cruz, 2019).

Mais recentemente, em 2022, foi implantada uma nova intervenção, denominada Faixa Azul, cuja proposta consiste na criação de uma faixa destinada à circulação de motocicletas, sem caráter obrigatório ou exclusivo, na tentativa de “disciplinar – sem alterar – a atual dinâmica do trânsito entre automóveis e motocicletas” (CET, 2021). A experiência inicial foi autorizada junto à SENATRAN e realizada com sinalização em caráter experimental na Avenida 23 de Maio, uma das mais importantes da cidade. Hoje, conta com mais de 215 quilômetros de extensão em mais de 40 vias (CET, 2025), e outras cidades também já implantaram ou solicitaram aprovação para implantar um projeto semelhante ao modelo paulistano. Entretanto, apesar da intensa expansão do projeto experimental na cidade, cujos relatórios de monitoramento da prefeitura estimam, de forma não conclusiva, ser bem sucedida (São Paulo, 2025), ainda faltam estudos baseados em evidências e com um universo amostral estatisticamente razoável que comprovem a eficácia

dessa intervenção e que se aprofundem em outros fatores como os contextos em que ela deve ser aplicada ou as ações complementares que devem ser realizadas. Cabe ressaltar que a cidade de São Paulo já implantou outras duas experiências semelhantes de faixas exclusivas para motociclistas, e que resultaram no aumento de sinistros em quase 87% após um ano de sua implantação (CET, 2014) e precisaram ser retiradas.

Por conta disso, o estudo "Avaliação de impacto da implantação de faixas de circulação dedicadas aos motociclistas (Faixa Azul) no Município de São Paulo" tem como objetivo avaliar os efeitos da política da Faixa Azul na segurança viária, especialmente para os motociclistas. O estudo apresenta-se como uma oportunidade para fornecer subsídios metodológicos da avaliação de faixas dedicadas para motocicletas, considerando sua importância política e nacional, e está baseado em abordagens metodológicas em torno da inferência causal: análise de série temporal e diferença-nas-diferenças, a fim de identificar a mudança da intervenção antes e depois de sua implantação. Para isso, foram utilizadas algumas fontes de dados sobre o sistema viário e base de sinistros envolvendo motociclistas. Este artigo irá apresentar e discutir algumas estratégias para a qualificação de bases para análises de políticas públicas e suas aplicações no contexto do estudo.

2. MÉTODO

Para a análise de séries temporais, foram utilizados os dados do Sistema de Informações Gerenciais de Sinistros de Trânsito (Infosiga-SP). Coordenado pelo Departamento de Trânsito do Estado de São Paulo (DETRAN-SP), o Infosiga é atualmente a principal base de dados sobre segurança viária no estado de São Paulo, além de ser uma importante referência de avanço na gestão e monitoramento dos sinistros de trânsito em nível estadual (Carneiro e Battistella, 2019). O sistema é alimentado por diferentes fontes de dados de esferas estaduais e federais (Figura 1), disponibilizados mensalmente, e possui bases sobre o sinistro (localização, data e hora da ocorrência, tipo de via, etc), o veículo (modelo, marca, ano) e a vítima (sexo, idade, profissão), que podem ser tabuladas entre si. Para o projeto, são analisados os dados disponíveis desde janeiro de 2021 (considerando um ano antes da primeira implantação da 'Faixa Azul') e coletados mensalmente por meio da plataforma de dados abertos (http://www.infosiga.sp.gov.br). Essa coleta foi automatizada via *web scraping* e complementada com *scripts* de processamento desenvolvidos pela equipe, garantindo uma coleta sistemática dos dados e o processamento e consolidação mensal deles para a pesquisa.

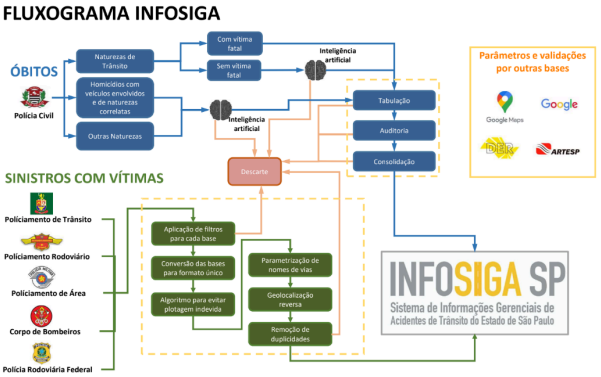


Figura 1: Fluxograma de fontes e tratamento de dados do Infosiga-SP. Fonte: DETRAN-SP.

Para contextualizar os dados de sinistros no ambiente urbano, além da camada de sinistralidade, é fundamental incorporar às análises outros dados sobre o território – por exemplo, um sinistro que ocorre em um cruzamento possui características distintas daqueles que ocorrem em meios de quadra, assim como aqueles que ocorrem em cruzamentos semaforizados são distintos daqueles sem semáforo. Para isso, a base de sinistros do Infosiga foi pareada com outras bases urbanas. Essa leitura foi possível pela utilização de uma metodologia de interpretação do território (Meyer, 2019) criada para facilitar a leitura e as análises de segurança viária. Essa metodologia parte do princípio que as características de cada localização na malha viária não são homogêneas, devendo a geometria da via ser inicialmente dividida entre dois tipos de lugares geométricos "estruturais": interseções e meios de quadra (Figura 2). O desenho dos estruturais é traçado por algoritmos de geoprocessamento onde, a partir da geometria formada pelo encontro dos eixos viários, é determinada uma área de influência do cruzamento, nomeada de interseção, e o espaço complementar é

classificado como meio de quadra. A partir deste recorte inicial, são realizados pareamentos geoespaciais com outros dados, como a localização de semáforos, de corredores de ônibus e de hierarquia viária (Tabela 1), para finalmente agregá-los tanto aos sinistros como à identificação de vias que fazem parte do Grupo de Comparação para aplicação da análise por diferença-nas-diferenças.

Tabela 1: Variáveis dos estruturais

Interseção	Meio de quadra
Tipo de cruzamento (T, X, Complexo)	Largura da via
Número de aproximações	Número de faixas
Hierarquia viária	Hierarquia viária
Presença de semáforo	Presença de semáforo
Presença de linha de ônibus	Presença de linha de ônibus
Presença de infraestrutura para ônibus	Presença de infraestrutura para ônibus
Presença de infraestrutura cicloviária	Presença de infraestrutura cicloviária
Presença de radar	Presença de radar
Presença de Faixa Azul	Presença de Faixa Azul
-	Comprimento da quadra
-	Mediana da calçada



Figura 2: Divisão dos elementos estruturais em meio de quadra e interseção. Fonte: Instituto Cordial.

Sendo assim, a precisão da informação geoespacial de cada sinistro é de suma importância para o pareamento adequado de informações e, consequentemente, às análises do estudo. Para tanto, foi importante avaliar a informação disponível da localização do sinistro na base do Infosiga, possível de ser identificada a partir de duas variáveis: endereço (‘logradouro’ e ‘número/km’) e coordenadas geográficas (‘latitude’ e ‘longitude’). A princípio, ambas as variáveis deveriam indicar o mesmo local, mas foram identificadas inconsistências entre as duas informações, principalmente em registros de sinistros não fatais. Para avaliar essa questão, foram coletadas amostras aleatórias de registros não fatais da base de sinistros consolidada do Infosiga, com diferentes quantidades de registros, e feitos diferentes processos de geocodificação dos registros a partir do campo logradouro – via Google Sheets, OpenStreetMaps e API do Google Maps. Em seguida, comparou-se a coordenada geográfica original do Infosiga com os pontos obtidos por geocodificação, a partir do campo ‘logradouro’, e calculou-se a distância entre os pares em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Esse processo permitiu avaliar a acurácia da localização dos registros e entender os limites e o grau de confiabilidade das informações disponíveis.

3. RESULTADOS

Como resultados, observou-se que, em média, 47% dos registros não fatais da base do Infosiga não possuíam a mesma informação do logradouro e coordenadas geográficas dentro de um raio de 100 metros, a depender do método de geocodificação adotado. Este raio foi considerado por representar o tamanho padrão mínimo de uma quadra viária e, consequentemente, de um ‘par’ dos estruturais (interseção e meio de quadra). Se as informações estiverem a mais de 100 metros de distância, é possível que o sinistro possa ser associado a um diferente estrutural e analisado em um contexto diferente. Parte dessa diferença pode ser atribuída a um problema de preenchimento do campo de logradouro, uma vez que muitos desses registros apresentam números de lote fictícios ou genéricos, como "0", "1", "10" ou "100", ou seja, acabam não indicando um local real – sabe-se que o campo “logradouro” é obrigatório no momento do registro do boletim de

ocorrência e, por isso, é possível que os responsáveis por essas informações preencham o campo dessa forma para cumprir o protocolo e agilizar o trabalho *in locu*. Além disso, outros registros possuem descrições vagas, como "acesso à", principalmente em vias como as Marginais, o que compromete a precisão da geocodificação. Em contrapartida, não há informações disponíveis sobre como são coletadas as coordenadas geográficas na base do Infosiga.

Com o objetivo de avaliar um possível potencial de melhoria dessas informações, foram consultados, do recorte amostral, os boletins de ocorrência na íntegra relativos aos registros com logradouros incompletos ou genéricos. A análise indicou que, mesmo com acesso ao boletim completo, apenas 12% dos casos com esses endereços poderiam ser significativamente aprimorados pelo campo de descrição da ocorrência, ou seja, essa informação complementar do logradouro só poderia ser encontrada em 12% dos casos. Esses achados reforçam a limitação do processo de estruturação do banco de dados para análises geoespaciais e a necessidade de refletir sobre métodos complementares de georreferenciamento.

A partir desse cenário, foi importante padronizar a base de dados do projeto e assegurar maior consistência nas análises. Por sugestão da própria equipe técnica do Infosiga, foi preciso refazer o geoprocessamento da localização dos sinistros com base no campo de logradouro. A API utilizada foi a do Google Maps, por ser uma base bastante consolidada, além de ser utilizada pela equipe técnica do Infosiga (Figura 1). Essa etapa possibilitou o georreferenciamento mais confiável dos registros e, considerando que a unidade básica de análise do projeto é a via em seu recorte longitudinal, permite certo grau de agregação espacial independentemente da numeração do lote de frente à ocorrência. Para as análises que exigem maior detalhamento da localização do sinistro (em interseções ou meios de quadra específicas), os registros com endereços insuficientes ou inconsistentes foram desconsiderados para preservar a robustez dos resultados.

Além do reprocessamento dos endereços via API do Google, foi importante fazer o reposicionamento espacial dos pontos de sinistro, uma vez que o processo de geocodificação comumente associa o endereço disponibilizado ao centróide do lote fiscal, apesar dos sinistros ocorrerem no sistema viário. Para corrigir essa imprecisão, cada ponto foi reposicionado com o menor deslocamento possível, primeiro para a face do lote originalmente associado ao endereço e depois para o limite externo da quadra viária (Figuras 3 e 4). Esse processo é importante principalmente em lotes extensos ou próximos de esquinas, onde um reposicionamento simples poderia redirecionar o ponto para a face errada. Com essa estratégia, buscou-se preservar a coerência entre o ponto e o logradouro da ocorrência do sinistro, priorizando a integridade espacial da informação para as análises baseadas na malha viária.



Figuras 3 e 4: Ilustração do processo de reposicionamento de sinistros após a geocodificação dos endereços da base do Infosiga. Fonte: Instituto Cordial.

4. DISCUSSÃO

A análise da base de dados do Infosiga-SP revelou algumas limitações relacionadas à confiabilidade da informação geográfica, através da verificação do campo textual e geográfico, e possíveis potenciais de melhoria, cruzando-a com os boletins de ocorrência na íntegra. A inconsistência entre os campos de logradouro e coordenadas geográficas mostram a necessidade de entender mais sobre o processo de coleta da informação da localização dos sinistros de forma sistêmica, para melhorar não só o registro da ocorrência em si, mas também garantir que as variáveis possam ser usadas com maior confiabilidade em análises territoriais

sobre segurança viária. Apesar de não serem objeto de estudo deste projeto em específico, vale ressaltar que essa reflexão se torna ainda mais importante em locais mais complexos de georreferenciamento, como obras de arte (pontes, viadutos e túneis) e rodovias, que não possuem lotes fiscais para referência.

Como contribuição metodológica, este trabalho também aplicou estratégias complementares para melhorar a qualidade da informação geográfica, através da metodologia da criação dos chamados "estruturais", do reprocessamento dos endereços pela geocodificação com a API do Google e do reposicionamento dos pontos de sinistros para o sistema viário. Essas ações permitiram consolidar uma base mais confiável, adaptada às necessidades do projeto, ao mesmo tempo em que evidenciaram caminhos possíveis para aprimorar a coleta e consolidação de dados utilizados para políticas públicas de segurança viária.

Agradecimentos
Esta pesquisa foi financiada com recursos da *Bloomberg Philanthropies Initiative for Global Road Safety* e aprovada pela *Biomedical Research Alliance of New York* (Protocol 24-410-522). Agradecemos ao Mateus Humberto (Universidade de São Paulo) pelas contribuições por meio da leitura crítica deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carneiro, L. P. e L. R. Battistella (2019). Two innovative Brazilian programs relating to road safety prevention: A case study. *Sao Paulo Medical Journal*, 137, 2–7. https://doi.org/10.1590/1516-3180.2019.137150319lpc.

CET (2014). *Faixas Exclusivas de Motocicletas - Resultados da Experiência de Implantação para a Segurança Viária em São Paulo*. Disponível em: http://bit.ly/468ZJ6K (acesso em: 09/07/2025).

CET (2021). *Campanha Educativa "Faixa Azul"*. Disponível em https://www.cetsp.com.br/media/1206265/apresentacao_faixa_azul.pdf (acesso em: 08/07/2025).

CET (2025). *Faixa Azul: Informações gerais*. Disponível em: https://www.cetsp.com.br/consultas/faixa-azul/informacoes-gerais.aspx (acesso em: 09/07/2025).

Cruz, M. M. L. (2019). *Acidentes de trânsito com motocicletas: Uma visão do cenário e das propostas de solução no Brasil e no mundo.* São Paulo: CET, 2019. 96 p. (Boletim Técnico da CET, 61). Disponível em: https://www.cetsp.com.br/media/936406/bt-61-2-.pdf (acesso em 09/09/2025).

DATASUS. *Óbitos por causas externas*. Ministério da Saúde, [s.l.], 2023. Disponível em: http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sim/cnv/pext10uf.def (acesso em: 08/07/2025).

Fundación MAPFRE (2022). *Sistemas Seguros e Visão Zero no Brasil: seu impacto na primeira Década de Ação pela Segurança do Trânsito da ONU*. Estudo. São Paulo: Fundación MAPFRE, 2022. Disponível em: https://bit.ly/44JpOXH (acesso em: 04/07/2025).

Instituto Cordial (2023). *Fatores de risco para motociclistas no Brasil*. Estudo. São Paulo: Instituto Cordial, 2023. Disponível em: https://bit.ly/4nNlYp8 (acesso em: 07/07/2025).

Instituto Cordial (2024). *Segurança Viária e Transporte de passageiros em motocicleta em quatro capitais do Brasil: Fortaleza, São Paulo, Rio de Janeiro e Manaus*. Estudo. São Paulo: Instituto Cordial, 2024. Disponível em: https://lp2.institutocordial.com.br/pbm-203-uber-moto (acesso em: 07/07/2025).

Luchesi, S. e L. F. V. Meyer (2021). *Avaliação custo-efetividade e custo-benefício de intervenções na cidade de São Paulo: MULV e Frente Segura*. Painel da Segurança Viária. Ciclo 2021. Working Paper. São Paulo: Instituto Cordial, 2021. Disponível em: http://bit.ly/40OCcnX (acesso em 08/07/2025).

Meyer, L. F. V. (Coord.) (2019). Análises territoriais para o Plano de Segurança Viária de São Paulo: Relatório final. 5ª versão. São Paulo: Instituto Cordial, 2019. Disponível em: http://bit.ly/3GLTBa5 (acesso em 14/07/2025).

OPAS. *Segurança no trânsito*. Disponível em: https://bit.ly/4eTleec (acesso em: 08/07/2025).

São Paulo (Município) (2025). Companhia de Engenharia de Tráfego. *Relatório de monitoramento da Faixa Azul (todos os trechos)*. Documento obtido via Lei de Acesso à Informação. Protocolo nº 088468. São Paulo, 28/05/2025.

WHO (2023). *Global status report on road safety 2023.* [s.l.] World Health Organization, 2023. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517 (acesso em: 08/07/2025).

Luis Fernando Villaça Meyer (luisfernando@institutocordial.com.br)
Instituto Cordial. Rua Natingui, 1302. Vila Madalena, São Paulo-SP.
Beatriz de Jesus Gonçalves Francisco (beatriz.francisco@institutocordial.com.br)
Instituto Cordial. Rua Natingui, 1302. Vila Madalena, São Paulo-SP.
Mariana Novaski (mnovaski@bigrs.org)
Bloomberg Initiative for Global Road Safety.
João Pedro Silva Araújo (joao.araujo@institutocordial.com.br)
Instituto Cordial. Rua Natingui, 1302. Vila Madalena, São Paulo-SP.
Felipe de Souza Siqueira (felipe.siqueira@institutocordial.com.br)
Instituto Cordial. Rua Natingui, 1302. Vila Madalena, São Paulo-SP.

CRITÉRIOS PARA A CRIAÇÃO DE PONTOS DE PARADA E DESCANSO PARA CAMINHONEIROS EM RODOVIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Alan Medeiros Otani[1], Sérgio Ronaldo Granemann[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
O Brasil tem atualmente oito pontos de parada e descanso para caminhoneiros em rodovias federais, que somam 804 vagas de estacionamento para veículos de carga. Novas áreas deverão ser construídas de acordo com a agência reguladora de transportes terrestres. Este artigo científico realizou uma revisão sistemática da literatura para identificar os principais fatores que devem ser considerados para a criação de locais para o estacionamento de caminhões em rodovias. O objetivo foi investigar quais critérios são importantes para modelar a infraestrutura de futuros pontos de parada e descanso aos caminhoneiros brasileiros. A pesquisa analisou artigos por meio da base de dados *Web of Science* publicados em periódicos das áreas de transporte e tecnologia de transportes. Os resultados mostram que estudos para analisar comportamentos dos caminhoneiros são necessários, assim como tecnologias e modelos matemáticos para identificar localização, quantidade e disponibilidade de vagas e repassar informações aos motoristas.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a construção de pontos de parada e descanso (PPDs) em rodovias federais pelas concessionárias de pedágio para motoristas profissionais do transporte de cargas foi estabelecida pela Lei nº 13.103/2015. No entanto, uma década depois da sanção da lei, somente oito PPDs foram entregues (Ministério dos Transportes, 2025). Em 2024, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), visando a ampliação desse número, regulamentou os PPDs com a Resolução nº 6.054/2024 (Antt, 2024). A norma obriga cada concessionária a elaborar estudo locacional da rodovia concedida que indique a demanda efetiva e potencial para PPD, os fluxos atuais e projetados de transporte de cargas, a quantidade de vagas por PPD, a localização das áreas para construção e a quantidade de PPDs necessária de cada trecho concedido, com a indicação da distância máxima entre cada ponto. A depender do modelo de PPD, a construção das estruturas deverá ocorrer entre três e cinco anos, a contar a partir da assinatura de novos contratos ou do aditamento de contratos antigos (Antt, 2024).

A contemporaneidade do tema, a insuficiência de infraestrutura para caminhoneiros e a recente obrigatoriedade imposta pela ANTT tornam evidente a lacuna que existe em relação a como os PPDs devem ser construídos pelas concessionárias. Diante disso, o presente artigo realizou uma revisão sistemática na literatura para identificar os principais fatores que devem ser considerados para a criação de PPDs em rodovias. O objetivo é investigar quais critérios são importantes para caracterizar a infraestrutura de futuros pontos de parada e descanso para caminhoneiros brasileiros. Os resultados poderão oferecer *insights* para que concessionárias de rodovias e a ANTT estabeleçam estratégias para que a política pública em prol de caminhoneiros seja ampliada.

2. MÉTODO

Para a pesquisa utilizou-se o Protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), reconhecido como um avanço conceitual e prático às revisões sistemáticas (Moher *et al*., 2009), e a base de dados *Web of Science*, que compreende "recursos de busca disponíveis, precisão dos metadados e multidisciplinaridade e abrangência dos títulos indexados" (Rodrigues *et al*., 2023). Foi selecionada uma *string* de busca (sequência de caracteres, palavras-chaves, expressões e símbolos), em janeiro de 2025, recorrendo-se aos operadores booleanos *and* e *or* por tópico (TS), formando uma sequência de caracteres com as palavras-chave da pesquisa: TS=(("*truck driver*" OR "*truck*" *OR "trucker") AND ("rest" OR "stop" OR "stopping point" OR "highway parking*" *OR "rest places" OR "rest areas")*).

A base de dados listou 639 resultados, entretanto, como estratégia de seleção de estudos, no refino desses resultados foram mantidos somente artigos publicados em periódicos correlatos ao tema, com os filtros nas categorias transporte e tecnologia de ciência de transporte, que são os critérios para a inclusão e exclusão de temas, a fim de buscar qualidade para a realização da revisão sistemática.

Após a filtragem, 160 artigos foram listados e analisados a partir dos respectivos títulos e resumos. Nessa análise, foram excluídos artigos com propostas de estudo estranhas ao interesse deste artigo: infraestrutura de abastecimento de caminhões elétricos em pontos de descanso; paradas de veículos em cruzamentos, vias urbanas, rotatórias e em pesagem; análises de pavimento e padrões de velocidade; relatórios sobre acidentes e

consumo de bebidas alcoólicas. Essa etapa resultou em uma seleção de 23 artigos, que foram lidos para análise. Diante desse número, não foram aplicados filtros para recorte temporal nem de limitação por idioma.

A Tabela 1 associa a literatura com critérios relacionados a infraestrutura de pontos de parada e descanso em rodovias que foram encontrados nos respectivos estudos: disponibilidade de vagas (A); taxa de ocupação das vagas (B); localização (C); uso de tecnologias (D); oferta de serviços (E); distância de outros locais com estacionamento (F); acessibilidade (G); fornecimento de dados (H); e difusão de informações online (I). A marcação "X" nas colunas significa que o tema consta no respectivo estudo do(s) autor(es) citado(s) na linha.

Tabela 1: principais critérios encontrados na literatura para a definição de infraestrutura de pontos de parada e descanso

Autor(es)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Goel & Kumar (2024)	X				X				
Casey *et al*. (2024)					X		X		
Pilz *et al*. (2022)	X	X		X					X
Eskandarzadeh & Fahimnia (2022)			X				X		
Gutmann *et al*. (2021)	X	X						X	
Vital & Ioannou (2021)	X							X	
Csendes *et al*. (2021)	X	X	X				X	X	
Mayerle *et al*. (2020)				X		X		X	
Nevland *et al*. (2020)	X		X	X			X	X	X
Corro *et al*. (2019)	X	X		X	X			X	
Bunn *et al*. (2019)	X		X			X			X
Mahajan *et al*. (2019)									
Haque *et al*. (2017)		X	X	X			X		
Gingerich *et al*. (2016)	X			X					
Bayraktar *et al*. (2015)	X	X						X	X
Chen & Xie (2014a)		X			X				
Chen & Xie (2014b)		X							
Rancourt *et al*. (2013)				X		X			
Sun *et al*. (2013)	X	X			X				
Todd *et al*. (2013)					X	X	X		
McCartt *et al*. (2008)			X						
Morris *et al*. (2007)			X			X			
Chatterjee & Wegmann (2000)	X	X					X		

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A capacidade e a disponibilidade de estacionamento são considerações relevantes para caminhoneiros na definição de rotas (Sun *et al*., 2013). Nesse sentido, problemas para localizar vagas de estacionamento estão entre fatores que aumentam as chances de violações frequentes de regras sobre tempo de direção e descanso pelos caminhoneiros (Mccartt *et al*., 2008). No Brasil, Mayerle *et al.* (2020) estudaram a Lei nº13103/2015, que regulamenta o tempo de direção e descanso dos caminhoneiros, e classificaram como esparsa a distribuição de locais de repouso no país. Os autores defendem o desenvolvimento de tecnologias a partir de formulações matemáticas e projeções com algoritmos para identificar os locais e, assim, buscar eficiência no transporte e segurança nas rodovias.

Sob essa ótica, Rancourt *et al*. (2013) já sugeriam benefícios quanto ao uso de técnicas de programação sofisticadas para planejar transporte de longa distância nos Estados Unidos, incluindo paradas para descanso e repouso dos caminhoneiros. E oito anos depois dessa pesquisa, Gutmann *et al*. (2021) constataram que os estudos sobre previsões de ocupação de vagas de estacionamento de caminhões ainda eram poucos.

Além da quantidade e disponibilidade de vagas, a localização de áreas para pausas no transporte de cargas impacta planejamentos internos das transportadoras e contribuem para tomadas de decisão diante de perspectivas de tráfego na rodovia (Eskandarzadeh e Fahimnia, 2022). Morris *et al*. (2007) notaram que restrições de localização de áreas para descanso podem afetar a produtividade operacional do transporte de

cargas, principalmente de alimentos e produtos perigosos.

A questão da localização das áreas de descanso pode também ser um fator atenuante ou agravante em relação a acidentes envolvendo caminhoneiros com sonolência e/ou fadiga, no sentido de que a incidência dessas causas tende a aumentar à medida que aumenta o tempo de direção noturna dos motoristas devido a distâncias maiores percorridas até a parada para descanso (Bunn *et al*., 2019). Nessa perspectiva, Nevland *et al*. (2020) propuseram um modelo de classificação de localização de estacionamento nos Estados Unidos e Canadá, que considerou identificar características mais importantes para instalação de áreas, como legalidade, acessibilidade e propriedade. O modelo utilizou dados públicos sobre uso de solo e multas por estacionamento irregular e constatou que à medida em que a disponibilidade de informações aumenta, melhora a precisão para definir áreas para estacionamento de caminhões, o que pode levar a uma tomada de decisões mais bem fundamentada (Nevland *et al*., 2020).

Sensores sem fio instalados em solo para detectar a presença de veículos estacionados e transmitir a informação para bancos de dados pela internet podem melhorar o gerenciamento de estacionamento a partir do acesso dessas informações pelos caminhoneiros por meio de plataformas e dispositivos, como celulares (Bayraktar *et al*., 2015). Vital e Ioannou (2021) reforçam a importância de o caminhoneiro e as empresas de transporte deterem informações relacionadas à disponibilidade de estacionamento para estabelecerem rotas de viagens conforme trajetos disponíveis. Reservar vagas por meio de plataforma tecnológica, com a possibilidade de alterações a partir de rastreamento por GPS (Sistema de Posicionamento Global), pode reduzir significativamente os impactos negativos da escassez de estacionamentos para caminhões (Pilz *et at*., 2022).

Já o estudo de Corro *et al*. (2019) utilizou a contagem manual do Departamento de Transportes do Arkansas, nos Estados Unidos, do número de caminhões estacionados em 102 pontos de parada públicos e privados naquele estado, além de rampas de entrada e saída nas rodovias, durante uma mesma semana a cada ano. Comparando os dados com informações de GPS, foi possível perceber que fatores como horários e dias com superlotação e tempos de permanência, obtidos por meio dessa tecnologia, têm potencial de ampliar resultados de pesquisas observacionais e, assim, melhorar planejamentos de governo quanto a instalações de estacionamento para caminhões. Uma ponderação sobre o uso de dados de GPS para investigar áreas de descanso é feita no estudo de Gingerich *et al*. (2016), mostrando que é necessário distinguir paradas para carregamento e descarregamento de caminhões das paradas para descanso do motorista e/ou abastecimento e manutenção do caminhão.

Dados obtidos a partir de GPS também foram utilizados na pesquisa de Haque *et al*. (2019), nos Estados Unidos, para desenvolver fatores e modelos de utilização dos estacionamentos para caminhões. O estudo identificou que violações de rampas de acesso e saída das áreas de descanso prejudicam o uso do estacionamento para caminhões. Nesse contexto, Csendes *et al*. (2021) analisaram 434 locais de descanso para caminhoneiros na Hungria e constataram que as áreas com maior número de paradas se concentram nas proximidades da capital Budapeste, centro econômico do país. Os pesquisadores notaram a tendência de caminhoneiros estacionarem fora dos espaços apropriados, como em saída dos pontos de parada, como indicativo de saturação das áreas de descanso e consequente risco à segurança para demais motoristas. A superlotação de vagas também ocasiona o estacionamento em cruzamentos de rampas de acesso e inclusive ao longo de faixas de passagem (Chatterjee e Wegmann, 2000).

O campo de pesquisa de Goel e Kumar (2024) foi o norte da Índia e os pesquisadores analisaram respostas de 247 caminhoneiros a um questionário sobre área de descanso às margens das rodovias em uma perspectiva de comportamento de consumo dos transportadores. O fator funcional é o mais importante para os caminhoneiros diante dos outros valores de consumo – social, emocional, epistêmico e condicional (Goel e Kumar, 2024). Sob esse prisma da funcionalidade, o estudo de Todd *et al*. (2013) identificou que caminhoneiros geralmente preferem áreas de descanso que tenham acesso mais fácil à rodovia diante de necessidades básicas, como para uso do banheiro, e que existe tendência de alteração de rota quando a área de descanso não está disponível.

A identificação de comportamentos em parada de descanso pode levar a um melhor gerenciamento sobre a fadiga aos motoristas de caminhão (Casey *et al*., 2024). No entanto, Chen e Xie (2014a) alertam que o uso do tempo de descanso para a prática de atividades recreativas pode não ajudar os motoristas a se recuperarem da

fadiga, o que pode ser considerado em questões relacionadas às ofertas de prestações de serviços em áreas de descanso. Por outro lado, a existência ou não de áreas de descanso parece poder ser desconsiderada mediante à pressão grande por parte de empresas de frete para que o caminhoneiro cumpra carga horária acima do limite permitido, principalmente perante incentivos financeiros, o que pode resultar em um comportamento de risco pelo profissional devido à condução com sonolência (Mahajan *et al*., 2019). Ainda nessa perspectiva, Chen e Xie (2014b) constataram que caminhoneiros podem não querer fazer muitas pausas para descanso em viagens com menos de dez horas para que essas paradas não prejudiquem o cumprimento de horários.

4. CONCLUSÃO

Percorrido o estado da arte, é possível concluir que a definição de um local para construção de um PPDs pode considerar diferentes comportamentos dos caminhoneiros, como o descumprimento de legislações acerca do tempo de direção e do período de descanso e a prática de parar caminhões em áreas inadequadas. Ou seja, o estudo locacional de cada concessionária poderia se basear em pesquisas e estatísticas sobre a incidência dessas infrações nos trechos concedidos como um critério para contribuir à tomada de decisão sobre onde instalar um ponto de parada e descanso.

Critérios como a proximidade de regiões com maior tráfego de caminhões, a facilidade de acesso ao local e a distância entre estacionamentos de veículos de carga despontaram como importantes à definição da localização dos PPDs. Já os estudos de tráfego, modelos matemáticos e estatísticos e tecnologias de rastreamento para mapear vagas disponíveis, contar a quantidade de veículos estacionados, indicar períodos de superlotação e tempo de permanência dos caminhões se apresentam como critérios ainda mais impactantes para definir infraestruturas de futuros pontos de parada e descanso.

Nesse sentido, parece ser imprescindível considerar critérios sobre localização e disponibilidade de vagas ao se planejar uma nova área para estacionamento de caminhões, além de estabelecer estratégias para informar motoristas e transportadoras, pois foi possível identificar a lacuna que ainda existe sobre formas de perceber e prever a ocupação de vagas em pontos de parada e descanso em tempo real.

São limitações do artigo o uso de apenas uma base de dados e a análise ser exclusiva de artigos científicos publicados em periódicos relacionados à área de transporte e de tecnologia de transporte. Sugere-se para pesquisas futuras a expansão do alcance a partir da busca em outras bases de dados, com atenção também a artigos de conferências e congressos, dissertações e teses sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2024. Resolução n°6.054/2024. Disponível em: anttlegis.antt.gov.br/action/UrlPublicasAction.php?acao=abrirAtoPublico&sgl_tipo=RES&num_ato=00006054&seq_ato=000&vlr_ano=2024&sgl_orgao=DG/ANTT/MT&cod_modulo=623&cod_menu=9230 (acesso em 24/06/2025).

Bayraktar, M.; H. Ozen e G. Tuxen (2014). Smart Parking-Management System for Commercial Vehicle Parking at Public Rest Areas. *Journal of Transportation Engineering*, v. 141. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000756

Bunn, T. L.; S. Slavova e P. J. Rock (2019). Association between commercial vehicle driver at-fault crashes involving sleepiness/fatigue and proximity to rest areas and truck stops. *Accident Analysis and Prevention*, v.126, p. 3-9. DOI: 10.1016/j.aap.2017.11.022

Casey, G. J.; T. Miles-Johnson e G. J. Stevens (2024). Heavy vehicle driver fatigue: Observing work and rest behaviours of truck drivers in Australia. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, v.104, p. 136-153. DOI: 10.1016/j.trf.2024.05.016

Chatterjee, A. e F. J. Wegmann (2000). Overnight truck parking along Tennessee's interstate highways and rest areas. Highway and Traffic Safety Engineering, Evaluation, and Enforcement; *Trucking and Motorcycles Sarrow*, v. 1734, p. 64-68. DOI: 10.3141/1734-10

Chen, C. e Y. Xie (2014a). The impacts of multiple rest-break periods on commercial truck driver's crash risk. *Journal Of Safety* Research v. 48, p.87-93. DOI: 10.1016/j.jsr.2013.12.003

Chen, C. e Y. Xie (2014b). Modeling the safety impacts of driving hours and rest breaks on truck drivers considering time-dependent covariates. *Journal Of Safety Research*, v. 51, p. 57-63. DOI: 10.1016/j.jsr.2014.09.006

Corro, K. D.; T. Akter e S. Hernandez (2019). Comparison of Overnight Truck Parking Counts with GPS-Derived Counts for Truck Parking Facility Utilization Analysis. *Transportation Research Record*, v. 2673, p. 377-387. DOI: 10.1177/0361198119843851

Csendes, B; G. Albert; N. Szander e A. Munkácsy (2021). Where Truck Drivers Stop – Application Of Vehicle Tracking

Data For The Identification Of Rest Locations And Driving Patterns. *Promet–Traffic & Transportation*, v. 33, p. 821-832. DOI: 10.7307/ptt.v33i6.3962

Eskandarzadeh, S. e B. Fahimnia (2022). Rest break policy comparison for heavy vehicle drivers in Australia. *Transportation Research Part E-Logistics And Transportation*, v. 159. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102518

Gingerich, K; H. Maoh e W. Anderson (2016). Classifying the purpose of stopped truck events: An application of entropy to GPS data. *Transportation Research Part C – Emerging Technologies*, v. 64, p. 17-27. DOI: 10.1016/j.trc.2016.01.002

Goel, P e A. Kumar (2024). Investigating how consumption values and place identity shape long-haul truck drivers' intention to visit roadside rest areas. *Transportation Research Part A-Policy and Practic,* v. 190. DOI: 10.1016/j.tra.2024.104265

Gutmann, S; C. Maget; M. Spangler e K. Bogenberger (2021). Truck Parking Occupancy Prediction: XGBoost-LSTM Model Fusion. *Frontiers In Future Transportation*, v. 2. DOI: 10.3389/ffutr.2021.693708

Haque, K; S. Mishra; R. Paleti; M. M. Golias; A. A. Sarker e K. Pujats (2017). Truck Parking Utilization Analysis Using GPS Data. *Journal of Transportation Engineering part A: Systems Sarrow*, v. 143. DOI: 10.1061/JTEPBS.0000073

Mahajan, K; N. R.Velaga; A. Kumar; A. Choudhary e P. Choudhary (2019). Effects of driver work-rest patterns, lifestyle and payment incentives on long-haul truck driver sleepiness. *Transportation Research Part F- Traffic Psychology and Behaviour*, v. 60, p.366-382. DOI: 10.1016/j.trf.2018.10.028

Mayerle, S. F.; D. M. G. Chiroli; J. N. Figueiredo e H. F. Rodrigues (2020). The long-haul full-load vehicle routing and truck driver scheduling problem with intermediate stops: An economic impact evaluation of Brazilian policy. *Transportation Research Part A-Policy and Practice,* v.140, p. 36-51. DOI: 10.1016/j.tra.2020.07.021

McCartt, A.T.; L. A. Hellinga e M. G. Solomon. (2008) Work Schedules of Long-Distance Truck Drivers Before and After 2004 Hours-of-Service Rule Change. *Traffic Injury Prevention*, v. 9 (3), p.201-210. DOI: 10.1080/15389580802040287

Ministério dos Transportes (2025). Pontos de Parada e Descanso – PPD. Disponível em: app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjVmYWUyNmQtYmY4OC00YTYyL%20WE4MjctZTYzOTY3ZmVmNjI0IiwidCI6IjdiZjAxYzZhLWU2ZmItNDIxYS1iYmIyL%20WI5MGMzZWE4NjhmNyJ9 (acesso em 24/06/2025).

Moher D; A. Liberati; J. Tetzlaff e D. G. Altman (2009) Group PPreferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med 6*, v. 3. e123-130. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.005

Morris, S. M.; A. L. Erera e C. C. White (2007). Impact of designated secure rest facilities an single-lane truck-dispatching productivity. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, v. 2032, p. 35-42. DOI: 10.3141/2032-05

Nevland, E. A.; K. Gingerich e P. Y. Park (2020). A data-driven systematic approach for identifying and classifying long-haul truck parking locations. *Transport Policy*, v. 96, p. 48-59. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.04.003

Pilz, D; S. Schwerdfeger e N. Boysen (2022). Make or break: Coordinated assignment of parking space for breaks and rest periods in long-haul trucking. *Transportation Research Part B-Methodological*, v.164, p. 45-64. DOI: 10.1016/j.trb.2022.08.002

Presidência da República. Lei nº 13.103, de 2 de março de 2015. Revoga a Lei nº12.619, de 30 de abril de 2012, e altera a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, Código de Trânsito Brasileiro – CTB. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015- 2018/2015/lei/l13103.htm (acesso em 24/06/2025).

Rancourt, M. E.; J. F. Cordeau e G. Laporte (2013). Long-Haul Vehicle Routing and Scheduling with Working Hour Rules. *Transportation Science*, v. 47 (1), p.81-107. DOI: 10.1287/trsc.1120.0417

Rodrigues, R. S.; D. C. Garcez e P. A. Cauchick-Miguel (2023). Artigos das engenharias na *Web of Science*: distribuição nos títulos de núcleo dos autores com vínculo institucional brasileiro. *Em Questão*, v. 29, p. 125-151. DOI: 10.1590/1808-5245.29.125151

Sun, Y; T. Toledo; K. Rosa; M. Ben-Akiva; K. Flanagan; R. Sanchez e E. Spissu (2013). Route Choice Characteristics for Truckers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2354, p. 115-121. DOI: 10.3141/2354-12

Todd, R. G.; T. J. Gates e P. T. Savolainen (2013). Evaluating Traveler Preferences, Values, and Behaviors Associated with Public Rest Areas. *Transportation Research* Record, v. 2358, p. 49-56. DOI: 10.3141/2358-06

Vital, F e P. Ioannou (2021). Scheduling and shortest path for trucks with working hours and parking availability constraints. *Transportation Research Part B* v. 148 , p.1-37. DOI: 10.1016/j.trb.2021.04.002

Alan Medeiros Otani (alan.jor90@gmail.com)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Avenida L3 Norte - Asa Norte – Brasília, DF, Brasil
Sérgio Ronaldo Granemann (sergiog@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Avenida L3 Norte - Asa Norte – Brasília, DF, Brasil

DESAFIOS DA MOBILIDADE ESTUDANTIL NO SUL DA BAHIA: UM DIAGNÓSTICO PARTICIPATIVO ENTRE ITABUNA E ILHÉUS

Elisama Silva Lobo, Ketheleen Barbosa Silveira, Letícia Santos Marques Barreto, Maiquele Oliveira dos Santos, Marli Peixoto Almeida Bezerra, Peolla Paula Stein, Andersonn Magalhães de Oliveira
Universidade Federal do Sul da Bahia

RESUMO
Este estudo analisa os desafios da mobilidade enfrentados por estudantes da UESC e da UFSB, no eixo Itabuna–Ilhéus, a partir de uma abordagem quali-quantitativa em três etapas: diagnóstico técnico-operacional, escuta participativa e análise institucional. Foram levantados dados sobre horários, tarifas, frota e infraestrutura das paradas, além de percepções de 326 estudantes sobre superlotação, atrasos, baldeações e impactos no desempenho acadêmico. A pesquisa revela desarticulação entre os sistemas de transporte urbano e intermunicipal, horários limitados, infraestrutura precária e baixa integração tarifária. A análise de stakeholders e rodas de conversa com gestores locais apontam entraves à priorização do tema na agenda pública, como a ausência de governança intermunicipal. O estudo fornece subsídios para políticas de assistência estudantil e transporte público voltadas à permanência universitária em contextos de desigualdade territorial.

1. INTRODUÇÃO

O transporte público é um serviço essencial para a sociedade, pois possibilita deslocamentos de cargas e pessoas, além de influenciar diretamente na mobilidade urbana (ARAÚJO *et al.,* 2019). Esses sistemas desempenham um papel fundamental na vida dos cidadãos ao garantir acessibilidade, ampliar oportunidades e permitir o acesso a serviços essenciais, como saúde, lazer e trabalho (HERNANDEZ, 2012; NEWTON, 2004). No entanto, falhas como a precariedade da infraestrutura, frota insuficiente, escassez de linhas e horários incompatíveis com a rotina da população dificultam o uso eficiente do transporte coletivo, reverberando na qualidade de vida dos usuários (BERST, 2019).

No contexto do transporte universitário, a necessidade de deslocamentos diários evidencia a importância de um transporte público eficiente. Contudo, a realidade revela dificuldades como a falta de horários compatíveis, que geram estresse, cansaço e custos que afetam o desempenho acadêmico e as relações sociais (BERST, 2019). Configura-se, assim, o problema de pesquisa: a precariedade do transporte coletivo como um obstáculo ao acesso e à permanência na educação superior. Tomando a região de Itabuna-Ilhéus no sul da Bahia como região de ensaio para aprofundar essa questão, este trabalho busca responder à seguinte pergunta: quais são os principais desafios enfrentados pelos estudantes, em especial da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) e Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), em seus deslocamentos para frequentar as aulas?

Segundo Dache (2022) as infraestruturas de mobilidade interferem na capacidade dos discentes de alcançar alto desempenho acadêmico. Desse modo, pressupõe-se que a precariedade do transporte público nos municípios de Itabuna e Ilhéus, impacta no desempenho acadêmico, o que pode elevar o risco de evasão, especialmente daqueles de baixa renda. Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é investigar os desafios relacionados à acessibilidade e mobilidade no transporte público enfrentados por estudantes universitários da UESC e UFSB. Para tanto, foram elaborados os seguintes objetivos específicos: a) realizar um diagnóstico técnico do transporte público; b) identificar e analisar as principais percepções dos estudantes sobre o transporte público; e c) mapear e classificar os *stakeholders* relevantes à mobilidade estudantil.

A relevância deste estudo fundamenta-se em seu alinhamento com o Programa Nacional de Assistência Estudantil - PNAES, instituído pelo Decreto nº 7.234/2010 (BRASIL, 2010). O PNAES tem como um de seus objetivos assegurar a permanência de estudantes em vulnerabilidade socioeconômica por meio de ações de assistência, incluindo explicitamente o auxílio ao transporte (BRASIL, 2010). Portanto, investigar as dificuldades de mobilidade dos discentes é, na prática, avaliar a eficácia e as lacunas de uma política pública central. O estudo se aprofunda na questão de como a permanência do estudante na universidade depende da efetividade de políticas de assistência como o PNAES, que devem ser capazes de superar barreiras concretas para reduzir as desigualdades sociais (ALMEIDA *et al.,* 2019). Justifica-se, portanto, a necessidade de compreender como as barreiras no transporte público atuam como fator de exclusão social e acadêmica. Embora o problema seja nacional, faltam estudos que analisem os impactos do transporte na realidade dos estudantes da UESC e UFSB, no eixo Itabuna-Ilhéus, na Bahia.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo está organizada em três etapas interdependentes, combinando diagnóstico técnico, escuta participativa e análise institucional, com foco na mobilidade estudantil na região do eixo BR-415. A primeira etapa consistiu na realização de um diagnóstico técnico-operacional do sistema de transporte público

que atende à área de influência das universidades situadas ao longo da BR-415. Foram coletados dados sobre frequência e regularidade dos horários, valor das tarifas, condições da frota e infraestrutura dos pontos de parada. Utilizou-se mapeamento georreferenciado dos pontos de embarque e desembarque, com o apoio de ferramentas digitais, com o objetivo de avaliar a cobertura espacial do serviço em relação aos polos universitários e aos fluxos estudantis predominantes.

A segunda etapa envolveu a construção de um diagnóstico participativo, fundamentado na aplicação de um formulário junto à comunidade discente. O instrumento contemplou questões fechadas e abertas, abrangendo a caracterização dos deslocamentos (modos utilizados, origem/destino, frequência), a avaliação da qualidade percebida do serviço de transporte público e sugestões de melhoria. A amostragem buscou representar estudantes de diferentes turnos, cursos e localidades, permitindo uma análise sensível à diversidade de perfis e necessidades.

A terceira etapa compreende a identificação e análise dos atores institucionais relevantes à temática da mobilidade universitária. Para isso, elaborou-se uma matriz de stakeholders, considerando o grau de influência e o nível de interesse de cada ator. A partir desse mapeamento, foram definidos os stakeholders estratégicos que poderão ser convidados a participar de espaços de escuta qualificada, contribuindo com perspectivas e propostas. Esta etapa visa subsidiar a formulação de recomendações integradas às políticas públicas existentes e potencialmente aplicáveis à melhoria do transporte público para estudantes universitários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O corredor da BR-415, que conecta os municípios de Itabuna e Ilhéus, no sul da Bahia, é uma das áreas mais dinâmicas da região, abrigando importantes instituições de ensino superior como a UESC, o Instituto Federal da Bahia (IFBA), o SESI-Ilhéus e o Campus Jorge Amado (CJA) da UFSB. Embora separados por apenas 32 km, Itabuna e Ilhéus não formam uma região metropolitana, o que influencia diretamente a integração dos seus sistemas de transporte público, independentes em cada cidade. Cabe destacar que, apesar da proximidade com Itabuna, a UFSB encontra-se em território ilheense, dentro do perímetro da CEPLAC, o que impõe desafios adicionais de acessibilidade, considerando a distância entre a portaria e os prédios universitários (cerca de 3 km), suprida por um sistema interno de transporte circular.

A operação dos sistemas urbanos em ambas as cidades é limitada, com horário de funcionamento concentrado até as 22h, o que restringe o acesso para estudantes do turno noturno, sobretudo os que dependem de baldeações entre diferentes linhas ou entre sistemas municipais e intermunicipais. A cobertura espacial insuficiente também compromete o atendimento nas áreas periféricas, obrigando muitos estudantes a caminhar longas distâncias ou recorrer a meios particulares de transporte ao final das aulas.

O sistema que opera o trecho intermunicipal entre Itabuna e Ilhéus apresenta horários regulares nos dias úteis, com início das operações por volta das 5h e encerramento por volta das 22h15, com intervalo médio de 40 minutos. Ainda que haja uma oferta relativamente ampla, os horários de pico (6h–8h e 17h–19h) concentram grande parte da demanda, resultando em superlotação recorrente. Essa situação é particularmente sensível para estudantes com horários fixos de aula, que enfrentam atrasos e desconforto nas viagens. Conforme salientado por Hernández (2012), falhas de capacidade e regularidade comprometem a função social do transporte público como instrumento de inclusão.

Do ponto de vista tarifário, o valor da passagem intermunicipal é de R$ 4,50. Há oferta de desconto para estudantes, com redução aproximada de 40%, embora esse benefício nem sempre seja amplamente divulgado ou acessível a todos os usuários. No sistema urbano de Ilhéus, por exemplo, a tarifa padrão é de R$ 4,80, com meia-passagem a R$ 2,25 para estudantes cadastrados. Enfatiza-se que conforme indicado por Berst (2019), a acessibilidade tarifária é um dos principais fatores que influenciam a permanência estudantil, principalmente entre jovens de baixa renda.

Foram mapeadas sete paradas de ônibus intermunicipal entre a rodoviária de Itabuna e a UESC, Figura 1, trecho que conecta os sistemas de transporte urbano de Itabuna e Ilhéus. Esses pontos funcionam como acesso às universidades e locais de baldeação para o transporte urbano e escolar da região. Apesar da continuidade espacial, as paradas apresentam infraestrutura precária, sem cobertura, iluminação ou sinalização, o que compromete a segurança dos usuários, sobretudo à noite. Essa realidade reforça as análises de Newton (2004) e Araújo et al. (2019) sobre a exclusão de usuários vulneráveis diante da precariedade do ambiente urbano.

As observações indicam também falhas recorrentes na frota, sobretudo na climatização, comprometendo o conforto dos usuários. Soma-se a isso a escassez de dados públicos consolidados sobre a operação das linhas

intermunicipais, o que dificulta a análise. Essa falta de transparência limita a formulação de políticas baseadas em evidências (ALMEIDA *et al.,* 2019) e reforça, conforme Dache (2022), o impacto das condições operacionais precárias do transporte no desempenho acadêmico dos estudantes.



Figura 1: Mapa das paradas de ônibus intermunicipal no corredor educacional da BR-415 (Itabuna-Ilhéus)

Quanto à segunda etapa, que envolve a pesquisa com estudantes da UESC e da UFSB, 326 respondentes relataram suas experiências com o transporte público. A maioria dos estudantes participantes (93,5%) declarou utilizar ônibus como meio principal de deslocamento até a universidade, enquanto 6,5% mencionaram o uso de transporte próprio, caronas ou transporte fornecido por prefeituras de outros municípios. Os resultados que podem ser observados da Figura 2 evidenciam um perfil majoritariamente composto por estudantes de turno integral (46,1%) e noturno (41,9%), grupos especialmente impactados por limitações de horário dos sistemas de transporte. A avaliação do serviço revela uma percepção predominantemente negativa: 96,3% dos respondentes consideram o transporte ruim ou regular, com destaque para problemas recorrentes como superlotação (90,6%), atrasos (69,6%) e incompatibilidade com os horários de aula (69,6%).

Além disso, apenas 28,3% relatam acesso direto ao campus, enquanto 71,7% enfrentam baldeações ou longos deslocamentos a pé, o que compromete a efetividade do sistema e reforça sua desconexão com as rotinas acadêmicas. Esses resultados dialogam diretamente com Berst (2019), ao evidenciar o impacto do transporte deficiente na saúde física e emocional dos estudantes, além de seus efeitos sobre a permanência estudantil.

A maior parte dos respondentes reside em Itabuna (51,1%), Ilhéus (46,1%) e outros municípios (2,8%), o que revela uma forte dependência regional do sistema intermunicipal. A predominância de estudantes em deslocamento constante entre as duas cidades reforça a urgência de medidas voltadas à integração e à racionalização das linhas de transporte.

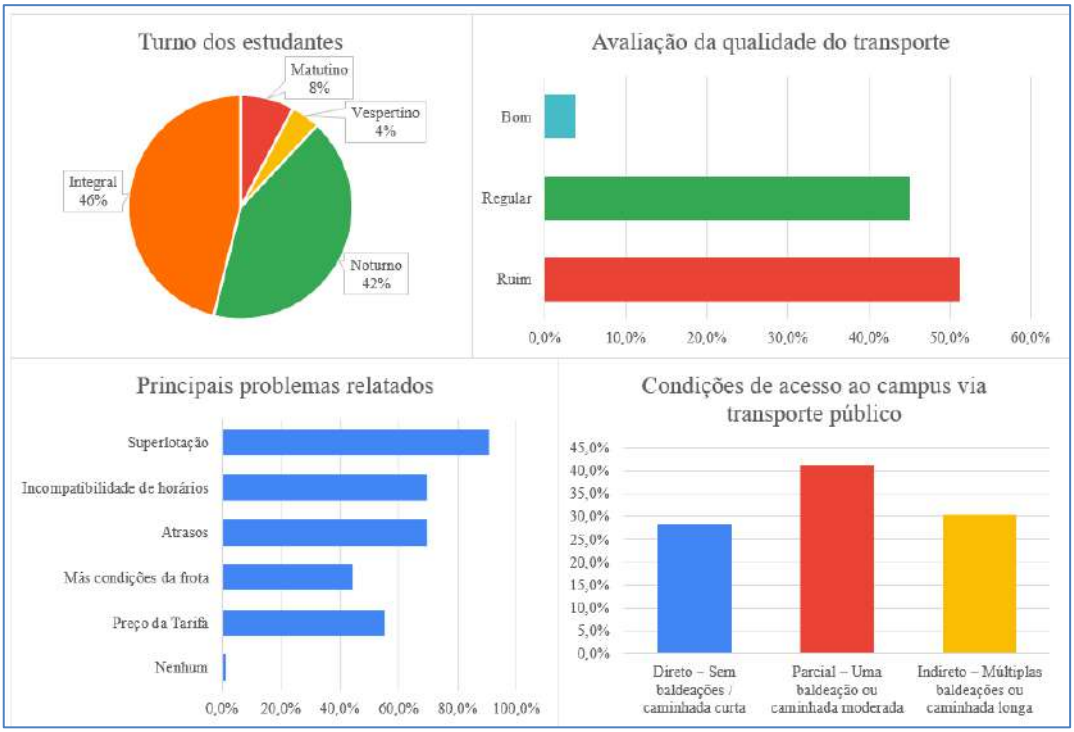


Figura 2: Percepção dos estudantes sobre o transporte público, considerando turno de estudo, avaliação da qualidade, principais problemas e características do trajeto.

Seguindo a terceira etapa, a análise institucional contou com a elaboração de uma matriz de stakeholders sobre o tema da mobilidade estudantil. Permitindo classificar os atores segundo sua influência e interesse na temática, conforme a classificação de Savage et al (1991) (Figura 3). Como desdobramento dessa etapa, foram realizadas três rodas de conversa com representantes institucionais que contaram com a presença de representantes da Secretaria de Transportes e Trânsito - SETTRAN (Itabuna), da Superintendência de Transporte, Trânsito e Mobilidade - SUTRAN (Ilhéus) e da Câmara de Vereadores de Itabuna, promovendo o debate sobre dificuldades, propostas e articulações possíveis para melhorias no transporte universitário.

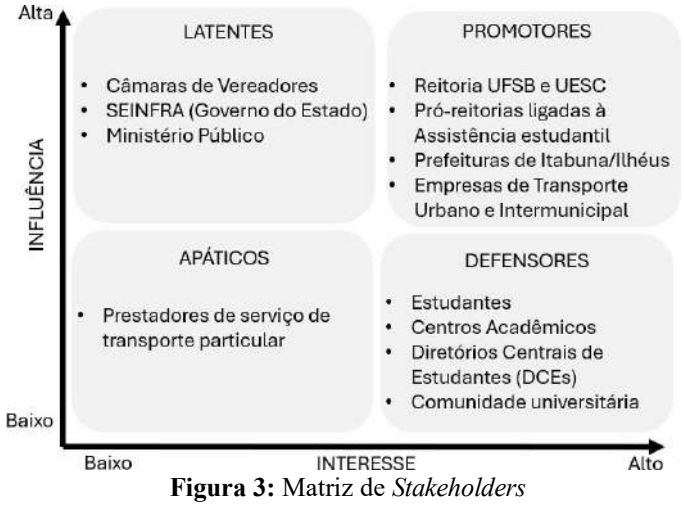


Figura 3: Matriz de *Stakeholders*

Na primeira sessão, os representantes de Itabuna reconheceram a relevância do tema e os dados apresentados, mas destacaram os entraves para a priorização do problema na agenda decisória, devido à sua natureza intermunicipal e à ausência de governança metropolitana. Também foi apontada a complexidade jurídica e financeira de ampliar o horário de operação do transporte público. Já na reunião com a SUTRAN, destacou-se a baixa frequência da única linha urbana que atende à UFSB e a necessidade de formalização de denúncias pelos usuários. As contribuições reforçam a importância da articulação entre planejamento urbano e assistência estudantil, conforme defendem Berst (2019) e Almeida *et al.* (2019).

A análise integrada dos resultados reforça que a mobilidade universitária não deve ser tratada como um tema

secundário, mas sim como um eixo estratégico da política de permanência no ensino superior. A precariedade do sistema, como demonstrado, compromete o direito ao acesso à educação, sobretudo para estudantes de baixa renda. Tais resultados corroboram os apontamentos de autores como Newton (2004), Hernández (2012), Dache (2022) e Berst (2019), que destacam como a precariedade da mobilidade urbana contribui para a exclusão educacional.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar os desafios enfrentados por estudantes da UESC e da UFSB no acesso ao transporte público ao longo do eixo Itabuna–Ilhéus. A metodologia, estruturada em três etapas, permitiu uma abordagem integrada que evidenciou entraves operacionais e estruturais no sistema de transporte da região. A desarticulação entre os sistemas municipais, os horários reduzidos de operação e a precariedade da infraestrutura comprometem o acesso diário, especialmente entre estudantes que dependem de baldeações ou frequentam o turno noturno.

A análise das percepções discente mostrou que a superlotação, os atrasos e os trajetos pouco eficientes são obstáculos recorrentes, com impactos sobre o bem-estar, a permanência e o desempenho acadêmico. Apesar do reconhecimento do problema por parte de representantes institucionais, a falta de articulação entre os entes envolvidos e a escassez de recursos dificultam avanços efetivos na priorização do tema.

Apesar da relevância dos achados, o estudo apresenta algumas limitações, como a necessidade de melhoria da amostragem probabilística no formulário online e a baixa participação de outros segmentos sociais e acadêmicos nas etapas de escuta. Pesquisas futuras poderão ampliar a abordagem, adotando metodologias participativas, estratégias de pesquisa-ação e interlocução direta com os gestores públicos e universitários. Este trabalho oferece, assim, uma base diagnóstica relevante e aponta caminhos para o fortalecimento de políticas voltadas à mobilidade universitária na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. R.; I. F. Oliveira e P. S. Seixas (2019) Programa Nacional de Assistência Estudantil em uma universidade pública. *Psicologia em Pesquisa*, v. 13, n. 2.

Araújo, M. R. M.; J. M. Oliveira et al. (2011) Transporte público coletivo: discutindo acessibilidade, mobilidade e qualidade de vida. *Psicologia & Sociedade*, v. 23, n. 2, p. 574–582.

Bersot, I. F. (2019) Movimento pendular: o deslocamento diário dos estudantes universitários de Conceição de Macabu com destino a Campos dos Goytacazes no norte fluminense. In Anais do XVI Simpósio Nacional de Geografia Urbana (Vitória: UFES).

Brasil (2010) Decreto nº 7.234, de 19 de julho de 2010. Dispõe sobre o Programa Nacional de Assistência Estudantil – PNAES. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20 jul. 2010.

Dache, A. (2022) Viagem de ônibus do bairro para a faculdade: uma análise qualitativa de sistemas de informação geográfica (SIG). *Journal of Higher Education*, v. 93, n. 1, p. 1–30.

Hernández, D. (2012) Activos y estructuras de oportunidades de movilidad: una propuesta analítica para el estudio de la accesibilidad por transporte público, el bienestar y la equidad. *EURE*, Santiago, v. 38, n. 115, p. 117–135.

Newton, A. D. (2004) Crime on public transport: "Static" and "Non-Static" (Moving) crime events. *Western Criminology Review*, v. 5, n. 3, p. 25–42.

Savage, G. T.; T. W. Nix; C. J. Whitehead e J. D. Blair (1991) Strategies for assessing and managing organizational stakeholders. *Academy of Management Perspectives*, v. 5, n. 2, p. 61–75.

Vasconcelos, N. B. (2010) Programa Nacional de Assistência Estudantil: uma análise da evolução da assistência estudantil ao longo da história da educação superior no Brasil. *Ensino em Re-vista*, Uberlândia, v. 17, n. 2.

Elisama Silva Lobo (samalobo188@gmail.com), *Ketheleen Barbosa Silveira (*Ketheleenbs@gmail.com), *Letícia Santos Marques Barreto* (letmarques328@gmail.com), *Maiquele Oliveira dos Santos* (maiqueleoliveiras03@gmail.com), *Marli Peixoto Almeida Bezerra (*malikabezerra@gmail.com*), Peolla Paula Stein* (peollapaula@gmail.com), *Andersonn Magalhães de Oliveira* (andersonn.magalhaes@ufsb.edu.br).
Universidade Federal do Sul da Bahia – Centro de Formação em Tecno-Ciências e Inovação (CFTCI) - UFSB – CJA.

DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES PARA O TRANSPORTE ESCOLAR NO BRASIL: FUNDAMENTOS TEÓRICOS, METODOLOGIA E APLICAÇÕES INICIAIS

Ana Paula Ferreira da Silva, Eric Rosa Santana, Ronny Marcelo Aliaga Medrano, Marcos Paulino Roriz Junior
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal de Goiás

RESUMO
O transporte escolar é fundamental para garantir o acesso à educação, sobretudo em áreas rurais e remotas. Este estudo elaborou e aplicou indicadores baseados em dados do Censo Escolar de 2023 para avaliar a cobertura e a gestão do transporte escolar nas regiões brasileiras. Os resultados revelaram desigualdades marcantes entre as regiões, com maior dependência do serviço no Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Os indicadores propostos mostraram-se úteis para subsidiar políticas públicas mais eficientes e adaptadas às realidades locais. Conclui-se que seu uso fortalece a gestão educacional e contribui para um sistema mais justo e inclusivo.

1. INTRODUÇÃO

O transporte escolar exerce papel essencial na efetivação do direito à educação, garantindo que os estudantes cheguem aos espaços de aprendizagem. A Constituição Federal de 1988 e a Lei de Diretrizes e Base da Educação Nacional reforçam esse compromisso do poder público com o acesso e a permanência na escola (BRASIL, 1988; BRASIL, 1996). Em 2023, com quase 38 milhões de alunos na rede pública, sendo mais de 5 milhões em áreas rurais, o transporte escolar segue sendo instrumento indispensável para reduzir desigualdades (INEP, 2023).

Para enfrentar esses desafios, o Governo Federal, em parceria com estados e municípios, desenvolve a Política Nacional de Transporte Escolar por meio do FNDE. Programas como o Caminho da Escola e o PNATE fornecem recursos, veículos e suporte técnico, ampliando o alcance do serviço, especialmente em regiões remotas (FNDE, 2019).

Tanure e Neto (2022) apontam que os principais indicadores para avaliar o transporte por ônibus, base do Caminho da Escola, envolvem tempo de viagem, confiabilidade, intervalo, lotação, acessibilidade e mobilidade. Desde a década de 1980, esses critérios foram sendo ampliados, acompanhando as transformações sociais e a incorporação de tecnologias.

Estudos recentes aprofundam diferentes abordagens. Sampaio *et al.* (2024) analisam os impactos do PNATE em áreas rurais com modelos econométricos. Já Nascimento et al. (2023) exploram a percepção dos usuários sobre as mudanças geradas. Diante disso, este artigo propõe a criação de um sistema de indicadores que traduza dados em informações úteis, favorecendo o planejamento, a operação e a melhoria do transporte escolar

1.1. Indicadores

Indicadores constituem instrumentos fundamentais para a mensuração, avaliação e análise de políticas, projetos e organizações, ao possibilitarem a tradução de dados complexos em informações claras e interpretáveis. Conforme Francischini (2017), seu uso permite orientar a tomada de decisões, monitorar o cumprimento de metas e identificar oportunidades de aprimoramento com base na evolução dos resultados.

1.2 Indicadores e Política Pública

Os indicadores desempenham papel central na avaliação de políticas públicas, ao quantificarem resultados e subsidiar ações mais eficazes e inclusivas. Aplicações como nos programas PNATE e Caminho da Escola evidenciam sua relevância para o monitoramento da equidade no acesso à educação e a transparência da gestão. (ENAP, 2010)

1.3 Censo Escolar

O Censo Escolar, realizado pelo INEP, é a principal fonte de informações sobre a educação básica no Brasil, reunindo dados de escolas, matrículas e profissionais das redes pública e privada. Esses dados servirão de base para a construção dos indicadores utilizados neste estudo, permitindo uma análise mais precisa do transporte escolar (INEP, 2024).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Tanure e Neto (2022), a qualidade do transporte por ônibus é avaliada por indicadores como tempo de viagem, confiabilidade, acessibilidade e lotação. Desde os anos 1980, esses critérios evoluíram com as demandas dos usuários e a incorporação de tecnologias. A revisão bibliográfica agrupa os indicadores em seis categorias: infraestrutura, mobilidade, confiabilidade, acessibilidade, segurança e satisfação do usuário, incluindo o meio ambiente.

Para complementar, Nascimento *et al.* (2023) analisam a percepção de estudantes, professores e familiares sobre o transporte escolar rural, com questionários que avaliam pontualidade, conforto, segurança, tempo de viagem e condições da rota. O estudo mostra a complexidade da avaliação por indicadores, sem consenso científico, variando conforme o nível de análise. Destacam-se a importância, cobertura e qualidade do serviço.

Para serem eficazes, os indicadores devem ter validade, confiabilidade e mensurabilidade, garantindo informações precisas para decisões. Magalhães (2004) alerta que esses atributos podem ser afetados por mudanças no contexto, exigindo revisão contínua. Assim, monitoramento e adaptação são essenciais para manter sua relevância.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo adota uma abordagem exploratória, com foco na criação de um sistema nacional de indicadores para avaliar e aprimorar políticas públicas de transporte escolar, como o PNATE e o Caminho da Escola. Diante de um tema ainda pouco consolidado no meio acadêmico, opta-se por um caminho mais aberto e flexível, permitindo ajustes conforme novas informações e entendimentos forem surgindo ao longo do processo.

Considerando a diversidade regional, territorial e social do Brasil, não se propõe aqui uma metodologia rígida. As diferenças locais impõem limites à aplicação de modelos únicos, o que torna necessário elaborar indicadores nacionais que possam, ao mesmo tempo, respeitar e dialogar com as múltiplas realidades do país.

Para dar base à construção desses indicadores, serão utilizados dados do Censo Escolar, levantamento oficial conduzido anualmente pelo INEP. Essa fonte, pela amplitude e detalhamento das informações sobre escolas, matrículas e infraestrutura educacional, oferece o suporte necessário para garantir representatividade, coerência e atualização na análise proposta (INEP, 2024). A seguir, as etapas a serem seguidas serão:

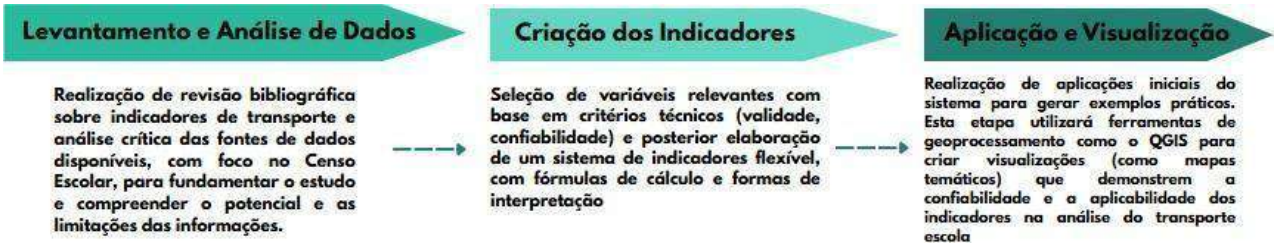


Figura 1: Etapas Metodológicas. Fonte: Autores

Com isso, busca-se um conjunto de indicadores que não apenas reflita a eficácia e a qualidade do transporte escolar, mas também contribua para o monitoramento da equidade no acesso à educação.

Nesta etapa, os dados foram obtidos a partir da planilha disponível no site do Governo Federal, referente ao Censo Escolar de 2023. Foi realizado um processo de refinamento para selecionar exclusivamente as variáveis relevantes à criação dos indicadores de Transporte Escolar. A Tabela 1 apresenta as variáveis selecionadas, acompanhadas de seus respectivos significados.

Tabela 1: Significado colunas planilha selecionadas Censo Escolar 2023. Fonte: Autores

Variáveis	**Significado**
QT_MAT_ZR_URB	Quantidade de matrículas em zonas urbanas.
QT_MAT_ZR_RUR	Quantidade de matrículas em zonas rurais.
QT_TRANSP_PUBLICO	Quantidade de estudantes usuários do transporte escolar público.
QT_TRANSP_RESP_EST	Quantidade de estudantes transportados sob responsabilidade do estado.
QT_TRANSP_RESP_MUN	Quantidade de estudantes transportados sob responsabilidade do município.
NUM_ESCOLAS	Quantidade de escolas em cada município

As escolas foram analisadas considerando sua localização (áreas urbanas, rurais, assentamentos, terras indígenas ou quilombolas) e o número médio de alunos por instituição. As rotas são descritas em termos de quantidade, extensão, tempo médio de deslocamento e dificuldades de acesso (como porteiras e atoleiros). Também são apresentados dados sobre georreferenciamento e atendimento a diferentes turnos escolares. Para cada indicador, foi realizado o cruzamento dos dados necessários, realizando a criação dos indicadores conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Indicadores Elaborados. Fonte: Autores

Indicador	**Fórmula**	**Fonte Dos Dados**
Alunos Transportados por Unidade de Escola	$\frac{\sum(QT_TRANSP_PUBLICO)}{\sum(NUM_ESCOLAS)}$	Planilha de dados Censo 2023
Proporção de Alunos Transportados	$\frac{\sum(QT_TRANSP_PUBLICO)}{\sum(QT_MAT_ZR_URB + QT_MAT_ZR_RUR)}$	Planilha de dados Censo 2023
Índice de Proporcionalidade de Transporte Escolar Municipal/Estadual	$\frac{\sum(QT_TRANSP_RESP_EST)}{\sum(QT_TRANSP_RESP_MUN)}$	Planilha de dados Censo 2023

A partir dos dados disponíveis foi possível realizar a elaboração dos indicadores, permitindo que seja realizado a aplicação dos mesmos em escala nacional, as análises podem ser realizadas por estado ou por município.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados nesta seção foram consolidados a partir da aplicação dos indicadores elaborados, cada indicador foi calculado para os municípios da região, permitindo uma análise ampla e comparativa do desempenho do transporte escolar em nível nacional e regional.

Para essa análise, após aplicação dos indicadores em cada município, foram realizados mapas para análise da distribuição espacial dos indicadores. A Figura 2 apresenta um exemplo dos mapas gerados.

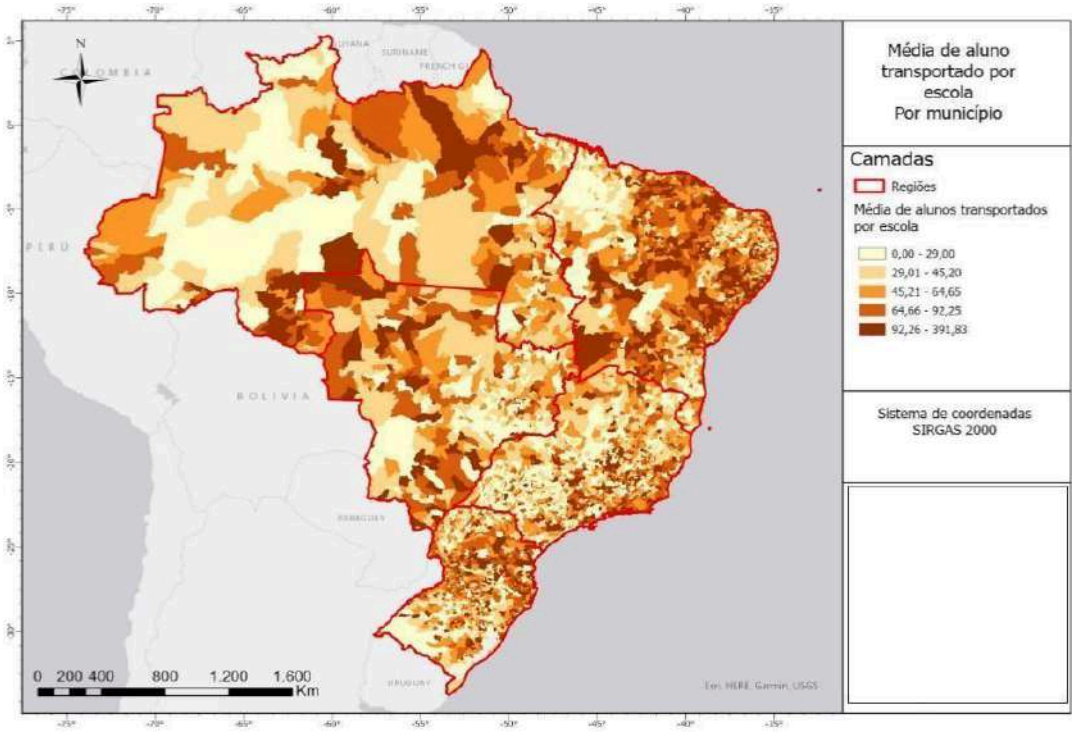


Figura 2: Média de alunos transportados por escola. Fonte: Autores

Para cada indicador, é possível elaborar um mapa de distribuição, no qual cada faixa de cor corresponde aos limites de cada município. Os valores médios dos indicadores podem ser calculados para as diferentes regiões brasileiras. Os quatro indicadores propostos contribuem para a análise da cobertura do transporte escolar no Brasil, oferecendo uma perspectiva mais detalhada sobre sua distribuição territorial e alcance.

Tabela 3: Resultados Indicadores. Fonte: Autores

Indicador	Centro – Oeste	Sul	Sudeste	Nordeste	Norte
Média de alunos transportados por unidade de escola	50,22	58,02	42,41	54,85	50,52
Média da proporção de alunos transportados por município	23,11%	39,64%	26,65%	36,37%.	32,57%
Média entre estados da proporção de alunos transportados	20,53%	39,72%	30,49%	36,59%	32,84%
Média índice de proporcionalidade	0,3932	0,2092	2,2741	0,3591	0,3809

A análise dos indicadores revela uma clara divisão do Brasil: as regiões **Sul e Nordeste** possuem alta dependência do transporte escolar, com elevadas proporções de alunos transportados. Em contrapartida, a região **Sudeste** apresenta menor dependência. Este contraste reflete, de um lado, grandes extensões territoriais e maiores populações rurais e, de outro, maior urbanização e densidade da malha escolar. O padrão de gestão acompanha essa divisão: o Estado tem forte participação no transporte na região Sudeste, enquanto sua atuação é significativamente menor nas demais regiões, onde a responsabilidade é majoritariamente municipal. A média entre estados da proporção de alunos transportados considera todos os estados com peso igual, independente se possui mais ou menos municípios, o que não ocorre na média da proporção de alunos transportados por município.

O índice de proporcionalidade quando maior que 1 indica maior responsabilidade do estado/unidade federativa em relação ao município. Quando menor que 1 significa maior responsabilidade do município na gestão do transporte escolar.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados do Censo Escolar 2023 (INEP, 2024) e nos estudos de Tanure e Neto (2022) e Nascimento *et al.* (2023), foram desenvolvidos indicadores que possibilitam avaliar com clareza a cobertura do transporte escolar em diferentes regiões.

Os resultados apontam contrastes marcantes: as regiões Sul e Nordeste dependem fortemente do transporte escolar, onde a responsabilidade da gestão concentra-se em municípios, enquanto Sudeste têm uma gestão concentrada nos estados, é muito provável que o estado do Rio de Janeiro e São Paulo influenciem numa necessidade de gestão integrada estadual para oferecer o transporte escolar, especialmente em regiões metropolitanas. Esses padrões refletem diferenças na urbanização, na malha escolar e nas condições geográficas. Os indicadores propostos se mostraram úteis para orientar políticas públicas mais equilibradas e eficientes, norteando futuras pesquisas sobre o assunto em outros países.

Conclui-se que o uso de indicadores específicos fortalece a gestão educacional ao transformar dados em decisões mais precisas. Conforme alerta Magalhães (2004), a atualização constante desses instrumentos é essencial para manter sua eficácia. Assim, este estudo contribui para uma política de transporte escolar mais justa, adaptada às realidades – sejam rurais ou urbanas – e voltada à garantia plena do direito à educação.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - FNDE pelo financiamento do projeto de pesquisa do qual este trabalho faz parte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. (1988) *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm (acesso em 14/07/2025).

BRASIL. (1996) *Lei n.º 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional.* Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm (acesso em 14/07/2025).

ENAP. (2010) *Elaboração de indicadores*. Brasília: Escola Nacional de Administração Pública. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/785/1/Elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20Indicadores.pdf (acesso em 14/07/2025).

FNDE. (2019) *O transporte escolar no Brasil*. Brasília: Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. Disponível em: https://www.gov.br/fnde/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/pnate/media-pnate/cartilhas -e- manuais/O_Transporte_Escolar_no_Brasil.pdf (acesso em 14/07/2025).

Francischini, P. G. e P. G. F. Francischini (2017) *Indicadores e métricas para a gestão*. São Paulo: Atlas.

INEP. (2023) *Censo escolar: resultados*. Disponível em: https://www.gov.br/inep/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/microdados/censo-escolar (acesso em 14/07/2024).

Magalhães, M. (2004) *Indicadores para gestão pública*. Rio de Janeiro: FGV.

Nascimento, M. V. L. de A., Dourado, A. B. de F., e De Andrade, M. O. (2023) Avaliação do transporte escolar rural pelos usuários em pequena cidade no agreste de Pernambuco. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA*, *21*(8), 9331–9349. doi:10.55905/oelv21n8-081

Sampaio, M. A. S.; M. O. S. Sampaio e J. A. Araujo (2024) Efeitos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar sobre os estabelecimentos rurais de educação infantil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 62, n. 4, p. e278422. DOI: 10.1590/1806-9479.2023.278422

Tanure, V. R. M. e N. F. S. Neto (2022) Uma revisão bibliográfica dos indicadores de qualidade do transporte coletivo urbano. In *Anais do XLVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (Fortaleza, CE). Galoá, p. 1–12. Disponível em: https://proceedings.science/anpet-2022/trabalhos/uma-revisao-bibliografica-dos-indicadores-de-qualidade-do -tra nsporte-coletivo-ur?lang=pt-br (acesso em 23/12/2024).

Ana Paula Ferreira da Silva (anaferreira2@discente.ufg.br)
*Eric Rosa Santana (*eric.rosa@discente.ufg.br)
Ronny Marcelo Aliaga Medrano (ronnymarcelo@ufg.br)
Marcos Paulino Roriz Junior (marcosroriz@ufg.br)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás, Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia, GO, Brasil

DIAGNÓSTICO DA MOBILIDADE DE ITAPORANGA-PB A PARTIR DA APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE MOBILIDADE URBANA PARA CIDADES DE PEQUENO PORTE

William Reynaldo Lemos Guimarães Silva[1], **Ana Leticia Ramos Bezerra**[2], **Larissa Santana Batista**[1], **Cícero Fellipe Diniz de Santana**[1], **Leonardo Herszon Meira**[2]
[1]Universidade Federal de Campina Grande, [2]Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este artigo apresenta a aplicação do Índice de Mobilidade Urbana para Cidades de Pequeno Porte (IMUCPP) no município de Itaporanga-PB, com o objetivo de diagnosticar suas condições de mobilidade urbana a partir de 27 indicadores distribuídos em quatro domínios: Modalidades de Transporte, Planejamento Integrado, Integração da Mobilidade e Impacto Social, Político e Ambiental, estruturados por meio do AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Os dados foram obtidos a partir de levantamentos em campo, entrevistas com gestores públicos e bases de dados como IBGE e SENATRAN. O índice obtido foi de 0,511, representando um cenário intermediário, com avanços em sinalização viária e educação para o trânsito, mas com limitações em vagas acessíveis e no índice de transportes alternativos, por exemplo. A ferramenta se mostrou utilizável mesmo diante da ausência de dados em alguns indicadores. Para trabalhos futuros, recomenda-se a comparação com os resultados obtidos para aplicação do índice em outras cidades.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana desempenha papel essencial no acesso a oportunidades e serviços urbanos, sobretudo em cidades de pequeno porte, cuja estrutura territorial apresenta desafios específicos. Nessas localidades, a baixa densidade populacional, a ausência de planejamento integrado e a limitação de políticas públicas voltadas ao transporte coletivo geram um cenário de deslocamentos centrado no transporte individual e pouco inclusivo. A Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída pela Lei Federal nº. 12.587/2012, estabelece diretrizes para promover uma mobilidade eficiente, acessível e sustentável. Contudo, seu cumprimento encontra entraves nas cidades menores, que geralmente carecem de diagnósticos técnicos e instrumentos metodológicos adaptados à sua realidade.

Segundo Costa (2008), a obtenção de diagnósticos das condições de mobilidade urbana, surge da aplicação de ferramentas que avaliem a mobilidade urbana. O IMUS, proposto pela autora, é uma ferramenta de utilização ampla, com estrutura que caracteriza a mobilidade urbana, sua aplicação completa se torna complexa, visto que estudos realizados no âmbito acadêmico sobre a adoção dessa ferramenta relatam que em nenhum dos casos em que a ferramenta foi utilizada foi possível calcular todos os 87 indicadores presentes, o que evidencia a dificuldade de sua implementação integral (Assunção, 2012; Dávila, 2015; Costa, 2008; Miranda, 2010). Para cidades de pequeno porte, com população de até 100.000 habitantes, a obtenção dos dados para aplicação da ferramenta que calcula o índice de mobilidade, possuem um entrave para utilização, por possuírem menos recursos para investir em sistemas de coleta de dados mais complexos. À exemplo do IMUS, existem o Índice de Caminhabilidade (iCam), ferramenta com 15 indicadores, que compreende e avalia as condições das calçadas, atratividade, percepção quanto a segurança pública e segurança viária (ITDP, 2019) e o Indice de Qualidade de Vida Urbana (IQVU), que possui 36 indicadores (Belo Horizonte, 2018).

No entanto, os indicadores que compõem esses índices são insipientes para aplicação em cidades de pequeno porte, pois essas cidades possuem características distintas das cidades de médio e grande porte, como menor densidade populacional, menor número de viagens e menor demanda de transporte público (Cardoso, 2021). Diante dos desafios enfrentados para avaliar a mobilidade de cidades de pequeno porte a pergunta condutora deste estudo é: Em que medida a mobilidade urbana de cidades de pequeno porte pode ser diagnosticada por meio de um índice voltado à realidade desse tipo de cidade? Para isso, o presente estudo tem como proposta aplicar o Índice de Mobilidade Urbana Para Cidades de Pequeno Porte em Itaporanga – PB, município localizado no alto sertão paraibano.

2. METODOLOGIA

O Índice de Mobilidade Urbana para Cidades de Pequeno Porte (IMUCPP) é estruturado hierarquicamente por quatro domínios: Modalidades de Transporte; Planejamento Integrado; Integração da Mobilidade; e Impacto Social, Político e Ambiental (Silva, 2025). Esses domínios foram subdivididos em 12 temas e avaliados por 27 indicadores qualitativos e quantitativos, organizados hierarquicamente por meio da metodologia multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Saaty, 1980), que permitiu atribuição de pesos conforme grau

de prioridade e relevância no contexto da PNMU. Para maiores informações sobre o IMUCPP consultar Silva (2025).

Para obtenção do diagnóstico da mobilidade urbana de Itaporanga-PB, o processo de coleta de dados foi desde entrevistas com técnicos e gestores do município escolhido, pesquisa em banco de dados fornecidos pela prefeitura, ou pelo estado, e em outros estudos já realizados com o viés relacionado aos indicadores aplicados na cidade. No processo de aplicação do índice foi necessário que a colaboração dos órgãos detentores seja existente, como no caso de Itaporanga, com a contribuição da Prefeitura Municipal, fornecendo dados da Secretaria Municipal de Infraestrutura e Urbanismo e Superintendência Itaporanguense de Trânsito e Transportes, além de outras fontes de dados incluindo a Secretária Nacional de Trânsito (SENATRAN), Google Earth, Google Maps, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), base de dados georreferenciados do OpenStreetMap (OSM), levantamento em campo e pesquisa de opinião, com a entrevista aos gestores e técnicos responsáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O município de Itaporanga fica localizado na região metropolitana do Vale do Piancó, inserida na bacia hidrográfica do rio Piancó Piranhas Açu, que de acordo com classificação de Köppen-Geiger, o clima se classifica em quente e úmido, com chuvas de verão-outono (de Sousa *et al*., 2007). De acordo com a Pesquisa de Região de Influência das Cidades é classificada na hierarquia Centro de Zona A e pertencente ao Arranjo Populacional de Patos/PB (IBGE, 2020), com população estimada em 24.686 habitantes (IBGE, 2022). De acordo com os dados disponibilizados por Brasil (2025), entre os anos de 2014 e 2024, observou-se um crescimento de aproximadamente 80,24% na quantidade de automóveis, e 66,08% para as motocicletas e motonetas. No que se refere à mobilidade urbana, observa-se que questões pertinentes não são amplamente discutidas pelos gestores e planejadores do município. Contudo, é notável o empenho da Superintendência de Trânsito e Transporte de Itaporanga em propor ações voltadas a melhoria da mobilidade urbana. Referente a gestão de transporte dos órgãos para o município, a cidade possui fragilidade devido a circulação de somente mototáxi e táxi, não havendo oferta alguma de um modo de transporte público. Mesmo sendo obrigada pelo Estatuto das Cidades (Brasil, 2001), a cidade não apresenta Plano Diretor municipal e legislação urbanística específica.

O processo de cálculo do IMUCPP em Itaporanga foi antecedido por uma etapa de avaliação quanto à disponibilidade dos dados para o cálculo do índice. Nesta etapa, quantificou-se o número de indicadores passíveis de serem calculados, e em razão de não se haver coleta periódica ou atualização dos dados necessários para o cálculo, optou-se por utilizar dados de 2014 a 2024. Embora a metodologia não represente a forma ideal de aferição, se configura como uma possibilidade de análise do maior número de indicadores possíveis. As fontes consultadas para a obtenção dos dados foram: a Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), Google Earth e Google Maps, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Levantamentos de campo, OpenStreetMap (OSM), Pesquisa de opinião, Prefeitura Municipal de Itaporanga, Secretaria Municipal de Infraestrutura e Urbanismo (SEINFRA), Superintendência de Trânsito e Transporte de Itaporanga (SITTRANS) e a Polícia Militar de Itaporanga. Na Tabela 1 são apresentados os indicadores calculados e suas fontes de dados, para aqueles que não puderam ser calculados, ou estão com ausência de fonte, devido a inexistência de um órgão ou secretaria responsável pelas informações, ou pontuaram notas baixas devido ao seu *score*, ao qual o indicador se refere na cidade.

Tabela 1: Indicadores calculados e suas fontes de dados

Indicador	Fonte de dados
Proporção de vias com calçadas	Georreferenciamento, SEINFRA
Largura de via exclusivamente para pedestres (calçadão) (ITDP 2019)	Levantamento de dados
Pavimentação de via exclusiva para pedestres (calçadão) (ITDP 2019)	Levantamento de dados
Indice de bicicletas	Vazio
Taxa de vias cicloviárias	Vazio
Acesso ao transporte coletivo	Vazio
Indice de transportes alternativos	Entrevista com o gestor da SEINFRA
Indice de motorização	SENATRAM, IBGE
Vazio urbano	Vazio
Indice de Uso misto do solo	Vazio
Transporte motorizado	SENATRAN, Polícia Militar

Transporte não motorizado	SENATRAN, Polícia Militar
Vertical	Levantamento de dados/Entrevista
Horizontal	Levantamento de dados/Entrevista
Iluminação das vias	Levantamento de dados/Entrevista
Parques e áreas verdes	Vazio
Distância de acesso a escola e a postinhos	Google Earth Pro
Promover educação dedicada para o trânsito	SITTRANS
Presença de órgão de fiscalização	SEINFRA
PMU	Vazio
Existência do código de obras	Vazio
Vagas específicas disponíveis	SITTRANS

Os indicadores não calculados foram: Plano de Mobilidade Urbana (PMU), Existência do código de obras, Taxa de estacionamentos fora de vias, Acessibilidade a espaços abertos, Existência do código de obras, Taxa de estacionamentos fora de vias, Acessibilidade a espaços abertos, Acessibilidade a edifícios públicos, Índice de Uso misto do solo, Vazio urbano, Índice de bicicletas, Taxa de estruturas cicloviárias, Acesso ao transporte coletivo e Parques e áreas verdes. Segundo Bezerra *et al.* (2024), para a aplicação do índice IMUS em cidades de pequeno e médio porte, alguns indicadores que semelhantemente são utilizados no IMUCPP não foram considerados ou não puderam ser calculados, como se verifica o caso do indicador de acessibilidade a edifícios públicos, além dos indicadores que apontam para a má infraestrutura para ciclistas e pedestres, como apontado na pesquisa realizada, a ausência de dados para os indicadores índice de bicicletas e taxa de estruturas cicloviárias.

O resultado do índice aplicado para o município de Itaporanga-PB é de 0,511, valor intermediário, porém não se caracteriza como situação totalmente crítica, pois Cardoso (2021) observa que a aplicação do IMUS quando adaptado para cidades de pequeno porte, alcança uma pontução intermediária de 0,58. Os pesos dos indicadores não calculados foram redistribúidos entre os demais, conforme apresentado na Tabela 2. Os indicadores que obtiveram o valor máximo (1,00) são correspondentes a 6 indicadores no total. Para estes recomenda-se que se faça manutenção periódica para que seus bons resultados continuem preservados. Houveram indicadores considerados críticos, pois atingiram pontuação 0,00, neste caso é válido que os gestores da administração pública elaborem soluções para eles.

Tabela 2: Indicadores com os pesos redistribuídos

Indicadores		**Peso**	**Peso Redistribuído**	**Score**
1.1.1	Proporção de vias com calçadas	0,33	0,33	0,49
1.1.2	Largura de via exclusivamente para pedestres (calçadão)	0,33	0,33	1,00
1.1.3	Pavimentação de via exclusiva para pedestres (calçadão)	0,33	0,33	0,66
1.2.1	Indice de bicicletas	0,50	0,50	-
1.2.2	Taxa de vias cicloviárias	0,50	0,50	-
1.3.1	Acesso ao transporte coletivo	0,50	0,00	-
1.3.2	Indice de transportes alternativos	0,50	1,00	0,50
1.4.1	Indice de motorização-Automóveis	0,50	0,50	1,00
1.4.2	Indice de motorização-Motocicletas e motonetas	0,50	0,50	0,00
2.1.1	Sinalização horizontal	0,33	0,33	1,00
2.1.2	Iluminação das vias	0,33	0,33	0,66
2.1.3	Sinalização vertical	0,33	0,33	1,00
2.2.1	Transporte motorizado	0,50	0,50	0,90
2.2.2	Transporte não motorizado	0,50	0,50	0,91
2.3.1	Indice de uso misto	0,50	Vazio	-
2.3.2	Vazio urbano	0,50	Vazio	-
3.1.1	Parques e áreas verdes	1,00	1,00	-
3.2.1	Distancia de acesso a escola e a unidades de saúde	0,50	0,50	0,00
3.2.2	Promover educação dedicada para o trânsito	0,50	0,50	1,00
3.3.1	Presença de orgão de fiscalização	0,33	1,00	1,00
3.3.2	Plano de Mobilidade Urbana	0,33	Vazio	-
3.3.3	Existência do código de obras	0,33	Vazio	-

4.1.1	Vagas específicas disponíveis	0,33	1,00	0,20
4.1.2	Acessibilidade de espaços abertos	0,33	Vazio	-
4.1.3	Acessibilidade a edificios públicos	0,33	Vazio	-
4.2.1	Vias pavimentadas	1,00	1,00	0,47
4.3.1	Taxa de estacionamentos	1,00	Vazio	-

Dos 27 indicadores previstos, 16 puderam ser calculados com dados válidos. Os melhores desempenhos foram observados no domínio Planejamento Integrado, com destaque para sinalização horizontal e vertical, iluminação das vias e educação para o trânsito — resultado da atuação recente da SITTRANS. O domínio Modalidades de Transporte também apresentou bons resultados, especialmente na pavimentação e largura das vias exclusivas para pedestres e no índice de motorização por automóveis. Analisando os valores do IMUCPP em relação aos domínios, o domínio de melhor contribuição na cidade de Itaporanga-PB foi o Planejamento Integrado (20%), influenciado pela segurança nas vias principais, com reduzido número de acidentes tanto com modos motorizados, quanto modos não motorizados, deixando evidente a preocupação dos gestores locais para estes aspectos públicos; Modalidades de Transporte, obteve pontuação elevada (17%) comparada aos outros domínios (Figura 1), favorecido pela conservação das vias exclusivas para pedestres, quantidade de automóveis por habitante, porém com ressalvas, devido a inexistência de estruturas cicloviárias, e a elevada frota de motocicletas e motonetas.

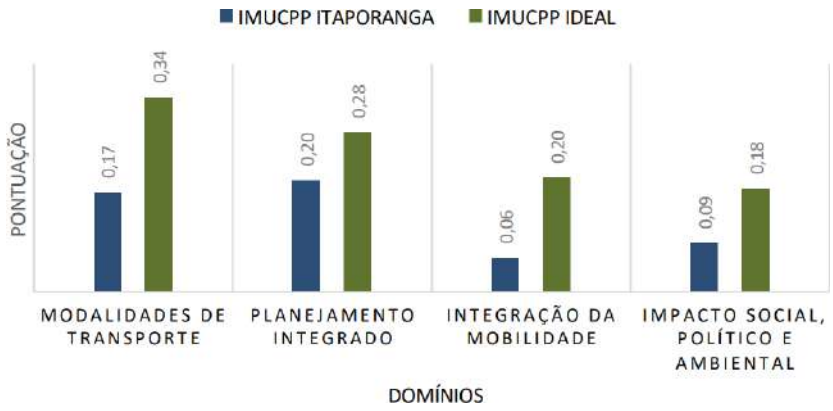


Figura 1: Pontuação ideal e real do índice

No entanto, a Figura 1 apresenta também os domínios que obtiveram péssimo desempenho, foram o Impacto Social, Político e Ambiental (9%), devido à falta de incentivos para políticas públicas em relação a quantificação das áreas verdes e parques, e sua influência no bem-estar da população e meio ambiente, além da negligencia quanto a existência de um plano de mobilidade urbana, e um código de obras; e o domínio da Integração da Mobilidade (6%), influenciado pela ausência de estacionamentos adequados, além da falta de acessibilidade existente para lugares públicos e espaços abertos, tornando um fator social excludente. Em relação aos 11 indicadores que não puderam ser calculados, a conclusão para isto se deve ao fato do retrato da dificuldade da obtenção de dados, causada pela prefeitura, órgãos públicos ou instituições prestadoras de serviço relacionados a mobilidade, que necessitam de um corpo técnico capacitado e instruído para fornecer os dados para estudos.

4. CONCLUSÕES

Com base na aplicação do Índice de Mobilidade Urbana para Cidades de Pequeno Porte, de acordo com o objetivo proposto, foi possível diagnosticar os principais aspectos da mobilidade urbana em Itaporanga-PB, considerando os desafios específicos enfrentados por municípios com porte populacional reduzido. O resultado obtido (0,511) indica uma situação intermediária, revelando avanços pontuais em sinalização viária e infraestrutura básica voltada ao deslocamento a pé, ao mesmo tempo em que evidencia limitações críticas relacionadas à acessibilidade, ausência de transporte coletivo regular, baixa cobertura de equipamentos urbanos e carência de normativas e planejamento estruturado. A análise permitiu mapear os pontos fortes e frágeis da cidade em relação aos diferentes domínios da

mobilidade, destacando-se especialmente a atuação institucional nas áreas de segurança viária e educação para o trânsito, enquanto os menores desempenhos se concentraram nos indicadores ligados à inclusão social, infraestrutura cicloviária e estrutura de governança urbana. A experiência de aplicação revela que metodologias adaptadas à realidade dos pequenos municípios são capazes de produzir diagnósticos eficientes.

Diante do diagnóstico obtido, ressalta-se que é importante direcionar atenção aos indicadores não calculados devido à ausência de dados e deficiências na capacidade técnica municipal. Recomenda-se aprimorar a coleta de dados por meio do fortalecimento da capacitação do corpo técnico do orgãos que competem o planejamento e gestão da mobilidade urbana municipal, além da formalização de parcerias acadêmicas ou consultorias com empresas que possam oferecer suporte metodológico e técnico para a contínua qualificação do município nessas área estratégicas. Os indicadores com valores críticos demandam ações prioritárias, como a implementação de infraestrutura cicloviária, adaptação de calçadas, construção de políticas regulatórias e ampliação da cobertura de serviços urbanos. Para trabalhos futuros, é recomendável a avaliação da realidade sobre a demanda por transporte público, por meio da realização de pesquisas origem-destino, além de comparação com os resultados obtidos para aplicação do índice em outras cidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Assunção, M. A. Indicadores de mobilidade urbana sustentável para a cidade de Uberlândia, MG. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

Bezerra, A. L. R. *et al.* (2024). Desafios de Cidades do Interior do Nordeste Brasileiro à Luz do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável. *In: ANAIS DO 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos...*, Galoá, *2024.*

BRASIL. Lei nº 10.257. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial da União, 11 jul. 2001.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União, 4 jan. 2012.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Secretaria Nacional de Trânsito – SENATRAN. Estatísticas – Frota de veículos. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudoSenatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran. Acesso em: 23 mar. 2025

Costa, M. D. S. (2008). Um índice de mobilidade urbana sustentável. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos-USP. São Carlos.

Dávila, G. P. Avaliação da mobilidade urbana em Itajaí. 2015. 123 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Transportes e Logística) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico (2022). Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. (acesso em 06/07/2025).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Regiões de influência das cidades 2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101728.pdf>. (acesso em 05/07/2025)

Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP Brasil). Índice de caminhabilidade: versão 2.0. 2019. Disponível em: https://itdpbrasil.org/icam2/. Acesso em: 20 fev. 2024.

Miranda, H. de F. Mobilidade urbana sustentável e o caso de Curitiba. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Índice de Qualidade de Vida Urbana. 2018. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estruturadegoverno/planejamento/relatorio_iqvu_2016_publicacao_versaoweb-1_0.pdf. Acesso em: 20 fev. 2024.

Saaty, T. L. O processo de hierarquia analítica: planejamento, definição de prioridades, alocação de recursos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980.

Silva, W. R. L. G. (2025). Proposta de um índice de mobilidade urbana para cidades de pequeno porte e aplicação em Itaporanga – PB. Monografia (Conclusão de curso superior) Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Pombal, PB.

William Reynaldo Lemos Guimarães Silva (contato.willlemos@gmail.com)
Ana Leticia Ramos Bezerra (ana.ramosb@ufpe.br)
Larissa Santana Batista (larissa.santana@professor.ufcg.edu.br)
Cícero Fellipe Diniz de Santana (cicero.fellipe@professor.ufcg.edu.br)
Leonardo Herszon Meira (leonardo.meira@ufpe.br)

FAIXA AZUL E SEGURANÇA VIÁRIA: ESTIMANDO EFEITOS CAUSAIS SOBRE SINISTROS VIÁRIOS

Mateus Humberto[1], Flávio Cunto[2], Manoel Neto[2], Beatriz Francisco[3], Luis Fernando Villaça Meyer[3] Mariana Novaski[4], Ezequiel Menezes[5], Ismael Ibarra[5]

[1]Universidade de São Paulo, [2]Universidade Federal do Ceará, [3]Instituto Cordial, [4]Iniciativa Bloomberg para Segurança Viária Global, [5]Vital Strategies

RESUMO

Este trabalho avalia os efeitos da implantação da Faixa Azul, faixa dedicada à circulação de motocicletas em vias urbanas, sobre a ocorrência de sinistros de trânsito no Município de São Paulo. Combinando pareamento entre vias tratadas e de controle com a análise de diferença-em-diferenças, a abordagem adotada visa estimar efeitos causais da intervenção com base em dados do Infosiga (DETRAN-SP). O estudo integra um projeto mais amplo com métodos mistos, incluindo entrevistas com motociclistas e indicadores obtidos por filmagens de drone. Os resultados não apontam evidências de redução nos sinistros após a implantação da Faixa Azul, exceto por indícios de aumento nas interseções, sugerindo possíveis efeitos indesejados. Tais achados são consistentes com relatos qualitativos sobre riscos em mudanças de faixa nesses pontos. O estudo fornece evidências inéditas sobre políticas de segurança viária e reforça a importância de avaliações baseadas em métodos causais, especialmente para intervenções em fase de regulamentação nacional.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso da motocicleta consolidou-se como um dos principais meios de transporte nas grandes cidades brasileiras. Impulsionado pelo crescimento do setor de entregas por aplicativos, esse fenômeno ampliou significativamente a presença de motociclistas nas vias urbanas e, com ela, os riscos associados à segurança viária. Os dados mais recentes indicam que motociclistas representam uma parcela desproporcional das vítimas fatais no trânsito, mesmo em contextos de redução global de sinistros (WHO, 2021; Pescarini, 2024).

Diante desse cenário, o Município de São Paulo passou a adotar intervenções específicas voltadas à segurança desse grupo, destacando-se a implantação da chamada Faixa Azul, uma sinalização viária horizontal e vertical que indica uma faixa preferencial para motocicletas ao longo do leito carroçável (CET-SP, 2021). Essa política, inicialmente concebida como projeto-piloto, tem sido replicada em outras cidades brasileiras e está em processo de regulamentação nacional por meio da Secretaria Nacional de Trânsito.

Apesar da crescente adoção da Faixa Azul em São Paulo, as evidências disponíveis sobre seus efeitos reais ainda são limitadas. As avaliações conduzidas pela Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), embora sistemáticas e recorrentes, têm se baseado em comparações descritivas entre os períodos anterior e posterior à implantação, geralmente a partir de dados agregados mensais de sinistros. Tais análises consideram tendências temporais e detalham tipos de ocorrência, mas não incluem grupos de controle nem ajustam diferenças estruturais entre vias, o que restringe a capacidade de atribuir causalmente variações nos sinistros à presença da Faixa Azul. Além disso, os relatórios não incorporam métodos estatísticos formais que permitam estimar efeitos contrafactuais, dificultando a avaliação do impacto isolado da intervenção frente a outros fatores sazonais ou contextuais. Nesse sentido, permanece em aberto a necessidade de abordagens que aliem rigor metodológico e sensibilidade às particularidades da política em análise.

Este artigo busca preencher parte dessa lacuna ao avaliar os impactos da Faixa Azul sobre os sinistros com motociclistas em São Paulo, com base em uma abordagem de diferenças-em-diferenças aplicada a vias pareadas com e sem a intervenção. O estudo contribui não apenas para qualificar o debate sobre segurança de motociclistas, mas também para subsidiar o processo de regulamentação federal da Faixa Azul, fortalecendo a formulação de políticas públicas orientadas por evidências.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo integra um projeto mais amplo de avaliação de políticas públicas com base em métodos mistos, estruturado em um desenho sequencial exploratório. A etapa qualitativa, conduzida previamente por meio de 57 entrevistas semi-estruturadas com motociclistas entregadores, buscou incorporar dimensões subjetivas frequentemente ausentes nos registros oficiais, como a percepção de pertencimento ao espaço viário e a influência da infraestrutura na condução (Grisci et al., 2007). Esses achados orientaram a seleção de variáveis

e a formulação de hipóteses para a etapa quantitativa, foco deste artigo.

A estratégia empírica adotada foi a técnica de diferenças-em-diferenças (DiD), que compara a variação temporal nas taxas de sinistros entre vias com Faixa Azul (tratamento) e vias similares sem a intervenção (controle), antes e depois da implantação. Para garantir comparabilidade entre os grupos, foi construído um grupo de controle a partir de pareamento exato (restrito a vias arteriais ou de trânsito rápido, com mais de dois quilômetros) seguido de pareamento por escore de propensão (*propensity score matching*, PSM) com dois vizinhos mais próximos e reposição (Stuart e Greifer, 2021; Schiff et al., 2017).

A base de dados utilizada para a definição das vias partiu de um cadastro georreferenciado da malha viária do município, com mais de cinquenta variáveis descritivas sobre geometria, infraestrutura e regulação viária. Dentre elas, selecionou-se um subconjunto com maior potencial de confundir a relação entre a intervenção e os sinistros, incluindo largura do leito carroçável, presença de canteiro central, densidade de interseções, radares e semáforos por km, além de faixas de ônibus e ciclovias.

Os dados sobre sinistros foram extraídos da base Infosiga-SP, com registros mensais desagregados por tipo de ocorrência e localização viária. As informações sobre a implantação da Faixa Azul foram obtidas junto à CET/SP por meio da Lei de Acesso à Informação. A Figura 1 apresenta o esquema geral do desenho metodológico adotado, destacando as etapas utilizadas neste artigo e indicando, em azul, os elementos que compõem outras frentes do projeto, como a análise de imagens de drones e a avaliação qualitativa dos motociclistas por meio de entrevistas semi-estruturadas.

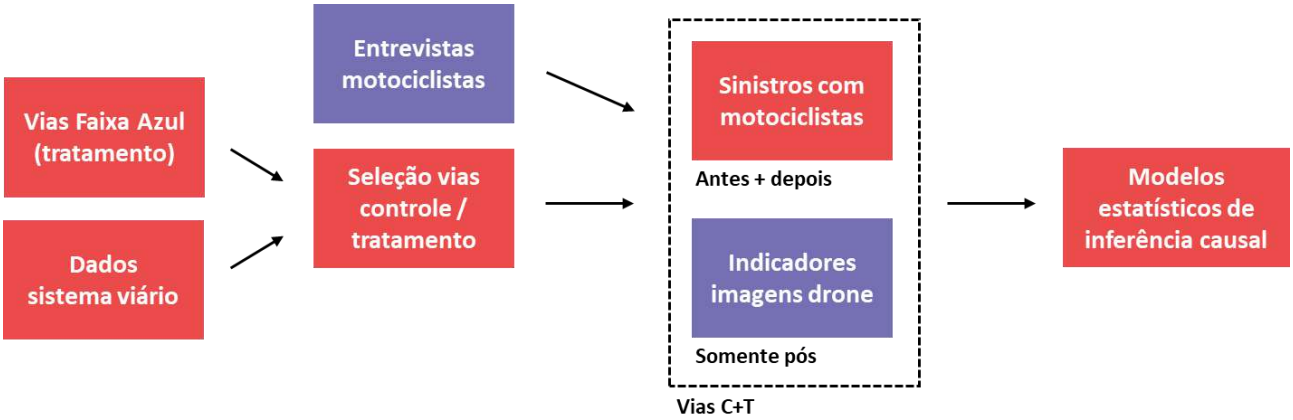


Figura 1: Esquema metodológico da análise de impacto da Faixa Azul, com destaque para as etapas de pareamento, definição dos grupos e análise de diferença-em-diferenças.

3. RESULTADOS

A análise concentrou-se nas vias com Faixa Azul implantadas até maio de 2024, para as quais foi possível observar ao menos doze meses de dados após a intervenção. Esses segmentos correspondem a 123 km de extensão, representando cerca de 51% das Faixas Azuis implementadas até o final de 2024. A Figura 2 apresenta a distribuição espacial das vias tratadas e do grupo de controle no Município de São Paulo, evidenciando a ampla dispersão geográfica das intervenções. À direita, observa-se a distribuição do escore de propensão entre os grupos, indicando razoável sobreposição das características estruturais utilizadas no pareamento.

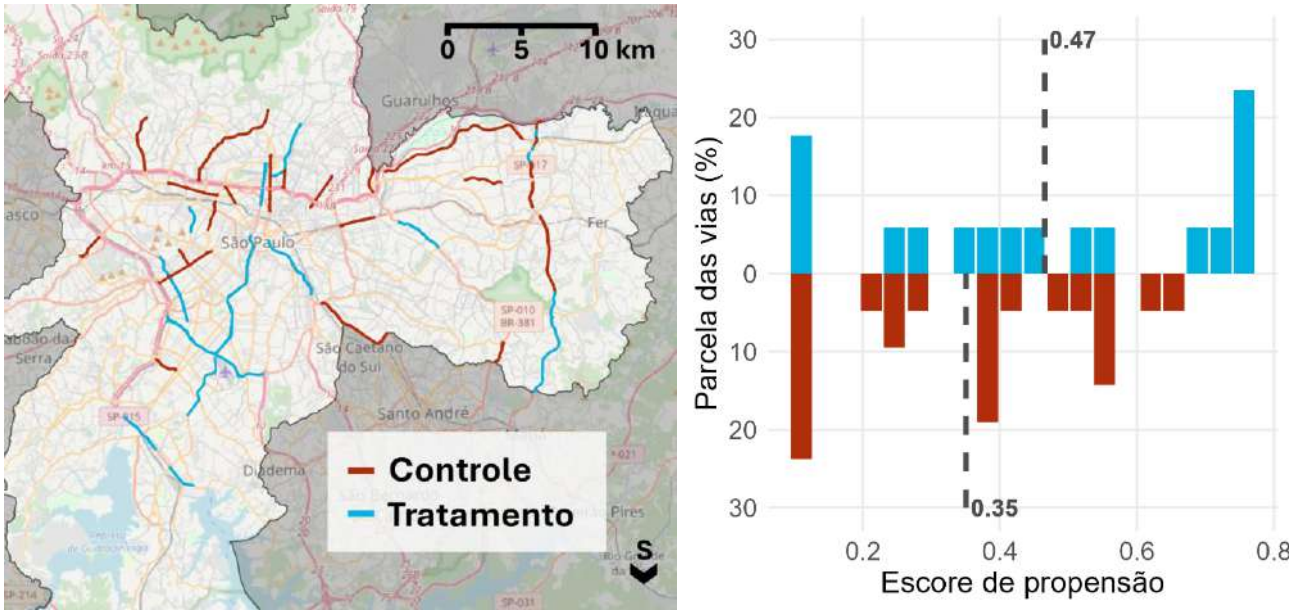


Figura 2: Distribuição espacial das vias de tratamento consideradas (com Faixa Azul) e respectivas vias de controle, após procedimentos de pareamento efetuados.

A Figura 3 apresenta a evolução da taxa de sinistros por quilômetro de via nos meses que antecedem e sucedem a implantação da Faixa Azul (T0). Observa-se que, apesar das vias tratadas apresentarem taxas sistematicamente mais elevadas em comparação às vias de controle, ambas as séries exibem trajetórias relativamente estáveis e paralelas no período anterior à intervenção. Esse comportamento sugere que o pareamento realizado entre os grupos foi bem-sucedido, reforçando a validade da suposição de tendências paralelas, que é fundamental para a aplicação do modelo de diferença-em-diferenças. Por outro lado, não se identificam mudanças abruptas no período imediatamente posterior à implantação, o que reforça a importância de análises inferenciais que considerem a estrutura dos dados e ajustem para possíveis confundidores.

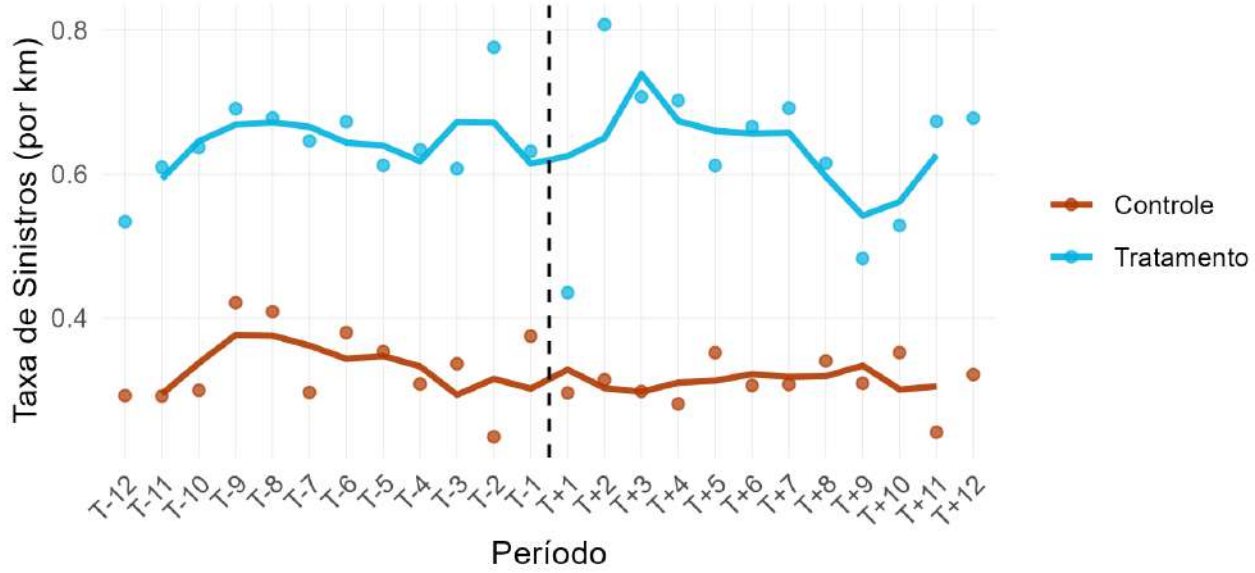


Figura 3: Tendência temporal dos sinistros com motociclistas nas vias de tratamento e controle.

A Figura 4 resume os resultados da análise de diferenças-em-diferenças, com desagregação dos sinistros entre motociclistas e não motociclistas, bem como entre interseções e trechos centrais. O único efeito com significância marginal foi identificado nas interseções envolvendo motociclistas: o efeito causal médio estimado foi de 0,14 sinistros por km, o que representa um aumento de 46% em relação ao período anterior. Ainda assim, o valor-p de 0,106 sugere cautela na interpretação, uma vez que não atinge os limiares tradicionais

de significância estatística. Os demais coeficientes, tanto para trechos centrais quanto para sinistros sem envolvimento de motocicletas, apresentaram valores-p superiores a 0,55, sem indicar efeitos estatisticamente significativos.

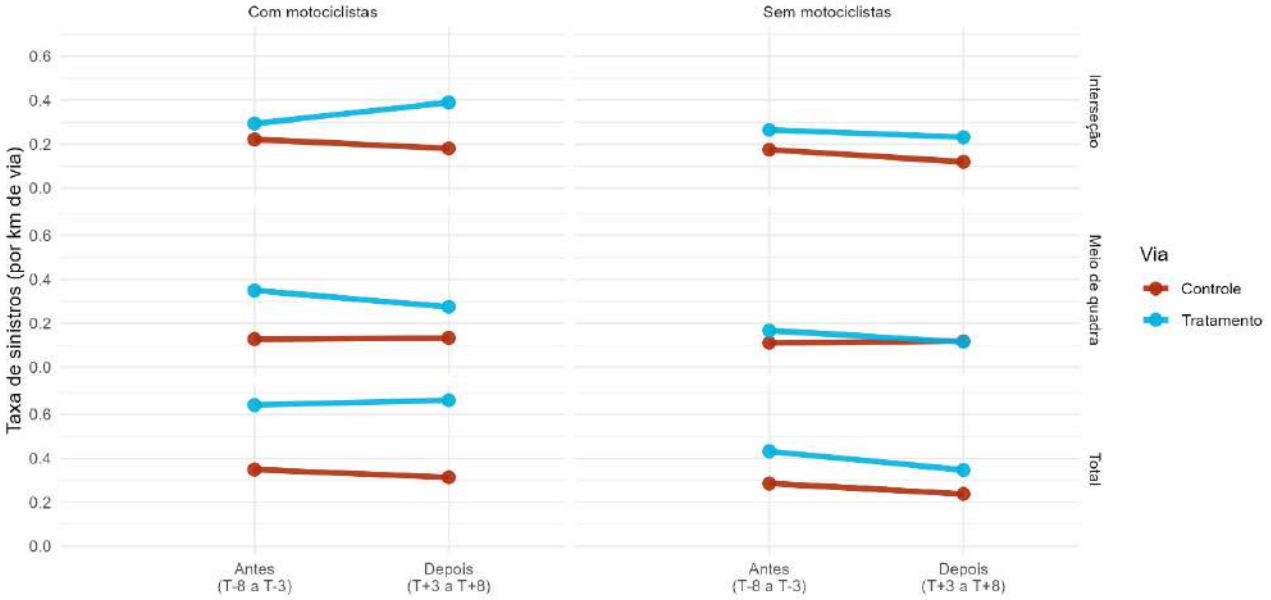


Figura 4: Estimativas do efeito causal médio da Faixa Azul sobre diferentes tipos de sinistros.

Os resultados descritos indicam que, no curto prazo, a implantação da Faixa Azul não apresentou efeitos uniformes sobre a ocorrência de sinistros envolvendo motociclistas. As estimativas de diferença-em-diferenças não revelam efeitos significativos para a maior parte dos cenários analisados, com exceção dos sinistros em interseções com envolvimento de motociclistas, onde se observou um aumento estatisticamente relevante. Tais evidências sugerem que os efeitos iniciais da intervenção são heterogêneos e possivelmente dependentes de fatores contextuais. Diante disso, torna-se necessário aprofundar a análise com abordagens complementares, o que será discutido a seguir.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Este estudo busca contribuir com uma avaliação ex post da Faixa Azul, sinalização viária dedicada a motociclistas implementada no município de São Paulo, a partir de uma abordagem quantitativa baseada em inferência causal. Os principais achados apontam para efeitos iniciais heterogêneos da intervenção: enquanto os resultados para sinistros totais e para trechos de meio de quadra não apresentaram variações estatisticamente significativas, foi identificado um aumento relevante na taxa de sinistros com motociclistas em interseções. Especificamente, observou-se um crescimento médio de 0,14 sinistros por km provocado pela Faixa Azul, representando um acréscimo de cerca de 46% em relação ao período anterior à intervenção.

Esses resultados estão em consonância com percepções qualitativas identificadas em 57 entrevistas semiestruturadas com motociclistas entregadores, usuários bastante frequentes da Faixa Azul. Os relatos indicam maior vulnerabilidade nos momentos de transição entre a Faixa Azul e as demais faixas, especialmente em cruzamentos e conversões, além de evidenciarem efeitos ambivalentes da intervenção: enquanto amplia a sensação de pertencimento e visibilidade no trânsito, também favorece comportamentos de risco associados a velocidades mais altas. Essas evidências vêm sendo complementadas por análises baseadas em imagens de drones, tratadas em outros estudos do projeto, que permitem identificar comportamentos de risco e dinâmicas de interação entre veículos em pontos críticos da via.

Do ponto de vista metodológico, este estudo reforça a relevância de combinar análises quantitativas robustas com instrumentos qualitativos para a avaliação de intervenções urbanas. A estratégia de pareamento e a aplicação de diferença-em-diferenças permitiram estimar efeitos contrafactuais com maior rigor do que abordagens comparativas simples. Além disso, a experiência acumulada no levantamento de dados primários

(entrevistas e registros geocodificados) aponta caminhos replicáveis para avaliações de políticas públicas viárias em outros contextos geográficos, em especial quando se trata de sinalizações recentes e em fase de regulamentação.

As implicações para a política pública são significativas. Os achados podem subsidiar decisões da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN) quanto à normatização da Faixa Azul em nível federal, além de apoiar ajustes no desenho e implantação da política em nível municipal. No entanto, é fundamental que tais decisões considerem tanto os resultados quantitativos quanto as evidências qualitativas, que indicam necessidade de revisão de aspectos críticos do desenho viário, especialmente em interseções.

Por fim, é importante reconhecer as limitações deste estudo. A janela temporal analisada é ainda restrita a doze meses após a implantação da Faixa Azul, o que limita a avaliação de efeitos de médio e longo prazo. Além disso, não foi possível incorporar dados de exposição ao risco, como volumes de motocicletas e demais veículos circulando por via, o que pode interferir na interpretação dos resultados. Futuras etapas da pesquisa devem incluir essas dimensões, além de explorar indicadores de velocidade e comportamento a partir de registros de radar e dados de telemetria. Também se recomenda a comparação com métodos tradicionais da literatura de segurança viária, como aqueles propostos por Hauer (1997), a fim de enriquecer a triangulação de métodos e resultados.

Agradecimentos
Esta pesquisa foi financiada com recursos da *Bloomberg Philanthropies* e aprovada pela *Biomedical Research Alliance of New York* (Protocol 24-410-522).

REFERÊNCIAS

CET-SP – Companhia de Engenharia de Tráfego (2021) Campanha Educativa “Faixa Azul”. Disponível em: https://www.cetsp.com.br/media/1206265/apresentacao_faixa_azul.pdf

Grisci, C. L. I.; P. D. Scalco e M. S. Janovik (2007) Modos de trabalhar e de ser de motoboys: a vivência espaço-temporal contemporânea. Psicologia: Ciência e Profissão, v. 27, n. 3, p. 446–461. DOI: https://doi.org/10.1590/S1414-98932007000300007

Hauer, E. (1997) Observational Before–After Studies in Road Safety: Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety. Oxford: Elsevier Science.

Pescarini, F. (2024) Número de mortes no trânsito da cidade de SP é o maior desde 2015. Folha de S. Paulo, 16 jan. 2024. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/01/numero-de-mortes-no-transito-da-cidade-de-sp-e-o-maior-desde-2015.shtml

Schiff, A.; T. Ramsay e J. McDonald (2017) Ex-post evaluation of transport interventions using causal inference methods. New Zealand Transport Agency. Disponível em: https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/630/630-ex-post-evaluation-of-transport-interventions-using-causal-inference-methods.pdf

Stuart, E. A. e P. A. Greifer (2021) Matching Methods for Confounder Adjustment: An Addition to the Epidemiologist’s Toolbox. Epidemiologic Reviews, v. 43, p. 118–129. DOI: https://doi.org/10.1093/epirev/mxab003

World Health Organization – WHO (2021) Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021–2030. Geneva. Disponível em: https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030

Mateus Humberto (mateushumberto@usp.br)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Almeida Prado, 83. 05508-070 São Paulo-SP
Manoel Mendonça de Castro Neto (manoel@det.ufc.br)
Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Campus do Pici, Bloco 703. 60455-760 Fortaleza-CE
Luis Fernando Villaça Meyer (luisfernando@institutocordial.com.br)
Beatriz de Jesus Gonçalves Francisco (beatriz.francisco@institutocordial.com.br)
Instituto Cordial. Rua Natingui, 1302. 05443-002 São Paulo-SP
Mariana Novaski (mnovaski@bigrs.org)
Ezequiel Menezes (edantas@vitalstrategies.org)
Ismael Ibarra (iibarra@vitalstrategies.org)
Iniciativa Bloomberg para Segurança Viária Global / Vital Strategies. Rua São Bento, 470, 01010-001 São Paulo - SP

FATORES DETERMINANTES DA DEMANDA POR TRANSPORTE FERROVIÁRIO URBANO: EVIDÊNCIAS DO METROREC NO CONTEXTO PRÉ E PÓS-PANDEMIA

Rodrigo Juan Martins Cardozo[1,2], Nakita Naiades Nascimento de Souza[1], Iury Ribeiro de Melo[1], Anísio Brasileiro[1], Maurício Oliveira de Andrade[1]

[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Agência de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco

RESUMO

Os sistemas metroviários desempenham papel estratégico no desenvolvimento urbano, influenciando padrões de uso do solo, promovendo a densificação urbana orientada pelo transporte público, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados à mobilidade urbana. Este artigo examina determinantes da demanda do sistema metroferroviário da Região Metropolitana do Recife, o Metrorec, comparando períodos pré e pós-pandemia. Mediante regressão linear múltipla aplicada a dados de 29 estações (janeiro/2015-setembro/2021), analisaram-se três variáveis: integração ao Sistema Estrutural Integrado, impacto pandêmico e posição da estação. O modelo demonstra que integração modal e localização estratégica são fundamentais para sustentabilidade do sistema, e que a pandemia teve impacto negativo na demanda. Conclui-se que a intermodalidade constitui fator de resiliência apontando caminhos para fortalecimento do sistema no contexto pós-pandêmico e que houve um agravamento da crise estrutural preexistente, acelerando discussões sobre modelos de gestão e financiamento do sistema.

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário urbano representa um dos pilares fundamentais da mobilidade sustentável nas grandes metrópoles contemporâneas, destacando-se por sua capacidade de transportar grandes volumes de passageiros com elevada eficiência energética e reduzidas emissões de poluentes (Lin *et al*., 2024). Os sistemas metroviários, em particular, desempenham papel estratégico no desenvolvimento urbano, influenciando padrões de uso do solo, promovendo a densificação urbana orientada pelo transporte público e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados à mobilidade urbana. Lin *et al.* (2024), destacam que, mesmo após mais de 150 anos de operação mundial, novos sistemas metroviários continuam sendo construídos e expandidos — evidenciando sua relevância contínua para o funcionamento das cidades modernas.

Cervero e Kockelman (1997) citam que diversas filosofias de design urbano têm como objetivo central a modificação dos padrões de viagem urbana. Segundo os autores, essas abordagens de desenvolvimento urbano ganharam popularidade como estratégias para moldar a demanda por viagens, compartilhando três objetivos fundamentais: i) reduzir o número de viagens motorizadas; ii) aumentar a proporção de deslocamentos não motorizados (caminhada e ciclismo); e iii) para as viagens motorizadas remanescentes, reduzir distâncias e aumentar os níveis de ocupação dos veículos, incentivando maior utilização do transporte público. Os sistemas de transporte sobre trilhos constituíram instrumentos centrais para a materialização desses objetivos urbanísticos. Sistemas metroviários e ferroviários urbanos, por sua alta capacidade e operação em infraestrutura exclusiva, oferecem alternativas eficientes ao transporte individual, contribuindo diretamente para a redução de viagens motorizadas individuais.

Vuchic (2007, p. 7-8) destaca a invenção da primeira ferrovia por George Stephenson na Inglaterra, em 1825, como evento transformador que viabilizou o crescimento das cidades modernas. Este marco no desenvolvimento dos transportes ofereceu velocidade, capacidade, conforto e confiabilidade muito superiores aos modos anteriormente disponíveis, acelerando a era industrial e revolucionando os padrões de crescimento urbano. Segundo o autor, essa revolução nos transportes eliminou praticamente o limite de tamanho das cidades anteriormente imposto pela capacidade dos sistemas de transporte de abastecer materiais e mercadorias. A magnitude dos benefícios foi tal que, após a introdução das ferrovias nos países ocidentais entre 1830 e 1840, a construção das redes ferroviárias expandiu-se rapidamente, tornando praticamente todas as cidades europeias e norte-americanas dependentes dos serviços ferroviários para seu funcionamento e crescimento econômico até o final do século XIX.

No contexto brasileiro, o transporte ferroviário iniciou-se durante o século XIX sob um paradigma de iniciativa privada, com o Estado Imperial concedendo direitos de construção e operação voltados principalmente ao transporte da produção cafeeira para os portos de exportação. Progressivamente, o governo brasileiro assumiu papel mais ativo no setor, investindo na expansão da malha ferroviária e reassumindo o controle de concessões privadas por meio de decisões públicas ou mediante o exercício de prerrogativas contratuais. Esse movimento

de consolidação estatal atingiu seu ápice em 1957, com a constituição da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) — entidade responsável pela unificação e administração centralizada de todo o patrimônio ferroviário federal (Lima Neto *et al*., 2001).

Após várias reformas regulatórias que transformaram profundamente a estrutura do setor, é criada a Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) em 1984, como resultado da separação entre os serviços de transporte de carga e de passageiros urbanos. A empresa assume a operação dos sistemas ferroviários urbanos anteriormente sob administração da RFFSA. A CBTU surge, portanto, como a principal operadora de sistemas ferroviários urbanos no Brasil, atuando predominantemente em regiões metropolitanas, que enfrentavam grandes desafios de mobilidade e desigualdade socioespacial. Assim, também é criado o Metrorec, gerenciado pela CBTU a partir de um contrato de prestação de serviço (Moraes e Santos, 2020). O sistema conecta o centro do Recife a municípios periféricos da região metropolitana.

Na Região Metropolitana do Recife (RMR), o sistema ferroviário urbano Metrorec opera como elemento central do transporte público, integrado ao Sistema Estrutural Integrado (SEI), concebido em 1985 e revisado em 1994 e 2008. A gestão do Sistema de Transporte Público Coletivo de Passageiros da RMR (STPP/RMR) é compartilhada entre o Consórcio de Transporte Metropolitano (CTM), criado em 2008, responsável pelos serviços rodoviários do SEI (ônibus convencional e BRT), e a CBTU, que administra os modos ferroviários (metrô e VLT). O Metrorec compreende 36 estações em dois sistemas: 29 estações eletrificadas (39,4 km) e 7 estações diesel (31,8 km). A integração entre o modo ferroviário e o SEI é fundamental para garantir atratividade, eficiência e sustentabilidade do sistema metropolitano, viabilizando viagens multimodais com tarifação integrada e ampliando o alcance geográfico e a acessibilidade do transporte ferroviário (Sampaio; Lima Neto; Sampaio, 2008).

Mesmo antes da pandemia de COVID-19, o cenário brasileiro já revelava sinais preocupantes de crise de demanda nos sistemas de transporte público, inclusive nos modos sobre trilhos. Com a chegada da pandemia em março de 2020, esse quadro foi amplificado. A emergência sanitária provocou um choque abrupto na mobilidade urbana global, intensificando fragilidades estruturais já presentes nos sistemas brasileiros. No caso do Metrorec, observou-se uma acentuada queda na demanda, que evidenciou tanto as limitações históricas do sistema quanto a importância estratégica da integração modal como um possível fator de resiliência. Nesse sentido, esta pesquisa justifica-se por analisar os fatores determinantes da demanda pelo transporte ferroviário urbano, com base na experiência do Metrorec nos períodos pré e pós-pandemia, destacando especialmente o papel da integração modal como variável explicativa da sustentabilidade e resiliência do sistema. Ao fazê-lo, contribui para a compreensão acadêmica do fenômeno e para o fortalecimento da gestão pública da mobilidade urbana, oferecendo subsídios para decisões estratégicas de médio e longo prazo.

O objetivo principal deste artigo é quantificar o impacto da pandemia de COVID-19 sobre a demanda de passageiros do Metrorec, identificando o papel da integração com o Sistema Estrutural Integrado (SEI) como fator de mitigação dos efeitos da crise. Especificamente, busca-se: i) mensurar a magnitude da redução da demanda durante o período pandêmico; ii) avaliar se estações integradas ao SEI apresentaram comportamento diferenciado em relação às estações não integradas; iii) analisar o papel das estações de entrada no sistema como concentradoras de demanda; e iv) fornecer subsídios para estratégias de recuperação e fortalecimento do sistema no período pós-pandêmico.

2. METODOLOGIA

Para todas as análises estatísticas e econométricas apresentadas neste estudo foi utilizado o software Gretl versão 2025a. Os dados foram fornecidos pela CBTU e referem-se à demanda mensal de passageiros das 29 estações eletrificadas do Metrorec, correspondentes ao sistema metroviário da Região Metropolitana do Recife. O período analisado compreende janeiro de 2015 a setembro de 2021, totalizando 81 meses de observações. Foram utilizados exclusivamente os dados das linhas eletrificadas, excluindo-se as 7 estações com tração diesel, concentrando a análise no sistema que constitui o núcleo principal do transporte ferroviário urbano da RMR.

Inicialmente, foi realizada uma análise exploratória dos dados para verificar a existência de diferenças na demanda de passageiros a partir das variáveis explicativas. Utilizaram-se gráficos *boxplot* para examinar a

distribuição da demanda mensal de passageiros em relação às seguintes variáveis dicotômicas: i) SEI: variável binária que indica se a estação possui integração modal com o sistema de ônibus (1 = integrada ao SEI, 0 = não integrada); ii) Pandemia: variável binária temporal (1 = período pandêmico de março de 2020 a setembro de 2021, 0 = período pré-pandêmico de janeiro de 2015 a fevereiro de 2020); iii) Estação de Entrada: variável binária que identifica se a estação está localizada nas extremidades do sistema metroviário (1 = estação de ponta, 0 = estação intermediária). Adicionalmente, foi elaborada uma matriz de correlação para examinar as relações lineares entre as variáveis do estudo, permitindo identificar possíveis associações entre os fatores explicativos e a variável dependente.

Após a análise da correlação, foi aplicada a técnica de regressão linear múltipla com o objetivo de quantificar o impacto das variáveis explicativas sobre a demanda de passageiros do Metrorec. O método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) foi empregado sobre um conjunto de 58 observações, contendo dados referentes às 19 estações do Metrorec com as médias da demanda de antes (63 meses, de janeiro de 2015 a fevereiro de 2020) e depois da pandemia (43 meses, de março de 2020 a setembro de 2021). Para validar o modelo foram aplicados os seguintes testes: i) significância dos parâmetros (p-valor): a 5%; ii) teste de White para heterocedasticidade dos resíduos; iii) normalidade dos resíduos; iv) multicolinearidade (VIF).

3. RESULTADOS

A análise descritiva da variável dependente (demanda mensal de passageiros) revelou uma distribuição com elevada variabilidade. A demanda média foi de 215.800 passageiros por mês, com mediana de 105.060 passageiros, indicando assimetria positiva na distribuição. O desvio padrão de 268.300 passageiros evidencia alta dispersão dos dados, com valores mínimos de 11.152 passageiros e máximos de 1.285.000 passageiros mensais.

A matriz de correlação demonstrou que todas as variáveis explicativas apresentam correlação significativa com a demanda de passageiros (Figura *1* - Matriz de CorrelaçãoFigura 1). A variável SEI apresentou correlação positiva moderada (c = 0,5) com a demanda, indicando que estações integradas ao sistema tendem a apresentar maior volume de passageiros. A variável Pandemia mostrou correlação negativa (c = -0,3), confirmando a redução da demanda durante o período pandêmico. A variável Estação de Entrada apresentou correlação positiva (c = 0,5), Essas estações possuem maior área de influência por constituírem os principais pontos de acesso ao sistema metroviário.

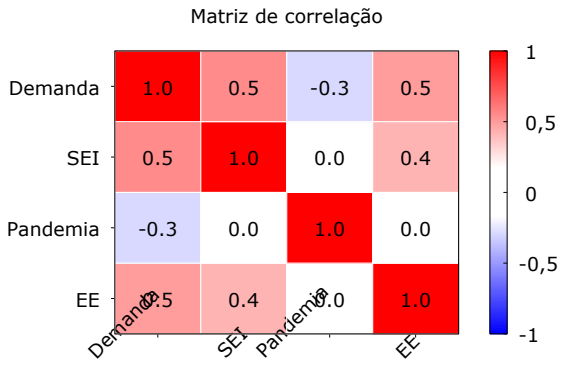


Figura 1 - Matriz de Correlação

Os gráficos boxplot (Figura 2) revelaram diferenças na distribuição da demanda entre as categorias das variáveis explicativas, conforme detalhado a seguir:

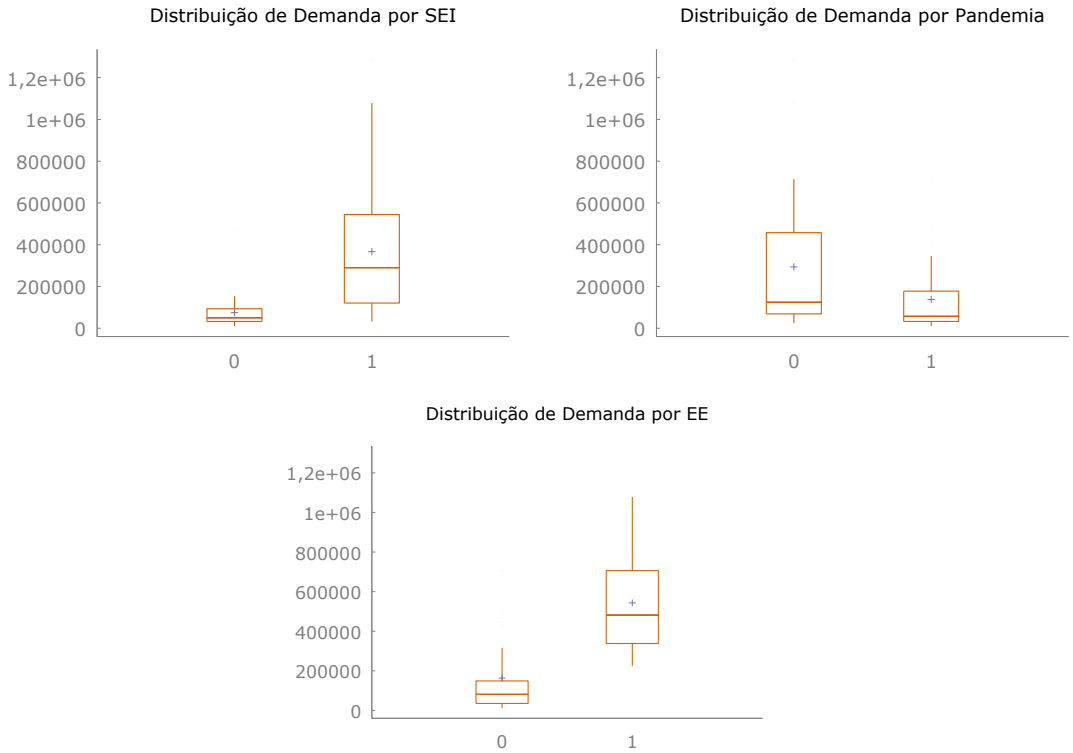


Figura 2 – *Boxplot* Demanda x (SEI, Pandemia e Estação de Entrada)

Demanda x SEI: A análise comparativa evidenciou diferenças expressivas entre estações integradas e não integradas. Estações não integradas (SEI = 0) apresentaram demanda média de 74.930 passageiros mensais, com mediana de 49.710 passageiros (n=30). Em contraste, estações integradas ao SEI (SEI = 1) registraram demanda média de 366.700 passageiros mensais, com mediana de 289.500 passageiros (n=28). Isso representa uma diferença na demanda média na mediana, demonstrando o impacto significativo da integração modal no volume de passageiros.

Demanda x Pandemia: O boxplot confirmou o impacto da pandemia na demanda do sistema. No período pré-pandêmico (Pandemia = 0), a demanda média foi de 293.700 passageiros mensais, com mediana de 124.900 passageiros (n=29). Durante o período pandêmico (Pandemia = 1), a demanda média reduziu para 137.900 passageiros mensais, com mediana de 57.530 passageiros (n=29). Isso representa uma redução na demanda média e na mediana, destacando o impacto negativo uniforme da COVID-19 em todas as estações do sistema.

Demanda por Estação de Entrada (EE): O boxplot revelou a maior diferença observada entre as variáveis analisadas. Estações intermediárias (EE = 0) apresentaram demanda média de 163.400 passageiros mensais, com mediana de 81.600 passageiros (n=50). As estações de ponta (EE = 1) registraram demanda média de 543.200 passageiros mensais, com mediana de 481.500 passageiros (n=8). Isso representa uma diferença na demanda média e na mediana, confirmando que estações terminais concentram significativamente mais passageiros devido ao seu maior raio de abrangência territorial, funcionando como principais pontos de acesso ao sistema metroviário.

O modelo obteve R^2 ajustado de 0,44, indicando que as variáveis explicativas conseguem representar parcialmente a variação na demanda por transporte ferroviário. A equação estimada foi:

$$\text{Demanda} = 152.840 + 221.221 \times \text{SEI} - 155.829 \times \text{Pandemia} + 247.034 \times \text{EE}$$

Os coeficientes são estatisticamente significativos ($p < 0,01$) para todas as variáveis. O teste F global ($F = 16,049$; p-valor = $1,40 \times 10^{-7}$) confirma a significância estatística do modelo como um todo (**Tabela 1**).

Tabela 1: Resultados da Regressão Linear Múltipla

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	Estatística t	p-valor
Constante	152.840	45.072,7	3,391	0,0013
SEI	221.221	57.857,1	3,824	0,0003
Pandemia	-155.829	52.633,6	-2,961	0,0046
Ponta	247.034	83.842,9	2,946	0,0047

O teste de White não detectou problemas de heterocedasticidade (p-valor > 0,05), confirmando que a variância dos resíduos é constante, atendendo ao pressuposto de homoscedasticidade do modelo MQO. Todos os valores de VIF estão bem abaixo do limite crítico de 10, indicando ausência de multicolinearidade problemática entre as variáveis explicativas. O teste de normalidade dos resíduos indicou desvio da distribuição normal dos resíduos. Contudo, este resultado não compromete a validade das estimativas do MQO, especialmente considerando o tamanho da amostra (n=58) e o Teorema do Limite Central. O coeficiente positivo e estatisticamente significativo da variável SEI confirma a importância da integração modal para o sucesso de sistemas de transporte público. Este resultado indica que estações integradas ao SEI apresentaram, em média, 221.221 passageiros adicionais por mês do que as que não integram. Demonstram também que a integração física e tarifária entre diferentes modos de transporte amplia significativamente a área de abrangência do sistema ferroviário. A integração com o sistema de ônibus permite que o metrô capture demanda de regiões mais distantes, superando as limitações geográficas da rede fixa e aumentando a acessibilidade do sistema para populações periféricas.

O coeficiente negativo da variável Pandemia quantifica o impacto da crise sanitária sobre a demanda do Metrorec, representando uma redução da demanda base. A redução observada reflete as restrições de mobilidade impostas pelas autoridades sanitárias e mudanças comportamentais dos usuários. O coeficiente da variável Estação de Entrada apresentou a maior magnitude entre todas as variáveis analisadas, representando um incremento de 162% na demanda base. Este resultado confirma a função estratégica das estações terminais como principais pontos de acesso ao sistema metroviário. A concentração de demanda nas estações de ponta pode ser explicada por múltiplos fatores: (i) maior raio de abrangência territorial, captando usuários de áreas periféricas com menor densidade de transporte público; (ii) função de interface entre o sistema ferroviário e outros modos de transporte, incluindo transporte individual e coletivo; (iii) localização estratégica em áreas de maior densidade populacional ou atividade econômica; e (iv) papel de hub de distribuição para destinos finais não diretamente servidos pelo metrô. Essa concentração de demanda em estações terminais também reflete características específicas da estrutura urbana da RMR, onde o sistema metroviário serve como espinha dorsal do transporte público, conectando áreas periféricas ao centro metropolitano.

4. CONCLUSÕES

A análise identificou os principais fatores que influenciam a demanda do Metrorec, oferecendo subsídios para o planejamento e gestão do transporte ferroviário urbano na Região Metropolitana do Recife. Três variáveis se destacam: a integração modal com o SEI, que impulsiona a demanda; o impacto da pandemia, que a reduziu; e a localização em estações de ponta, que atrai mais passageiros. Esses achados confirmam as hipóteses iniciais e indicam que a intermodalidade e o papel estratégico das estações terminais são determinantes na atratividade do sistema. Por outro lado, a pandemia agravou uma crise estrutural, acelerando discussões sobre modelos de gestão e financiamento, incluindo desestatização e parcerias público-privadas.

A concentração de demanda em estações estratégicas aponta oportunidades para políticas de desenvolvimento urbano orientado ao transporte (TOD), com adensamento e diversificação de usos do solo. Os dados indicam caminhos para a requalificação do sistema, como ampliar a integração modal, fortalecer estações-chave, reconquistar a confiança dos usuários e alinhar estratégias urbanas ao transporte coletivo. Independentemente do modelo de gestão — público ou privado — esses fatores são cruciais para a sustentabilidade financeira e a função social do Metrorec. Apesar do bom desempenho do modelo (R^2 ajustado = 0,44), há espaço para pesquisas futuras com variáveis complementares, como perfil socioeconômico, qualidade do serviço e fatores ambientais.

Esses achados confirmam as hipóteses iniciais e indicam que a intermodalidade e o papel estratégico das estações terminais são determinantes na atratividade do sistema. Por outro lado, a pandemia agravou uma crise

estrutural, acelerando discussões sobre modelos de gestão e financiamento, incluindo desestatização e parcerias público-privadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CBTU (2025). Características Recife. Disponível em: <https://intranet.cbtu.gov.br/index.php/pt/empresa-recife/caracteristicas-recife>. Acesso em: 12 jul. 2025.

Cervero, R. & Kockelman, K. (1997) Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol 2, p. 199-219, ISSN 1361-9209, DOI: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6

Lima Neto, O *et al*. (2001) *Transporte no Brasil: história e reflexões* (1ª. ed.). Recife: Editora UFPE.

Lin, D., Zhou, Z., Weng, M., Broere, W., & Cui, J. (2024). Metro systems: Construction, operation and impacts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 143, p 105373. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105373

Morais, A. C. M., & Santos, E. M. (2020). Avaliação das estruturas organizacionais dos organismos gestores da mobilidade diante da Política Nacional de Mobilidade Urbana. *URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 12, e20190232. DOI: 10.1590/2175-3369.012.e20190232

Sampaio, B. R., Lima Neto, O., & Sampaio, Y. (2008). Efficiency analysis of public transport systems: Lessons for institutional planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(3), 445-454. DOI:10.1016/j.tra.2008.01.006

Vuchic, V. R. (2007) History and Role of Public Transportation in Urban Development. In: Vuchic, Vukan R. *Urban Transit Systems and Technology*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. cap. 1. DOI: 10.1002/9780470168066.ch1

Rodrigo Juan Martins Cardozo (rodrigo.cardozo@ufpe.br)
Nakita Naiades Nascimento de Souza (nakita.naiades@ufpe.br)
Fernanda Catarina Ribeiro da Luz (fernanda.rluz@ufpe.br)
Iury Ribeiro de Melo (Iury.ribeiro@ufpe.br)
Anísio Brasileiro (anisio.brasileiro@ufpe.br)
Maurício Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas
Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE

GOVERNANÇA METROPOLITANA E GESTÃO INTEGRADA DO TRANSPORTE: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E REVISÃO SISTEMÁTICA

Thadeu André Melo, Rômulo Dante Orrico Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Este artigo apresenta uma análise bibliométrica e uma revisão sistemática da literatura sobre governança metropolitana e gestão integrada do transporte, com ênfase na interseção desses temas com os princípios do Governo Aberto. Foram analisados 271 documentos extraídos das bases *Scopus* e Web of Science, no período de 1994 a 2025, utilizando a ferramenta Bibliometrix-R. A análise identificou as principais tendências, autores, instituições, fontes científicas e palavras-chave do campo. Os resultados revelam um crescimento consistente da produção científica a partir de 2012, com destaque para temas como integração institucional, políticas públicas de transporte e governança multinível que foram explorados com mais profundidade. Este estudo oferece uma base estruturada para subsidiar pesquisas futuras e o desenvolvimento de modelos de gestão metropolitana alinhados aos princípios de transparência, participação social e *accountability*.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A governança metropolitana e a gestão integrada do transporte público emergem como temas centrais no enfrentamento dos desafios contemporâneos das grandes aglomerações urbanas. Nas últimas décadas, o crescimento desordenado das cidades, associado à fragmentação institucional e à falta de articulação entre os diferentes níveis de governo, resultou em sistemas de transporte pouco eficientes, desarticulados e socialmente excludentes. Esse cenário é especialmente crítico nas regiões metropolitanas, onde os fluxos urbanos extrapolam os limites administrativos dos municípios, exigindo uma gestão compartilhada, integrada e orientada por princípios de eficiência, equidade e sustentabilidade. Entretanto, observa-se que a ausência de mecanismos institucionais robustos, somada à sobreposição de competências e à baixa interoperabilidade entre órgãos públicos, compromete significativamente a formulação e a implementação de políticas de mobilidade urbana efetivas. De acordo com Neves (2024), os princípios do Governo Aberto, *transparência, participação cidadã, prestação de contas e inovação tecnológica*, são elementos centrais para fortalecer a confiança pública e qualificar a gestão estatal. A transparência garante acesso contínuo a informações governamentais; a participação amplia o envolvimento da sociedade civil nas decisões; a responsabilização assegura integridade institucional; e a tecnologia promove engajamento e integração entre atores. No setor de transportes, esses princípios oferecem bases para modernizar a governança, reforçar a *accountability* e ampliar o controle social, com decisões mais democráticas e orientadas por dados abertos.

O conceito de governança multinível, introduzido por Marks (1993) e aprofundado por Marks e Hooghe (2004), destaca a articulação entre níveis de governo. Esse referencial é essencial para analisar a governança metropolitana do transporte, que exige coordenação interfederativa e integração de políticas de mobilidade. A literatura internacional tem avançado de forma consistente na consolidação de modelos de governança multinível aplicados à gestão integrada do transporte público, com destaque para experiências consolidadas em metrópoles europeias, como *Transport for London* (Reino Unido), *Île-de-France Mobilités* (Paris) e *Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg – VBB* (Alemanha). Essas instituições configuram referências internacionais na articulação de competências, na integração institucional, tarifária e operacional, bem como na coordenação de políticas públicas voltadas à mobilidade urbana sustentável (Papa e Bertolini, 2015; Givoni e Banister, 2015; Seetharam Sridhar, K. *et al*., 2020; Tiznado-Aitken, I *et al*., 2023). Observa-se, nesses modelos, a presença de estruturas legais robustas, capazes de assegurar a governança efetiva em contextos metropolitanos, com elevados níveis de interoperabilidade entre agentes públicos, operadores e sociedade civil.

No entanto, quando se observa o contexto latino-americano e, particularmente, o caso brasileiro, constata-se que a adoção de modelos semelhantes enfrenta restrições estruturais, institucionais e culturais. Esses desafios se expressam, principalmente, na fragmentação federativa, na ausência de autoridades metropolitanas com competências plenas, na sobreposição de atribuições entre entes governamentais e na limitada tradição de cooperação interfederativa (Silva *et al*., 2019; Trejo Nieto e Niño Amézquita, 2021; Martins e Costa, 2021; CONTROLADORIA-GERAL DA UNIÃO, 2023).

Apesar dos avanços, persiste uma lacuna na produção científica quanto à articulação sistemática entre governança metropolitana, gestão integrada da mobilidade e os princípios do Governo Aberto. Essa limitação

pode comprometer tanto o avanço teórico quanto a aplicação prática em contextos urbanos. Diante disso, este artigo apresenta uma análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura internacional sobre governança metropolitana e gestão integrada do transporte, entre 1994 e 2025. O objetivo é mapear a evolução do campo, identificar autores, periódicos, instituições de destaque e evidenciar tendências, lacunas e temas emergentes. O estudo visa fornecer bases conceitual e empírica para subsidiar o desenvolvimento de modelos de governança alinhados ao Governo Aberto, com foco na aplicabilidade ao contexto brasileiro. Embora existam teses, dissertações e relatórios de pesquisa sobre o tema produzidos por universidades e institutos federais brasileiros, esses documentos não foram incluídos nesta etapa da revisão. Optou-se, por decisão metodológica e devido à dispersão de sua disponibilização eletrônica, pela restrição às bases *Web of Science* e *Scopus*, visando à padronização e comparabilidade dos dados.

2. METODOLOGIA

Diversas abordagens sistemáticas têm sido aplicadas para apoiar pesquisadores na identificação, organização e interpretação de evidências científicas acumuladas, permitindo uma compreensão estruturada do estado da arte em determinados campos do conhecimento (Chabowski *et al*., 2011; Valenzuela-Fernandez *et al*., 2019). A metodologia adotada neste estudo baseia-se em uma combinação entre análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura, conforme os procedimentos consolidados na literatura científica (Aria & Cuccurullo, 2017; Rowley & Hartley, 2017). Este método permite, de forma objetiva e rigorosa, mapear a evolução, as tendências, os atores-chave e as lacunas no conhecimento acumulado sobre governança metropolitana e gestão integrada do transporte.

2.1. Definição do Corpus de Análise

Foram selecionadas as bases de dados *Web of Science* (WoS) e *Scopus*, reconhecidas pela abrangência, confiabilidade e qualidade editorial de suas coleções. Essas bases são amplamente utilizadas em estudos bibliométricos e revisões sistemáticas devido à cobertura de publicações de alto impacto nos campos da engenharia de transportes, planejamento urbano, políticas públicas e ciências sociais aplicadas (Yunus *et al*., 2013; Li & Hale, 2016). O processo metodológico envolveu as seguintes etapas:

- Definição das palavras-chave: Foram identificados 33 termos relacionados aos temas centrais da pesquisa, posteriormente consolidados em oito palavras-chave estratégicas: *Metropolitan Governance, Regional Governance, Transit Authorities, Public Transport, Multi-level Governance, Urban Mobility Management, Urban Mobility e Transport Policy.*
- Formulação de *strings* de busca: Foram elaboradas cinco expressões booleanas, que combinaram as palavras-chave para maximizar a abrangência das buscas e a relevância dos resultados.
- Execução das buscas: As consultas foram realizadas simultaneamente nas bases WoS e *Scopus*, em abril de 2025.
- Depuração dos dados: Procedeu-se à limpeza dos dados, incluindo a remoção de registros duplicados, normalização de campos (autores, instituições, títulos) e exclusão de documentos fora do escopo temático.

O processo resultou na consolidação de um corpus final composto por 271 publicações científicas, representando uma amostra robusta e representativa da produção acadêmica internacional sobre o tema no período de 1994 a 2025.

2.2. Ferramentas e Procedimentos Analíticos

As análises foram conduzidas utilizando o software Bibliometrix-R, aliado à interface gráfica Biblioshiny, permitindo a realização de análises estatísticas, geração de mapas de conhecimento e visualizações interativas. Foram adotados três níveis principais de análise:

- Análise Descritiva: Quantificação do volume de publicações ao longo do tempo, identificação de periódicos, autores, instituições e países mais produtivos.
- Análise Estrutural: Construção de redes de coautoria, redes institucionais e mapas de colaboração internacional.
- Análise Temática: Avaliação da frequência de palavras-chave, identificação de *clusters* temáticos e classificação dos tópicos em quadrantes (temas motores, básicos, de nicho e emergentes), conforme o modelo de Callon *et al*. (1991) e Cobo *et al*. (2011).

Essa abordagem permite compreender tanto a evolução temporal da produção científica quanto sua configuração temática, relacional e geográfica, oferecendo uma visão integrada e abrangente do estado da arte na área de governança metropolitana e gestão integrada do transporte.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos quanto a evolução temporal das produções, relevância das fontes científicas, autores e instituições de destaque, documentos de maior impacto onde aspectos relacionados diretamente ao tema de pesquisa (governança metropolitana e gestão integrada do transporte) foram explorados com mais profundidade, os *clusters* temáticos a partir dos tópicos indicados nos quadrantes, além das palavras-chave mais recorrentes.

3.1. Evolução Temporal da Produção Científica

A análise temporal revela que a produção acadêmica sobre governança metropolitana e gestão integrada do transporte foi esporádica até o início da década de 2010. A partir de 2012, observa-se um crescimento contínuo e significativo, alcançando 30 publicações em 2024 e com uma taxa de crescimento anual de 9,13% no período de 1994 a 2024. Esse crescimento reflete o aumento da atenção acadêmica aos desafios da gestão urbana em contextos metropolitanos, bem como o amadurecimento das discussões sobre governança multinível, integração modal e uso de tecnologias de dados abertos aplicados à mobilidade urbana.

3.2. Fontes Científicas Relevantes

A análise das fontes científicas evidencia uma concentração dos artigos em periódicos especializados em transporte, sustentabilidade urbana e políticas públicas. Os mais relevantes foram:

- *Transport Policy* (6,6% dos artigos; FI = 6,3) – referência em políticas de transporte urbano e regional;
- *Sustainability* (5,9%; FI = 3,3) – destaca-se pela abordagem interdisciplinar entre desenvolvimento sustentável e planejamento urbano;
- *Case Studies on Transport Policy* (4,8%; FI = 2,4) – com foco em estudos de caso e experiências internacionais de gestão do transporte;
- *International Journal of Sustainable Transportation* (2,6%; FI = 3,1) – com foco em sustentabilidade e mobilidade urbana.

3.3. Autores e Instituições de Destaque

Entre os autores mais produtivos destacam-se:

- Michele De Gennaro (*Joint Research Centre – European Commission*);
- Andres Monzon (*Universidad Politécnica de Madrid*);
- Giovanni Vecchio (*Pontificia Universidad Católica de Chile*).

Em termos institucionais, a liderança recai sobre:

- *Pontificia Universidad Católica de Chile* (11 publicações);
- *University of Oxford* (9);
- *Universities of Genoa, Leeds* e *Politécnica de Madrid* (7 cada).

Isso demonstra uma concentração da produção científica na Europa e na América Latina, com crescente participação de centros de excelência em transporte e urbanismo.

3.4 Documentos de Maior Impacto

O artigo de maior fator de impacto é "*Assessing equity in transport accessibility to work and study: the Bogotá region*", de Guzmán *et al*. (2017), que analisa as desigualdades socioespaciais vinculadas à infraestrutura de mobilidade urbana, propondo o uso de métricas de desigualdade como ferramenta para a formulação de políticas públicas. O estudo reforça a necessidade de intervenções localizadas e de planejamento integrado para mitigar disparidades no acesso ao trabalho e à educação. Também se destacam:

- "*A paradigm shift in urban mobility: Policy insights from travel before and after COVID-19 to seize the opportunity*" de Thombre & Agarwal (2021), que investiga os efeitos da pandemia de COVID-19 sobre o comportamento de mobilidade urbana e os desdobramentos para a formulação de políticas públicas. Os autores recomendam investimentos em modos ativos de transporte e em infraestrutura sustentável, destacando a importância da recuperação do transporte público para garantir acesso equitativo, especialmente para trabalhadores essenciais e populações de baixa renda. A pesquisa defende a adoção de incentivos tarifários e a promoção de uma infraestrutura de transporte urbano integrada e resiliente.
- "*Part II: Policy instruments for sustainable road transport*" de Santos *et al.* (2010), que analisam instrumentos de política para transporte sustentável, destacando que a atuação de autoridades metropolitanas na gestão integrada favorece a mitigação de externalidades negativas do transporte

rodoviário e gera benefícios econômicos e sociais. Defendem uma abordagem sistêmica, na qual a integração entre políticas setoriais é condição essencial para a promoção da mobilidade urbana sustentável.

- "*Integrated transport planning in the UK: From concept to reality*" de Hull (2005), que analisa os arranjos institucionais no Reino Unido, evidenciando que a fragmentação, a falta de coordenação e a incompatibilidade entre agendas comprometem a implementação de políticas integradas de transporte e uso do solo. Defende a construção de estágios de integração, local, regional e nacional, como estratégia para articular atores e instâncias decisórias. Reconhece, contudo, que a integração institucional, embora necessária, enfrenta relevantes barreiras técnicas, políticas e culturais.

É importante destacar que a bibliometria pode trazer artigos de alto impacto, relevantes para a integração de políticas públicas de mobilidade com dimensões sociais, econômicas e ambientais, mas que não possuem aderência direta à governança metropolitana. Tal distinção, explicitada como limitação metodológica, reforça a necessidade de diferenciar publicações incluídas apenas pelo peso quantitativo das que realmente estruturam a fundamentação teórica sobre o objeto de pesquisa.

3.5. Análise Temática e Palavras-chave

A análise de coocorrência de palavras-chave resultou na formação de *clusters* temáticos robustos. As palavras mais recorrentes foram: *Transport Policy, Urban Mobility, Public Transport, Governance, Sustainable Mobility.*

O diagrama estratégico gerado classifica os temas da seguinte forma:

- Temas Motores: Governança multinível, políticas de transporte sustentável e mobilidade urbana.
- Temas Básicos: Planejamento urbano, gestão da mobilidade e integração institucional.
- Temas de Nicho: Parcerias intermunicipais e consórcios de transporte.
- Temas Emergentes ou em Declínio: *Policy Transfer, Policy Learning e Mobility Management*, que indicam fronteiras pouco exploradas na literatura, mas altamente relevantes para inovação institucional.

4. CONCLUSÕES

Embora os estudos sobre o campo da governança metropolitana e da gestão integrada do transporte ainda estejam em processo de consolidação, os resultados do levantamento bibliométrico denotam que seu crescimento é consistente, especialmente após 2012. A literatura destaca a importância da integração institucional e do fortalecimento de autoridades metropolitanas, como estratégia central para superar desafios associados à fragmentação da gestão pública nas metrópoles. O atual contexto institucional impõe barreiras à formulação e execução de políticas de mobilidade urbana integradas, evidenciando a necessidade de fortalecer os arranjos de governança metropolitana. Nesse sentido, a adoção de mecanismos colaborativos, transparentes e participativos, alinhados aos princípios do Governo Aberto constitui elemento central para a modernização da gestão pública em ambientes metropolitanos complexos.

Entre as lacunas identificadas estão:

- A escassez de estudos aplicados em países do *Global South*;
- Pouca produção científica sobre a operacionalização de dados abertos para a mobilidade;
- Necessidade de aprofundamento teórico sobre *policy transfer* e *policy learning* no contexto de governança metropolitana.

Recomenda-se, para pesquisas futuras, a ampliação do corpus documental com a inclusão de estudos acadêmicos e institucionais sobre governança e gestão integrada do transporte, bem como de revistas científicas brasileiras e latino-americanas. Sugere-se também a elaboração de modelos de governança integrados, baseados em dados abertos, plataformas colaborativas e decisões participativas, em consonância com os princípios da engenharia de transportes e da governança urbana sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aria, M., Cuccurullo, C., 2017. *Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis*. J. Informet. 11, 959–975. DOI: https://doi.org/10.1016/j. joi.2017.08.007.

Callon, M., Courtial, J.P., Laville, F., 1991. *Co-word analysis as a tool for describing the network of interactions between basic and technological research-the case of polymer chemistry.* Scientometrics 22, 155–205. DOI: https://doi.org/10.1007/ BF02019280.

Chabowski, B.R., Mena, J.A., Gonzalez-Padron, T.L., 2011. *The structure of sustainability research in marketing, 1958–2008: a basis for future research opportunities.* J. Acad. Mark. Sci. 39, 55–70. DOI:https://doi.org/10.1007/s11747-010-0212-7.

Cobo, M.J., L´opez-Herrera, A.G., Herrera-Viedma, E., Herrera, F., 2011. *An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: a practical application to the Fuzzy sets Theory field.* J. Informetrics, 5, 146–166. DOI: https://doi. org/10.1016/j.joi.2010.10.002.

CONTROLADORIA-GERAL DA UNIÃO (CGU). *6º Plano de Ação Brasileiro em Governo Aberto (2023–2027)*. Brasília: CGU, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cgu/pt-br/governo-aberto/a-ogp/planos-de-acao/6deg-plano-de-acao-brasileiro/brazil_action-plan_2023-2027_december_pt.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

Givoni, M., & Banister, D. (2015). *Integrated transport: From policy to practice*. London: Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203850886.

Guzman, Luís A. & Oviedo, Daniel & Rivera, Carlos, 2017. *Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region***.** Journal of Transport Geography, Elsevier, vol. 58(C), pages 236-246.

Hull A. *Integrated transport planning in the UK: From concept to reality.* Journal of Transport Geography. 2005 Dec;13(4):318-328. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.12.002

Li, J., Hale, A., 2016. *Output distributions and topic maps of safety related journals.* Saf. Sci. 28, 236–244. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.09.004.

Martins, L. G. V. e M. A. Costa, *Os Desafios para o financiamento do desenvolvimento urbano-metropolitano: em que pé estamos e para onde vamos?* In: COSTA, Marco Aurélio *et al*. (org.). Federalismo, Planejamento e Financiamento: avanços e desafios da governança metropolitana no Brasil. Brasília, DF: Ipea, 2021. p. 377-409. DOI: http://dx.doi.org/10.38116/9786556350257cap14.

Neves, O. M. de C, *Governo Aberto e Governança Pública: um estudo sobre a atuação da sociedade civil na Parceria para Governo Aberto no Brasil (2011–2021).* 2024. 176 f. Dissertação. ENAP, Brasília, 2024. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/7908/1/Dissertac%CC%A7ao%20Mestrado%20Ota%CC%81vio%20Moreira%20de%20Castro%20Neves.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

Papa, E., & Bertolini, L. (2015). *Accessibility and transit-oriented development in European metropolitan areas.* Journal of Transport Geography, 47, 70–83. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.07.003

Rowley, J., & Hartley, R. (2017). *Organizing Knowledge: An Introduction to Managing Access to Information* (5th ed.). Routledge.

Santos, Georgina, Hannah Behrendt and Alexander Teytelboym. *Part II: Policy instruments for sustainable road transport.* Research in Transportation Economics 28 (2010): 46-91. DOI: https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.03.002

Seetharam Sridhar, K., Gadgil, R., Dhingra, C. (2020). *Governança do Transporte Urbano e Estrutura Institucional. Em: Abrindo Caminho para uma Melhor Governança no Transporte Urbano*. Springer, Singapura. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-9620-5_2.

Silva, G. M. V.; A. C. P. Peron; M. L. F. G. de Meza; D. E. do Nascimento e C. Sacoman (2018). *A governança metropolitana e o desafio da integração na lei nº 13.089/2015.* Revista Brasileira de Gestão Urbana, 10, Abr 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/2175-3369.010.001.AO13.

Thombre A, Agarwal A. *A paradigm shift in urban mobility: Policy insights from travel before and after COVID-19 to seize the opportunity.* Transp Policy (Oxf). v. 110, p. 335-353. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.06.010.

Tiznado-Aitken, I.; G. Vecchio; L.A. Guzman, J. Arellana; M. Humberto; E. Vasconcellos e J. Carlos Muñoz. (2023) *Unequal periurban mobility: Travel patterns, modal choices and urban core dependence in Latin America*. Habitat International, v. 133. 102752. ISSN 0197-3975. DOI: https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102752.

Trejo Nieto, A., & Niño Amézquita, J.L. (Eds.). (2021). *Metropolitan Governance in Latin America* (1st ed.). Routledge. DOI: https://doi.org/10.4324/978100310554.

Valenzuela-Fernandez, L., Merigó, J. M., Lichtenthal, J. D., & Nicolas, C. (2019). *A Bibliometric Analysis of the First 25 Years of the Journal of Business-to-Business Marketing*. Journal of Business-to-Business Marketing, 26(1), 75–94. DOI: https://doi.org/10.1080/1051712X.2019.1565142

Yunus, M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., Ale Ebrahim, N., 2013. *A comparison between two main academic literature collections: Web of science and scopus databases.* Asian Soc. Sci. 9 (5), 18–26. DOI: https://doi.org/10.5539/ass.v9n5p18.

Thadeu André Melo (thadeu.andre@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – COPPE, Programa de Engenharia de Transportes (PET), Av. Horácio Macedo, 2030 - Bloco H - Sala 106 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ, Brasil)
Rômulo Dante Orrico Filho (romulo@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – COPPE, Programa de Engenharia de Transportes (PET), Av. Horácio Macedo, 2030 - Bloco H - Sala 106 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ, Brasil)

ILHAS CICLÁVEIS: ANÁLISE DO ISOLAMENTO E DA BAIXA INTEGRAÇÃO DO SISTEMA BIKE-PE NO CAMPUS DA UFPE

Roberta de Moura Wanderley[1], Marcelly Ferreira Soares[1], Fernanda Catarina Ribeiro da Luz[1], Rodrigo Juan Martins Cardozo[1,2], Maurício Oliveira de Andrade[1]
[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Agência de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco

RESUMO
Sistemas de bicicletas compartilhadas são ferramentas essenciais para a mobilidade urbana sustentável, mas seu sucesso depende da integração com a malha urbana. Este artigo analisa os padrões de uso do sistema Bike-PE no campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) para identificar suas potencialidades e barreiras. A partir da análise de 2.369 viagens e do mapeamento de zonas isócronas com o software QGIS, observou-se que o uso do sistema é predominantemente recreativo e interno ao campus, com 87% dos deslocamentos ocorrendo entre as três estações locais. A ausência de estações em um raio de 10 minutos e a falta de pontos de conexão em terminais de ônibus próximos evidenciam um isolamento funcional. Conclui-se que a baixa integração com a rede cicloviária e com outros modais limita o potencial do Bike-PE como solução de transporte. Recomenda-se a expansão da rede e a instalação de estações em pontos intermodais estratégicos.

1. INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada tem gerado profundas transformações nas dinâmicas sociais e ambientais das cidades, muitas vezes acompanhada por desigualdades e sérios problemas de saúde pública que afetam tanto países desenvolvidos quanto em desenvolvimento (Kuddus, Tynan e Mcbryde, 2020). Um dos principais fatores associados a esses impactos é o crescimento da motorização nos centros urbanos, que contribui para a intensificação de problemas como acidentes de trânsito, poluição do ar, poluição sonora e exposição a campos eletromagnéticos, todos resultantes do aumento expressivo dos fluxos de tráfego (Fornalchyk e Hilevych, 2023).

Nesse cenário, políticas de incentivo à mobilidade urbana sustentável tornaram-se centrais no planejamento urbano contemporâneo, buscando soluções que promovam acessibilidade, eficiência e menor impacto ambiental. Entre essas soluções, destacam-se os sistemas de bicicletas públicas compartilhadas, que visam a distribuição de frotas de bicicletas compartilhadas publicamente por uma cidade ou região para os usuários alugarem para transporte ou recreação, oferecendo benefícios como maior mobilidade urbana (Organização Pan-Americana da Saúde, 2020).

Segundo Benedini, Lavieri e Strambi (2020), a expansão da infraestrutura para bicicletas estimula segmentos sub-representados da população a começar a andar de bicicleta, e os sistemas de bicicletas compartilhadas desempenham um papel fundamental nas viagens multimodais e na introdução do modo bicicleta a novos usuários. Este fato facilita os deslocamentos de curta distância, integra diferentes modais e democratiza o acesso à mobilidade. No Brasil os sistemas públicos de compartilhamento de bicicletas foram desenvolvidos de várias formas desde 2012 em São Paulo, com fatores como uso do solo, proximidade de outros modos de transporte, aspectos ambientais e características da população influenciando o número de viagens por estação (Engels, 2019).

A integração com outros modos, especialmente o transporte público por ônibus, é um fator crítico para o sucesso de sistemas de bicicletas compartilhadas. A intermodalidade potencializa o alcance das redes de transporte, servindo como uma solução para o problema da "primeira e última milha" (Fishman, Washington e Haworth, 2012) — o deslocamento inicial ou final que conecta o usuário ao ponto de transporte público mais próximo. A presença de estações de bicicletas em terminais de ônibus facilita o acesso ao transporte de massa e amplia a área de cobertura do sistema, incentivando um público mais diversos a adotar a bicicleta como parte de seu trajeto diário.

Em Pernambuco o Bike-PE foi implantado em 2013, trata-se de um programa de compartilhamento de bicicletas públicas que opera em cidades de Pernambuco com o objetivo de incentivar o transporte ativo e

oferecer uma alternativa de mobilidade mais acessível. O projeto conta atualmente com 90 estações, das quais 3 se encontram dentro do campus universitário da UFPE. As bicicletas podem ser alugadas por meio de aplicativos e tem um tempo de uso de 15 minutos para viagens avulsas, ou de uma hora por viagem utilizando os planos diário, mensal e anual. Essa campanha funciona por todo o Grande Recife, incluindo estações no Recife, em Olinda e em Jaboatão dos Guararapes.

A proposta é, em tese, especialmente atrativa para o público jovem, como estudantes universitários, que apresentam maior flexibilidade de deslocamento e podem incorporar esse modal às suas rotinas. No entanto, a subutilização do Bike-PE por estudantes, sobretudo fora dos limites da universidade, levanta questionamentos sobre os fatores que restringem sua eficiência e abrangência. Questões como a ausência de infraestrutura cicloviária adequada, a localização pouco estratégica das estações, a insegurança no trânsito e a falta de integração com outros modais de transporte público podem contribuir para esse cenário. Entender essas dinâmicas é essencial para o aprimoramento das políticas públicas de mobilidade ativa e para a efetivação do direito à cidade.

Diante disso, este artigo tem como objetivo analisar os padrões de viagens realizadas por usuários do programa Bike-PE que utilizam as bicicletas para chegar à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), sair dela ou se deslocar em seu interior. A partir da análise desses trajetos, busca-se compreender o perfil dos usuários, os principais fluxos de deslocamento e os fatores que influenciam a adoção do sistema. O estudo visa identificar as motivações e barreiras que afetam o uso do Bike-PE no contexto universitário, contribuindo com subsídios para o aprimoramento das políticas de mobilidade ativa voltadas à comunidade acadêmica.

2. METODOLOGIA

A metodologia fica estruturada em duas etapas complementares. A primeira etapa consistiu na caracterização dos padrões de deslocamento dos usuários do Bike-PE no entorno da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A segunda etapa buscou explicar os padrões observados por meio de uma análise espacial. A pesquisa baseou-se na análise de um conjunto de 2.369 viagens registradas no sistema Bike-PE, considerando tanto os deslocamentos realizados entre as estações localizadas dentro do campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) quanto viagens mais extensas, envolvendo usuários que chegaram ao campus ou partiram dele utilizando as bicicletas do programa.

As viagens foram classificadas em três categorias principais. A categoria recreativa agrupou viagens de longa duração, normalmente aos fins de semana, sugerindo um uso para lazer. As viagens utilitárias foram identificadas como deslocamentos de rotina, a exemplo do trajeto casa-universidade, com padrões de origem ou destino em áreas residenciais e horários de pico no início da manhã e final da tarde. Por fim, as viagens de serviço caracterizaram deslocamentos associados a atividades de entrega (iFood), com múltiplos trajetos curtos e paradas frequentes conectando estabelecimentos comerciais a pontos de grande circulação. Adicionalmente, foram analisados dados complementares sobre o gênero dos usuários, informação esta obtida diretamente do banco de dados fornecido pelo operador do sistema, que é preenchida no momento do cadastro do usuário na plataforma.

Para a análise espacial e a delimitação das zonas isócronas, foi utilizado o software QGIS (Moyroud e Portet, 2018), com o auxílio do plugin OpenRouteService (ORS). O ORS calcula os tempos de deslocamento com base na malha viária do OpenStreetMap (OSM), considerando a tipologia das vias e a velocidade média para ciclistas. No que tange ao relevo, a região estudada, inserida na planície da cidade do Recife, é caracterizada por uma topografia predominantemente plana. Embora o algoritmo do ORS considere a inclinação das vias, essa variável apresentou impacto negligenciável na área de estudo. Portanto, o tempo estimado foi modelado com alta precisão com base na distância e nas características da rede viária em terreno plano, permitindo uma avaliação acurada da cobertura territorial e da conectividade do sistema.

3. RESULTADOS

A análise dos dados de viagens revelou que a estação mais utilizada do programa Bike-PE, no *campus* da UFPE, é a localizada nas proximidades do Restaurante Universitário. Essa estação apresenta maior volume de movimentação por atender a uma área de circulação intensa, frequentada por estudantes e funcionários de diversos centros acadêmicos. As demais estações com uso relevante situam-se próximas à Casa do Estudante e ao Centro de Ciências Sociais Aplicadas (CCSA).

No que diz respeito à distribuição ao longo da semana, observou-se um aumento progressivo no uso das bicicletas entre segunda e sexta-feira, sendo a segunda-feira o dia com menor número de viagens e a sexta-feira aquele com maior volume de retiradas. Em relação aos horários, o turno da tarde (entre 12h e 18h) concentrou aproximadamente 50% das viagens realizadas. Quanto ao perfil dos usuários, os dados indicam predominância do gênero masculino, responsável por 63% das viagens. Além disso, a maior parte dos deslocamentos (73,6%) foi classificada pelo sistema como de caráter recreativo, tendo em vista a curta duração das viagens e o fato de muitas bicicletas serem devolvidas na mesma estação ou em outras localizadas dentro da própria universidade.

A análise dos trajetos de origem e destino revela um dado ainda mais contundente sobre o padrão de uso: 87% de todas as viagens analisadas ocorreram exclusivamente entre as três estações localizadas dentro da própria UFPE. Esse número evidencia que as estações do campus funcionam como um microssistema isolado, com pouca ou nenhuma integração com o restante da rede do Bike-PE, que é composta por mais de 90 estações espalhadas pela Região Metropolitana do Recife. Tal fato sugere que, para a grande maioria dos usuários, o sistema serve apenas para deslocamentos internos, e não como um modal de transporte conectado à malha cicloviária da cidade.

3.1. Análise das zonas isócronas

As zonas isócronas (Figura 1) representam áreas que podem ser alcançadas a partir de um ponto específico dentro de determinados intervalos de tempo, considerando o uso de um meio de transporte e variáveis como o traçado da malha viária, relevo, e a velocidade média estimada. No contexto do presente estudo, foram mapeadas as zonas isócronas para deslocamentos de 5, 10 e 15 minutos a partir das estações do programa Bike-PE localizadas na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

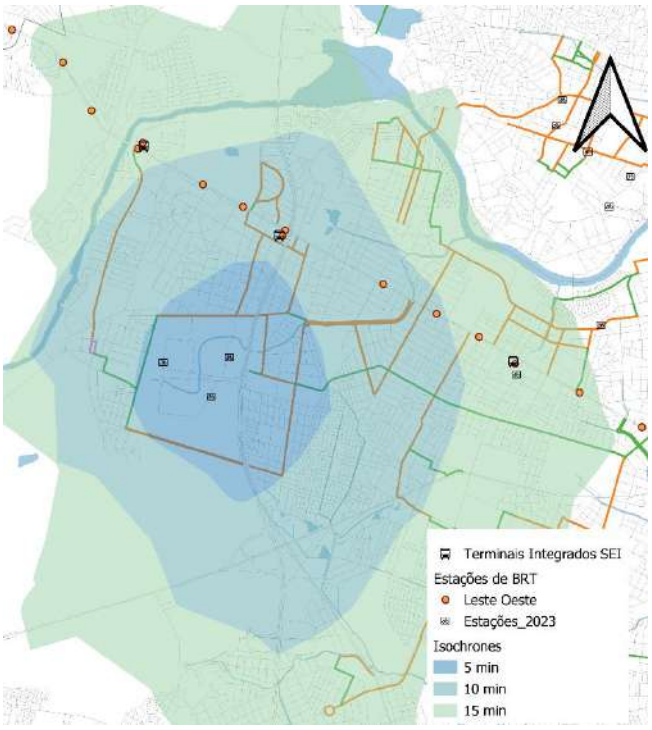


Figura 1: Zonas isócronas das estações da UFPE

A análise do mapa indica que, em um raio de até 10 minutos de pedalada, não há estações do sistema Bike-PE acessíveis para a devolução das bicicletas. A única alternativa dentro desse intervalo de tempo é retornar a uma das estações do próprio campus. Apenas na faixa de 15 minutos aparece uma estação disponível, localizada fora dos limites da universidade, evidenciando a limitação na distribuição espacial das estações e o isolamento funcional das unidades instaladas na UFPE. Esse cenário reforça a necessidade de expansão da rede de estações para possibilitar o uso mais eficiente e contínuo do sistema por parte dos estudantes e demais usuários da comunidade acadêmica.

Outro ponto crítico revelado pela análise é a ausência de estações do Bike-PE nos principais terminais de ônibus que atendem à comunidade da UFPE, como o Terminal Integrado da CDU e o Terminal Integrado da Caxangá. Embora ambos os terminais estejam dentro da isócrona de 10 e 15 minutos de pedalada a partir do campus, não há pontos de retirada ou devolução de bicicletas em suas imediações. Essa lacuna na infraestrutura impede que o sistema seja utilizado de forma eficaz para a intermodalidade, forçando os usuários a dependerem exclusivamente de linhas de ônibus que entram no campus, em vez de terem a opção de completar o trajeto de bicicleta.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam importantes limitações na efetividade do uso do programa Bike-PE no contexto da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Embora o sistema apresente potencial para contribuir com a mobilidade sustentável entre estudantes e servidores, sua utilização ainda é restrita, com a maioria das viagens classificadas como recreativas e concentradas em deslocamentos internos ao campus.

A análise espacial das zonas isócronas reforça essa constatação, ao revelar que, em um raio de até 10 minutos de pedalada, não existem estações disponíveis fora do campus, e mesmo na faixa de 15 minutos, há apenas uma estação acessível. Isso indica uma baixa integração territorial do sistema e limita a adoção do modal para trajetos mais amplos, utilitários ou intermodais.

Além disso, o perfil predominante dos usuários — majoritariamente do gênero masculino — sugere barreiras de gênero e segurança que também merecem atenção. Fatores como a ausência de infraestrutura cicloviária segura, a localização pouco estratégica das estações e a falta de conectividade com outros modais de transporte público se mostram determinantes para a baixa adesão do público universitário ao sistema.

Dessa forma, os dados aqui apresentados apontam para a necessidade de revisão e expansão da malha de estações, bem como de investimentos em infraestrutura cicloviária e campanhas de incentivo ao uso da bicicleta. Políticas públicas mais integradas, sensíveis às demandas locais e voltadas à promoção da mobilidade ativa no meio universitário podem ampliar significativamente o impacto positivo do Bike-PE, tornando-o uma ferramenta mais eficaz de inclusão, sustentabilidade e acesso à cidade.

Diante desse cenário, uma das recomendações deste estudo é a instalação estratégica de novas estações do Bike-PE nos terminais de ônibus que se conectam ao campus. Tal medida serviria como um forte incentivo ao uso do sistema, transformando-o de uma ferramenta predominantemente recreativa para uma solução de transporte utilitário e intermodal. Ao posicionar estações em pontos de integração, o programa ampliaria sua rede e sua base de usuários, fortaleceria o sistema de transporte público como um todo e ofereceria uma alternativa sustentável e eficiente para os deslocamentos de primeira e última milha.

Por fim, para que o projeto alcance maior efetividade, é fundamental promover a integração da rede de bicicletas com os bairros do entorno da universidade, ampliando o alcance e a acessibilidade do sistema. Além disso, a implantação de estações em pontos estratégicos, como terminais de ônibus e estações de metrô, é indispensável para favorecer a intermodalidade e fortalecer a articulação com a malha de transporte público existente. Essa integração é essencial para consolidar o Bike-PE como uma alternativa viável e funcional no cotidiano dos usuários, promovendo um sistema de mobilidade mais sustentável, inclusivo e conectado.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE pelo apoio

concedido à pesquisa. Processos n°: IBPG-1883-3.01/24 e IBPG-0558-3.01/23.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benedini, Débora J.; Lavieri, Patrícia S.; Strambi, Orlando. Understanding the use of private and shared bicycles in large emerging cities: The case of Sao Paulo, Brazil. Case Studies on Transport Policy, v. 8, n. 2, p. 564-575, 2020.

Bicycle-sharing Systems across the United States of America. Washington, D.C.: Pan American Health Organization; 2020. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. https://doi.org/10.37774/9789275122143.

Engels, J. M. Forecasting spatial and temporal variations in OD-pairs: a case study from Sao Paulo. 2019. Dissertação de Mestrado. University of Twente.

Fornalchyk, Yevhen; Hilevych, Volodymyr. Characteristics of motorization's impact on the urban population. Transport technologies, p. e68-e68, 2023.

Fishman, E.; Washington, S.; Haworth, N. Barriers and facilitators to public bicycle scheme use: A qualitative approach. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 15, n. 6, p. 686-698, 2012. DOI: 10.1016/j.trf.2012.08.002.

Kuddus, Md Abdul; Tynan, Elizabeth; Mcbryde, Emma. Urbanization: a problem for the rich and the poor?. Public health reviews, v. 41, n. 1, p. 1, 2020.

Moyroud, Nicolas; Portet, Frédéric. Introduction to QGIS. QGIS and generic tools, v. 1, p. 1-17, 2018.

Roberta de Moura Wanderley (roberta.wanderley@ufpe.br)
Marcelly Ferreira Soares (Marcelly.soares@ufpe.br)
Fernanda Catarina Ribeiro da Luz (fernanda.rluz@ufpe.br)
Rodrigo Juan Martins Cardozo (rodrigo.cardozo@ufpe.br)
Maurício Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas
Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE

IMPACTOS DA TARIFA ZERO NA MOTORIZAÇÃO URBANA: ANÁLISE MULTIVARIADA DE 44 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS

Rodrigo Juan Martins Cardozo, Iury Ribeiro de Melo, Fernanda Catarina Ribeiro da Luz, Anísio Brasileiro
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este estudo avalia os impactos da Tarifa Zero na taxa de motorização urbana através da análise de 44 experiências brasileiras implementadas a partir de 2023. Utilizou-se metodologia de regressão linear segmentada para quantificar mudanças na taxa de crescimento da frota de automóveis e motocicletas antes e após a implementação da política. A análise multivariada combinou Análise de Componentes Principais (PCA) e clusterização K-means para identificar padrões de resposta entre municípios com características similares. Os resultados revelaram dois clusters distintos: municípios de maior porte apresentaram redução média de 4,72% na motorização de automóveis, enquanto municípios menores registraram aumento de 21,31%. Para motocicletas, ambos clusters mantiveram crescimento positivo (5,96% e 9,62%, respectivamente). Os achados indicam que a Tarifa Zero é efetiva na redução da motorização de automóveis em cidades maiores, onde compete economicamente com o transporte individual, mas não influencia significativamente a aquisição de motocicletas, cuja demanda está associada provavelmente à eficiência operacional.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido uma discussão muito mais intensa sobre a necessidade de contestar o desenvolvimento carro-orientando em prol da priorização de pedestres, de ciclistas e do transporte público, de modo a possibilitar comunidades mais densas, verdes e propensas a caminhadas (Marx, 2024). A urbanização acelerada nas últimas décadas trouxe desafios significativos para as cidades, especialmente no que se refere à mobilidade urbana. O elevado número de veículos nas ruas resultou no aumento de externalidades como congestionamentos, poluição e sinistros (Banister, 2009). Nesse contexto, a importância do transporte público e ativo torna-se evidente como uma solução viável para promover uma mobilidade mais eficiente e sustentável. De acordo com Banister (2008), políticas públicas voltadas à mobilidade sustentável devem estimular uma mudança modal, diminuindo o uso de veículos motorizados individuais. A busca por soluções sustentáveis e inclusivas no transporte coletivo tem motivado diversas iniciativas políticas, entre as quais, se destaca a implantação da tarifa zero — instrumento transformador com foco na mobilidade social e ecologicamente sustentável, no desenvolvimento do transporte público e na forte relativização do carro como meio de satisfazer as necessidades de mobilidade (Dellheim, 2023).

A tarifa zero, ao eliminar o custo direto para o usuário, pretende ampliar o acesso ao transporte público em detrimento do transporte individual motorizado, reduzir desigualdades sociais e contribuir para a diminuição dos congestionamentos, da poluição atmosférica e do consumo energético (Sushmitha e Tamilmani, 2025). Para Santini (2019), a adoção da tarifa zero está entre as soluções mais interessantes para cidades, com potencial para melhorar o trânsito, o bem-estar e a qualidade de vida de toda a população. No entanto, os impactos concretos dessa política sobre padrões de mobilidade urbana ainda são objeto de debate e pesquisa, especialmente, no que se refere à sua capacidade de influenciar a taxa de motorização — indicador que expressa a relação entre o número de veículos registrados e a população urbana. A eliminação da tarifa pode ser combinada a medidas que desestimulem o uso de carros e melhorem o transporte público. Em grandes cidades, são necessárias soluções integradas. Mesmo sem passe livre, locais com transporte acessível e eficiente, enfrentam menos problemas de trânsito. A modicidade tarifária segue a mesma lógica da tarifa zero: o transporte é tratado como um direito universal a ser garantido pelo Estado (Santini, 2019). No Brasil, o conjunto de municípios que adotaram essa política caracteriza-se por uma composição heterogênea de centros urbanos de médio e pequeno porte, com concentração geográfica predominante nas regiões Sudeste e Sul (Cardozo *et al*, 2024).

Para Gregori *et al.* (2020), a implementação da Tarifa Zero transcende a mera questão tarifária, configurando-se como um instrumento de reforma urbana que desafia estruturas de poder consolidadas e redefine o papel do Estado na provisão de mobilidade urbana. Conforme observado pelo autor, "a Tarifa Zero é possível, mas alguém pagará pelo serviço", evidenciando que a política não elimina custos, mas redistribui responsabilidades financeiras, exigindo que os principais beneficiários assumam o financiamento do sistema. Diante disso é importante compreender os reflexos da tarifa zero sobre a motorização urbana para avaliar a efetividade da

gratuidade como instrumento de desestímulo ao uso do automóvel particular. Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar se a implementação da tarifa zero impactou a taxa de motorização em cidades brasileiras que adotaram essa política, contribuindo para o debate sobre os efeitos estruturais da gratuidade no transporte público urbano.

A seleção dos 44 municípios analisados seguiu critérios específicos que visaram garantir a comparabilidade das experiências. A decisão de focar em experiências implementadas a partir de 2023 fundamenta-se na necessidade de entender os efeitos comportamentais e econômicos decorrentes do pós-pandemia, conforme declaração da Organização Mundial da Saúde sobre o fim da emergência sanitária global. Este recorte temporal é caracterizado por mudanças estruturais nos padrões de mobilidade urbana, incluindo a redução significativa da demanda por transporte público, alterações nos hábitos de trabalho (home office) e variações na aquisição de veículos particulares. A inclusão das quatro cidades populosas adicionais (Caucaia-CE, Maricá-RJ, Formosa-GO e Paranaguá-PR) justifica-se pela necessidade de representar experiências de maior porte demográfico na análise, uma vez que a maioria dos municípios que implementaram tarifa zero no período pós-pandêmico caracteriza-se por centros urbanos de pequeno e médio porte. Esta decisão metodológica permite capturar possíveis efeitos diferenciados da política em contextos urbanos de maior complexidade e densidade populacional, contribuindo para a robustez da análise multivariada posterior.

2. METODOLOGIA

As análises estatísticas foram realizadas no *software* R Studio, utilizando os pacotes base do R para análise multivariada (prcomp para PCA) e clusterização (*k-means*). As bases de dados utilizadas compreendem informações oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para as variáveis população municipal (Censo Demográfico 2022), área territorial dos municípios (km²), área urbanizada (km²) e Produto Interno Bruto per capita municipal, bem como dados mensais da frota de veículos automotores (automóveis e motocicletas), obtidos junto ao Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). A metodologia desenvolvida utiliza uma abordagem de regressão linear segmentada para avaliar o impacto da implementação da Tarifa Zero na taxa de motorização municipal. O estudo analisa 44 experiências brasileiras, sendo 40 cidades que iniciaram o transporte público gratuito a partir de 2023 (marco estabelecido pela declaração da OMS sobre o fim da pandemia de COVID-19) e 4 cidades populosas adicionais (Caucaia-CE, Maricá-RJ, Formosa-GO e Paranaguá-PR) incluídas por sua representatividade demográfica na Tarifa Zero. Esta seleção temporal tem como objetivo eliminar o fator de confusão pandêmico, garantindo que os efeitos observados possam ser atribuídos especificamente à política de Tarifa Zero, não a mudanças comportamentais relacionadas à COVID-19.

Para cada município, são estimados dois modelos de regressão linear independentes utilizando dados mensais do número total de carros e motocicletas: um modelo para o período de 12 meses antes da implementação da Tarifa Zero (Motorização_PRÉ = α_pré + Intercept), e outro para os 12 meses posteriores (Motorização_PÓS = α_pós + Intercept). O coeficiente angular α (alfa) de cada modelo representa a taxa de crescimento mensal da motorização, indicando a velocidade com que a frota de veículos aumenta ou diminui em cada período. Essa abordagem permite capturar os níveis absolutos de motorização e as tendências temporais antes e depois da intervenção, controlando por padrões pré-existentes de crescimento ou decréscimo da frota municipal. O impacto da Tarifa Zero é quantificado através da razão entre os coeficientes angulares dos dois períodos, expressa como variação percentual: Impacto (%) = [(α_pós / α_pre) - 1] × 100. Um resultado negativo indica que a Tarifa Zero desacelerou o crescimento da motorização, enquanto um resultado positivo sugere aceleração do crescimento. Essa métrica padronizada permite comparações diretas entre municípios de diferentes portes e características, sendo posteriormente integrada com análise de componentes principais (PCA) e clustering K-means para identificar padrões de resposta por grupos de cidades similares.

Para controlar a heterogeneidade entre os 44 municípios analisados e identificar padrões de resposta à Tarifa Zero, foi implementada uma abordagem de análise multivariada combinando Análise de Componentes Principais (PCA) e de clusterização por K-means. A PCA foi empregada como etapa preliminar para reduzir a dimensionalidade do conjunto de variáveis explicativas e eliminar possíveis correlações entre as características municipais, garantindo que a análise de *clusters* subsequente fosse baseada em componentes ortogonais e estatisticamente independentes. Todas as variáveis serão padronizadas através do z-score antes da aplicação da PCA para eliminar efeitos de escala, garantindo que cada variável contribua igualmente para

a análise, independentemente de sua unidade de medida. Para determinar objetivamente o número ótimo de *clusters* e evitar decisões arbitrárias que poderiam comprometer a validade da segmentação, foi empregado o Método do Cotovelo (Elbow Method).

O algoritmo K-means foi selecionado como método de clusterização por suas características adequadas ao contexto da análise. Suas principais vantagens incluem: eficiência computacional para o conjunto de 44 observações, adequação para clusters de formato aproximadamente esférico (apropriado para dados transformados pela PCA), produção de centróides interpretáveis que representam o "município típico" de cada *cluster*, funcionamento adequado quando os *clusters* têm densidades similares (como esperado após transformação PCA), menor sensibilidade a *outliers*, quando aplicado sobre componentes principais padronizados e natureza determinística que garante reprodutibilidade dos resultados. A integração das técnicas PCA e K-means com a análise de impacto permite análises estratificadas em múltiplos níveis: análise global do impacto médio da Tarifa Zero nas 44 experiências, análise específica por *cluster* de municípios similares, e identificação de características que atuam como moderadores da efetividade da política. Esta abordagem metodológica controla a heterogeneidade municipal, identifica tipologias de resposta à Tarifa Zero, permite inferências mais representativas dentro de cada *cluster*, orienta decisões de política pública identificando condições favoráveis para implementação, e reduz ruído estatístico através da segmentação baseada em similaridade.

Como etapa final, será realizada uma avaliação comparativa dos impactos da Tarifa Zero através de gráficos *boxplot* estratificados por *clusters*, permitindo visualizar e comparar as distribuições dos impactos percentuais em automóveis e motocicletas entre os diferentes grupos de municípios identificados pela clusterização. Essa análise gráfica possibilitará identificar diferenças sistemáticas na efetividade da política entre os clusters, revelando se determinados perfis de municípios (caracterizados por porte, densidade urbana e características socioeconômicas similares) apresentam padrões distintos de resposta à implementação da Tarifa Zero. Os *boxplots* fornecerão informações sobre a mediana, quartis, amplitude interquartil e presença de valores extremos (*outliers*) dos impactos percentuais em cada *cluster*, permitindo não apenas comparar a efetividade média da política entre os grupos, mas também avaliar sua variabilidade interna e identificar municípios com comportamentos atípicos. Essa visualização complementará a análise quantitativa anterior, oferecendo uma síntese gráfica clara dos padrões de impacto da Tarifa Zero, que orientará as conclusões sobre as condições municipais mais favoráveis à efetividade dessa política.

A escolha da regressão linear segmentada como método principal de análise fundamenta-se em sua adequação para detectar mudanças estruturais em séries temporais quando há um ponto de intervenção claramente definido, como é o caso da implementação da Tarifa Zero. Esta abordagem permite quantificar de forma direta a alteração na taxa de crescimento da motorização antes e após a política, fornecendo uma métrica padronizada (variação percentual) que facilita comparações entre municípios de diferentes portes e características. O período de análise de 12 meses antes e após a implementação foi definido considerando o equilíbrio entre a necessidade de capturar efeitos de curto a médio prazo da política e a disponibilidade de dados consistentes para todos os municípios da amostra. Embora períodos mais longos pudessem revelar efeitos de longo prazo, a janela temporal escolhida é adequada para identificar mudanças comportamentais iniciais relacionadas à substituição modal, que tendem a ocorrer nos primeiros meses após a implementação de políticas de transporte público gratuito.

3. RESULTADOS

O conjunto das variáveis selecionadas para a PCA compreende seis dimensões que capturam aspectos demográficos, econômicos, territoriais e os próprios resultados da política de Tarifa Zero. A População representa o porte demográfico do município, influenciando diretamente a demanda por transporte público e a escala dos impactos da política. Os Impactos percentuais em Carros e Motocicletas, calculados através da metodologia de regressão linear segmentada, capturam os efeitos específicos da Tarifa Zero na motorização individual e em modos alternativos de transporte, sendo especialmente relevantes para identificar padrões de substituição modal. A Área total (km²) e a Área Urbanizada (km²), indicam respectivamente a extensão territorial do município e a densidade efetiva de ocupação urbana, variáveis importantes para compreender a dispersão urbana e a necessidade de transporte público. Por fim, o PIB per capita (IBGE) representa uma *proxy*

do nível socioeconômico municipal, podendo influenciar tanto a capacidade de aquisição de veículos quanto a demanda por transporte público gratuito.

Os resultados da PCA revelam dois fatores latentes que explicam a variabilidade entre os 44 municípios analisados (Tabela 1). O Primeiro Componente Principal (PC1) é caracterizado por cargas negativas elevadas das variáveis de porte urbano - Área Urbanizada (-0,628), População (-0,611) e Área total (-0,419) - indicando que este componente representa uma dimensão de "Porte Municipal Inverso", onde valores negativos de PC1 correspondem a municípios maiores e mais urbanizados, enquanto valores positivos representam municípios menores e menos urbanizados. O Segundo Componente Principal (PC2) é dominado pelas variáveis de impacto da Tarifa Zero, com Impacto % (Moto) apresentando a maior carga (0,715) e impacto % (Carro) com carga moderada (0,570), caracterizando esse componente, como uma dimensão de "Efetividade da Política", onde valores positivos de PC2 indicam maior redução na taxa de motorização (maior efetividade da Tarifa Zero) e valores negativos sugerem menor impacto ou até mesmo aumento da motorização. Essa estrutura bidimensional permite classificar os municípios simultaneamente por seu porte urbano (PC1) e pela efetividade da política implementada (PC2), fornecendo base para a segmentação posterior através do algoritmo K-means.

Tabela 1: Resultados da PCA

	PC1	PC2
População (Censo 2022)	-0.61124866	0.1367362
Impacto % (Carro)	0.21712102	0.5697549
Impacto % (Moto)	-0.06954344	0.7148528
Área (km2)	-0.41892163	-0.2195277
Área Urbanizada (km2)	-0.62751079	0.1617624
PIB per capta	0.07163885	0.2670367

A aplicação do Método do Cotovelo revelou que a segmentação ótima dos 44 municípios ocorre com 2 *clusters*, conforme evidenciado pela análise da Soma dos Quadrados Intra-cluster (eithin groups sum of squares). O gráfico demonstra uma redução acentuada da WSS entre 1 e 2 *clusters* (de aproximadamente 260 para 190), seguida por uma diminuição mais gradual a partir do segundo, caracterizando o ponto de inflexão típico do "cotovelo" na curva. Esta configuração indica que a divisão em dois grupos maximiza a homogeneidade interna dos *clusters*, enquanto mantém a simplicidade interpretativa da segmentação.

O Gráfico de Dispersão PCA com Clusters K-means (
Figura **1**) evidencia a separação dos 44 municípios em dois grupos distintos no espaço bidimensional dos componentes principais. O Cluster 1 (representado pelos pontos vermelhos) concentra-se predominantemente na região de valores negativos do PC1 (entre -4 e -1), caracterizando municípios de maior porte urbano, maior população e área urbanizada mais extensa, conforme interpretação da PCA. O Cluster 2 (representado pelos pontos laranjas) distribui-se na região de valores positivos do PC1 (entre 0 e +2), agrupando municípios de menor porte, menor densidade populacional e características mais compactas. A dispersão ao longo do PC2 mostra variabilidade na efetividade da Tarifa Zero dentro de cada cluster, com ambos os grupos apresentando municípios com diferentes níveis de impacto na redução da motorização. Esta visualização confirma a adequação da segmentação em dois clusters e fornece base para a análise estratificada posterior dos impactos da política de transporte público gratuito.

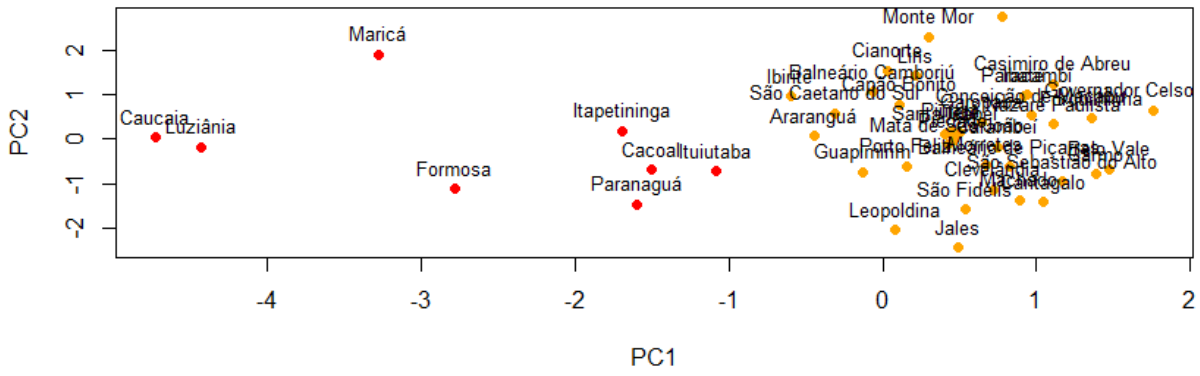


Figura 1: Gráfico de Dispersão PCA com Clusters K-means

A análise dos impactos percentuais da Tarifa Zero na motorização de automóveis revela padrões distintos entre os *clusters* identificados, conforme evidenciado no *boxplot* da Distribuição de Impacto % Carro por *Cluster* (Figura 2). O Cluster 1 (n=8), composto por municípios de maior porte urbano e densidade populacional, apresentou média negativa indicando que a política de Tarifa Zero foi efetiva na redução da taxa de crescimento da motorização nestes municípios. Essa efetividade pode ser atribuída às características urbanas desses municípios maiores, que possuem maior densidade populacional, infraestrutura de transporte público mais consolidada e maior demanda reprimida por mobilidade urbana, criando condições mais favoráveis para que o transporte público gratuito se torne uma alternativa atrativa ao uso do automóvel particular. Em contraste, o Cluster 2 (n=36), formado por municípios menores e menos urbanizados, apresentou média positiva sugerindo que a Tarifa Zero não conseguiu frear o crescimento da motorização, possivelmente devido à menor densidade urbana, infraestrutura de transporte público menos desenvolvida e padrões de mobilidade mais dependentes do transporte individual, limitando a capacidade da política de influenciar significativamente os hábitos de deslocamento da população.

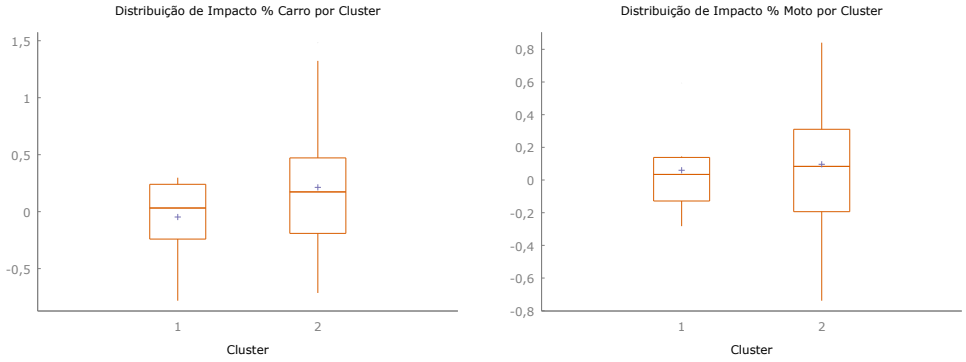


Figura 2: *Boxplot* dos *Clusters* por impacto de Carro e Moto

A análise dos impactos da Tarifa Zero na motorização de motocicletas apresenta um padrão diferente daquele observado para automóveis, no *boxplot* da Distribuição de Impacto % Moto por Cluster (Figura 2). Ambos os clusters apresentaram médias positivas similares, indicando que a política de Tarifa Zero não conseguiu reduzir a taxa de crescimento da motorização de motocicletas em nenhum dos grupos de municípios analisados. Essa uniformidade nos resultados sugere que, independentemente do porte urbano, da densidade populacional ou das características socioeconômicas, a implementação do transporte público gratuito não se mostrou efetiva como substituto das motocicletas, que manteve o crescimento em ambos os perfis municipais.

4. CONCLUSÕES

Os resultados contrastantes entre os impactos da Tarifa Zero na motorização de automóveis e motocicletas revelam diferenças fundamentais nas motivações de aquisição destes veículos e na capacidade da política de influenciar nas decisões. O impacto positivo na redução da motorização de automóveis pode-se atribuir à decisão de compra de carros está relacionada ao custo de mobilidade, tornando o transporte público gratuito, uma alternativa economicamente atrativa, que pode postergar ou substituir a aquisição do veículo particular. Em contraste, a ausência de impacto significativo na motorização de motocicletas, reflete que sua procura está prioritariamente associada à busca por eficiência nos deslocamentos - rapidez, agilidade no trânsito e facilidade de estacionamento - características que o transporte público, mesmo gratuito, não consegue garantir ou superar. Assim, enquanto a gratuidade tarifária pode competir com o automóvel em custo-benefício, ela não oferece vantagens competitivas suficientes frente às motocicletas em eficiência operacional, limitando sua capacidade de influenciar este segmento específico.

Como dito por Gregori *et al.* (2020) a Tarifa Zero pôs as questões do transporte urbano além dos seus costumeiros limites, ampliando o debate, envolvendo questões de mobilidade, acesso à cidade, reforma tributária e disputas com poderes além do Estado. Neste contexto de ampliação do debate promovido pela Tarifa Zero, o impacto negativo observado na taxa de motorização de automóveis, particularmente no grupo de municípios de maior porte, representa uma "luz no fim do túnel" para as políticas públicas de mobilidade

urbana sustentável. Este resultado promissor indica que, sob determinadas condições, o transporte público gratuito pode competir com o transporte individual, contribuindo para a redução do crescimento da frota de veículos particulares. Contudo, o conjunto específico de cidades que apresentaram essa redução na motorização demanda investigação aprofundada, visando compreender se outros fatores contextuais - como qualidade da infraestrutura de transporte público, densidade urbana, renda per capita, políticas complementares de mobilidade ou características geográficas específicas - podem ter influenciado estes resultados positivos. Tal compreensão é fundamental para orientar a replicação bem-sucedida da política de Tarifa Zero em diversos contextos urbanos, maximizando seu potencial transformador na construção de cidades mais sustentáveis e equitativas.

É fundamental reconhecer as limitações inerentes ao desenho metodológico deste estudo, que, embora ofereça uma análise exploratória relevante, impõe cautela na interpretação causal dos resultados. A principal limitação reside na utilização de uma abordagem de regressão linear segmentada sem a inclusão de um grupo de controle. Adicionalmente, o modelo não incorpora variáveis intervenientes importantes, como indicadores econômicos locais (renda, emprego), qualidade da infraestrutura de transporte público pré-existente, ou políticas complementares de mobilidade urbana. A ausência desses controles pode levar a um viés de variável omitida, onde os efeitos estimados podem, na verdade, refletir a influência de outros fatores não considerados na análise.

Diante dessas limitações, os resultados aqui apresentados devem ser interpretados como indicativos de associações e padrões, e não como evidências causais definitivas. Este estudo, portanto, assume um caráter exploratório e de levantamento de hipóteses, contribuindo para o debate ao identificar tendências que merecem investigação aprofundada. Para superar tais limitações, pesquisas futuras devem se concentrar na aplicação de métodos mais robustos. A realização de testes de significância estatística e a análise de sensibilidade dos resultados a diferentes especificações do modelo também são passos essenciais para a construção de um corpo de evidências mais sólido sobre os impactos da Tarifa Zero na motorização urbana no Brasil.

Agradecimentos
Agradeço a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE pelo apoio concedido a pesquisa. Processo nº: IBPG -1883-3.01/24 e IBPG-0558-3.01/23

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banister, D. (2009). Sustainable transport and public policy. *Transport Engineering and Planning*, 2, 192-214.

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73-80.

Cardozo, R. J. M., Melo, I. R., Luz, F. C. R., Brasileiro, A., Andrade, M. O. (2024). Tarifa zero no Brasil: uma análise exploratória das experiências atuais. In: *Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos, Galoá. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/tarifa-zero-no-brasil-uma-analise-exploratoria-das-experiencias-atuais?lang=pt-br>. Acesso em: 14 Jul. 2025.

Dia, Hussein (2017). Urban mobility: Challenges and opportunities. Editora: *Institution of Engineering and Technology*.

Gregori, Lucio *et al.* (2020). Tarifa zero: a cidade sem catracas. Editora: *Autonomia Literária*. São Paulo

Marx, Paris (2024). Estrada para lugar nenhum: o que o Vale do Silício não entende sobre o futuro dos transportes. Tradução de Humberto do Amaral. São Paulo: *Ubu Editora*.

Santini, D. (2019). Passe livre: as possibilidades da tarifa zero contra a distopia da uberização. Editora: *Autonomia Literária*. São Paulo.

Sushmitha, M., & Tamilmani, D. (2025). Impact of zero ticket bus travel scheme in Coimbatore city. *International Scientific Journal of Engineering and Management*. https://doi.org/10.55041/isjem02669.

Wang Y., Nonzee N.J., Zhang H., Ashing K.T., Song G., Crespi C.M. (2025) Interpretation of coefficients in segmented regression for interrupted time series analyses. *BMC Med Res Methodol*. Apr 16;25(1):98. doi: https://10.1186/s12874-025-02556-87.

Rodrigo Juan Martins Cardozo (rodrigo.cardozo@ufpe.br)
Iury Ribeiro de Melo (iury.ribeiro@ufpe.br)
Fernanda Catarina Ribeiro da Luz (fernanda.rluz@ufpe.br)
Anísio Brasileiro (anisio.brasileiro@ufpe.br)
Maurício Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife PE

MAPEAMENTO DA VINCULAÇÃO ENTRE POLÍTICAS DE MOBILIDADE E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AGENDA 2030

Ana Leticia Ramos Bezerra[1], **Leonardo Herszon Meira**[1], **Isabel Magalhães**[2]
[1] Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), [2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

RESUMO
Este artigo realizou um mapeamento das relações entre as políticas de mobilidade sustentável e os ODSs da Agenda 2030, com base em uma revisão sistemática de literatura. A metodologia combinou a análise interpretativa dos autores com a ferramenta automatizada *SDG Mapper* para identificar as vinculações. Os resultados indicam uma forte associação principalmente com o ODS 11 e suas metas. A análise comparativa mostrou que, enquanto a interpretação humana focou em ligações explícitas, a ferramenta captou conexões indiretas, evidenciando a complementaridade das abordagens. Conclui-se que a mobilidade sustentável é um componente transversal e estratégico para o avanço da Agenda 2030, e a combinação de análises qualitativa e computacional enriquece a compreensão de seu potencial transformador. Recomenda-se a realização de pesquisas futuras em diferentes contextos territoriais, buscando compreender como tais políticas se integram às agendas públicas e aos compromissos globais de desenvolvimento sustentável.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Há pelo menos duas décadas discute-se a necessidade de repensar os paradigmas relacionados ao planejamento urbano e de transporte, reconhecendo que a mobilidade sustentável deveria ser central na construção das cidades (Banister, 2008). As mudanças climáticas se consolidaram como um dos principais desafios globais contemporâneos, exigindo respostas rápidas e eficazes. A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, composta pelos 17 ODSs, oferece um marco para lidar com essas questões e promover transformações sociais, econômicas e ambientais. Embora a mobilidade seja abordada por alguns ODSs e metas, notadamente o 3.6 e 11.2, não há um objetivo específico dedicado exclusivamente ao tema. Apesar disso, a própria ONU (2021) já reconheceu o setor, de forma transversal, como essencial para o alcance dos 17 ODSs. Essa transversalidade reflete sua importância estratégica, ainda que não centralizada formalmente na Agenda 2030 (Russo, 2022). Nessa perspectiva, políticas públicas voltadas à mobilidade sustentável têm ganhado destaque nas agendas urbanas, sendo reconhecidas como ferramentas estratégicas para o alcance de metas globais (Fronza *et al.*, 2023). A formulação dessas políticas envolve múltiplos atores, inovação tecnológica, mudanças comportamentais e aprendizado com experiências internacionais. Neste artigo, propõe-se realizar um mapeamento das relações entre as políticas de mobilidade sustentável e os ODSs da Agenda 2030, com base em uma revisão sistemática de literatura. Para isso, foram examinados artigos que abordam políticas de mobilidade voltadas ao cumprimento de um ou mais ODSs, buscando compreender de que forma essas políticas têm sido vinculadas ao tema da sustentabilidade.

2. METODOLOGIA

Para realizar a análise de vinculação dos ODSs foi feita uma revisão da literatura onde os artigos incluídos foram analisados pelos autores e importados na ferramenta *SDG Mapper*, da "Base de Conhecimento para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável" da Comissão Europeia (2021). Essa ferramenta utiliza técnicas de processamento de linguagem natural e algoritmos de aprendizado de máquina para identificar menções aos ODSs na literatura e vincular publicações aos ODSs relevantes. Para a revisão, utilizou-se 30 combinações compostas pelas palavras-chave: *"transport policy"*, *"transport policies"*, *"mobility policy"*, *"mobility policies"*, *"public policy"*, *"public policies"*, *"urban mobility"*, *"sustainable urban mobility"*, *"2030 Agenda"*, *"Sustainable Development Goals"* e *"SDG"*. As bases de dados utilizadas foram a *Web of Science* e *Scopus*. A revisão sistemática da literatura seguiu o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Para auxiliar o processo de revisão, utilizou-se o *software* StArt Versão 3.0.4 Beta (UFSCAR/LAPES), uma ferramenta específica para o desenvolvimento de revisões sistemáticas. A seleção dos estudos considerou os seguintes critérios de inclusão: i) artigos que abordam políticas públicas de mobilidade diretamente vinculadas ao alcance dos ODSs; e ii) artigos publicados no período entre 2015 (lançamento da Agenda 2030) e julho de 2024. Foram excluídos os artigos seguindo os seguintes critérios: i) ausência de acesso ao texto completo e ii) classificação no estrato WebQualis inferior a A3. A revisão seguiu as etapas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Etapas consideradas na Revisão Sistemática de Literatura

Identificação	Registros identificados a partir das bases de dados: (n = 3.668)	Registros duplicados removidos: (n = 2.715)
Triagem	Registros triados: (n = 653)	Registros excluídos: (n = 564)
	Registros avaliados quanto à elegibilidade: (n = 89)	Registros excluídos: (n = 70)
Inclusão	Artigos incluídos na revisão: (n = 19)	

Fonte: adaptado de PRISMA (2020).

3. RESULTADOS

Tendo como base as análises de elegibilidade foram incluídos 19 artigos nesta revisão. A Figura 1 apresenta a distribuição desses artigos ao longo do tempo, discretizados por ano de publicação.

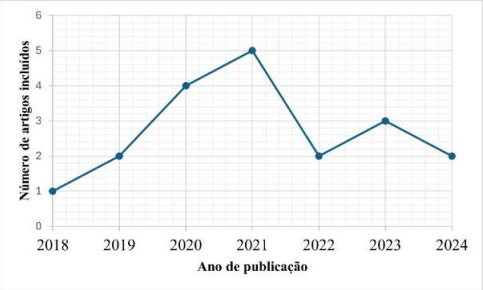


Figura 1: Números de artigos incluídos por ano de publicação
Fonte: Autores (2025).

Para evidenciar como as políticas públicas de mobilidade sustentável mencionadas na literatura apresentam padrões de associação, recorrência temática e vinculação aos ODSs e às metas da Agenda 2030, a Tabela 2 reúne as políticas abordadas nos estudos incluídos, juntamente com os respectivos ODSs e metas vinculadas, conforme análise interpretativa realizada pelos autores desta pesquisa.

Tabela 2: Políticas abordadas nos estudos analisados e ODSs/Metas vinculados

Políticas abordadas/Referência	ODS/metas vinculados
Mobilidade equitativa, regulação, inclusão, digitalização e sustentabilidade – Hackl (2018)	10.2, 10.3, 10.7
Nova Agenda Urbana (NUA) em áreas metropolitanas – Okraszewska *et al*. (2019)	3.6, 8.3, 9.1, 10.3, 11.2, 11.6
Políticas de transporte e uso do solo – Hidayati *et al*. (2019)	9.1, 10.3, 11.2, 11.6
Linha verde, Área calma, Calçada verde e Ciclomobilidade – Locatelli, Bernardinis e Moraes (2020)	11.2, 11.3
Financiamento e desenvolvimento de transporte urbano sustentável; promoção do transporte público – Oleśków-Szłapka *et al*. (2020)	11.2, 13.2
Mobilidade elétrica nos serviços de transporte público – Carteni *et al*. (2020)	7.2, 9.4, 11.2, 13.2
Segurança viária – Malik *et al*. (2020)	3.6, 11.2
Mitigação de emissões no setor de serviços de mobilidade – Roy *et al*. (2021)	1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12,13, 14, 15 e 17
Mobilidade urbana segura e favorável ao clima – Tiboni *et al*. (2021)	11.2, 11.3, 11.6, 13.2
Uso do solo sustentável e mobilidade urbana em cidades de rápido crescimento; dependência do carro – Cavoli (2021)	11.2, 11.3, 11.6, 13.2
Inclusão de pessoas com deficiência; acessibilidade no transporte; design universal – Vanderschuren e Nnene (2021)	8.5, 9.1, 10.2, 10.3, 11.2, 11.3
Transporte eficiente e não poluente – Ruggieri *et al*. (2021)	11.2, 11.6, 13.2
Segurança viária – Klanjčić *et al*. (2022)	3.6, 11.2
Planejamento urbano e governança para veículos autônomos – Grindsted *et al*. (2022)	11.2, 11.3
Infraestrutura urbana para pedestres – Distefano e Leonardi (2023)	11.2, 11.3
Plano de Mobilidade Urbana Sustentável – Michelini *et al*. (2023)	11.2, 11.3
Mobilidade sustentável e redução de emissões de carbono – Montoya-Torres *et al*. (2023)	3.6, 7.2, 11.2, 11.3, 11.6, 13.2
Mobilidade inclusiva e resiliente às mudanças climáticas – Cinderby *et al*. (2024)	11.2, 11.3, 11.6, 13.1, 13.2, 17.14
Política Nacional de Transporte Urbano – Lambat *et al*. (2024)	9.1, 10.3, 11.2, 11.3

Foram identificadas políticas que evidenciam a mobilidade como um vetor transversal capaz de contribuir para diversas metas globais. Os estudos analisados mostram que essa articulação se concretiza por meio de políticas voltadas à inclusão (Vanderschuren & Nnene, 2021; Cinderby *et al.*, 2024), alinhando-se aos ODSs 10 e 11, a

aspectos ambientais e tecnológicos (Carteni *et al.*, 2020; Montoya-Torres *et al.*, 2023), relacionados aos ODSs 7, 9 e 13 e iniciativas que integram transporte e uso do solo, planejamento participativo e governança urbana (Hackl, 2018; Tiboni *et al.*, 2021), por exemplo. A Figura 2 apresenta os ODSs mais relacionados às políticas abordadas e apresenta o mapeamento dos principais ODSs e metas identificadas pelo *SDG Mapper*.

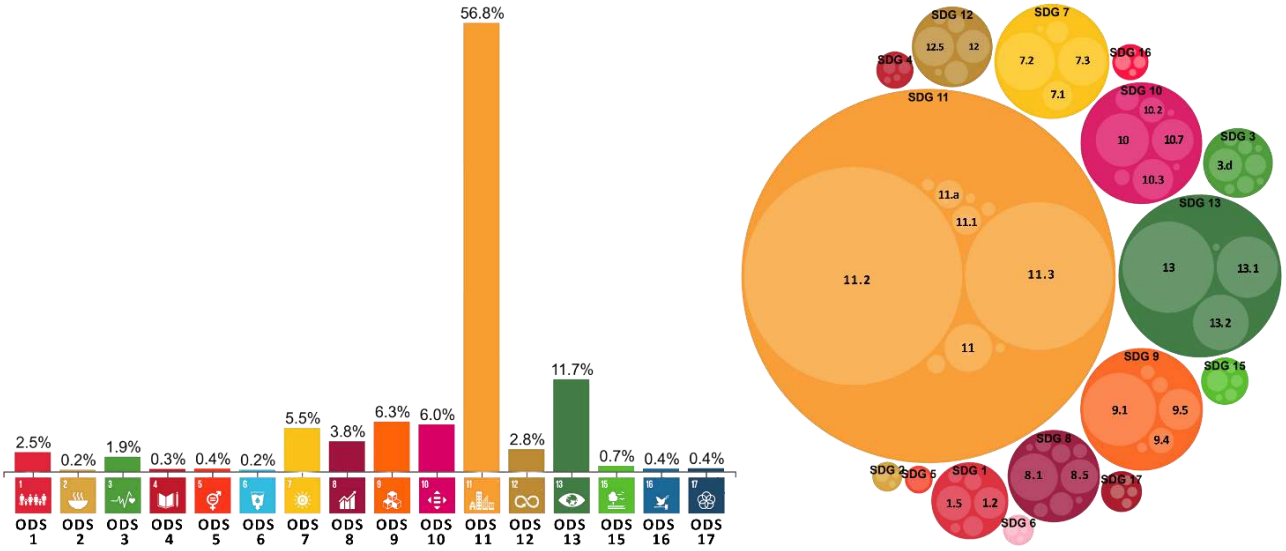


Figura 2: Mapeamento dos principais ODS e metas identificadas na análise dos artigos incluídos
Fonte: Adaptado de *SDG Mapper* (2025)

A análise dos estudos incluídos revela que as políticas públicas de mobilidade sustentável estão fortemente associadas ao ODS 11. Ainda que em menor proporção, os vínculos com os ODS 13, 9, 10, 7 e 8 demonstram a natureza transversal dessas políticas. Cabendo salientar que o ODS 14 não apresentou nenhum percentual de vinculação. O mapeamento realizado pelo *SDG Mapper* indicou que os ODSs 11 e 13 são os mais associados às políticas abordadas. Metas específicas como 11.2, 13.1 e 9.1 se destacam. Além disso, os resultados demonstram conexões com metas dos ODSs 12, 1 e 3 e revelando o caráter transversal da mobilidade em alcançar padrões de consumo e produção responsáveis, erradicação da pobreza e melhoria da saúde da população. A Tabela 3 apresenta o comparativo entre as metas da Agenda 2030 vinculadas às políticas dos estudos incluídos, sistematizando as detectadas pelo *SDG Mapper* e aquelas identificadas pelos autores.

Tabela 3: Comparativo entre as metas (resumidas) geradas pelo *SDG Mapper* e identificadas pelos autores

Metas vinculadas identificadas nesse estudo	**Identificação**	
	***SDG Mapper*?**	**Autores?**
1.2: Reduzir pela metade a proporção de pessoas vivendo na pobreza em todas as suas dimensões.	x	-
1.5: Aumentar a resiliência dos pobres e vulneráveis frente a desastres e choques climáticos.	x	-
3.d: Fortalecer a capacidade de resposta a riscos sanitários e emergências de saúde pública.	x	-
3.6: Reduzir mortes e lesões causadas por acidentes de trânsito.	-	x
7.1: Garantir acesso universal a serviços de energia modernos, confiáveis e acessíveis.	x	-
7.2: Aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética.	x	x
7.3: Dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética até 2030.	x	-
8.1: Sustentar o crescimento econômico per capita, especialmente nos países menos desenvolvidos.	x	-
8.3: Promover políticas voltadas ao desenvolvimento produtivo e inovação tecnológica.	-	x
8.5: Alcançar emprego pleno e trabalho decente para todos, com igualdade de remuneração.	x	x
9.1: Desenvolver infraestrutura sustentável e acessível para apoiar o bem-estar e o crescimento.	x	x
9.4: Modernizar indústrias para torná-las sustentáveis e eficientes no uso de recursos.	x	x
9.5: Incentivar a inovação e aumentar investimentos em pesquisa e desenvolvimento.	x	-
10.2: Promover inclusão social, econômica e política de todos, reduzindo desigualdades.	x	x
10.3: Garantir igualdade de oportunidades e eliminar práticas discriminatórias.	x	x
10.7: Facilitar migração segura e bem gerida por meio de políticas adequadas.	x	x
11.a: Apoiar integração entre áreas urbanas, periurbanas e rurais via planejamento regional.	x	-
11.1: Garantir moradia digna e serviços básicos para todos, urbanizando assentamentos precários.	x	-
11.2: Proporcionar transporte público seguro, acessível e sustentável para todos.	x	x
11.3: Aumentar a urbanização sustentável com planejamento participativo e integrado.	x	x
11.6: Reduzir o impacto ambiental especialmente relacionado à qualidade do ar e gestão de resíduos.	-	x

12.5: Reduzir substancialmente a geração de resíduos por prevenção, reciclagem e reuso.	x	-
13.1: Fortalecer resiliência e capacidade de adaptação a riscos climáticos e desastres.	x	x
13.2: Integrar medidas de mudança climática nas políticas e estratégias nacionais.	x	x
17.14: Melhorar a coerência entre políticas públicas para promoção do desenvolvimento sustentável.	-	x

Essa articulação evidencia que a mobilidade sustentável tem sido concebida como catalisadora de transformações estruturais em contextos urbanos, assumindo um papel estratégico na materialização das metas. A análise das metas vinculadas às políticas revela que há núcleos de convergência entre os resultados gerados pelo *SDG Mapper* e as metas identificadas pelos autores, as metas 7.2, 8.5, 9.1, 9.4, 10.2, 10.3, 10.7, 11.2, 11.3, 13.1 e 13.2 demonstram esse alinhamento. Esses pontos de interseção sugerem que, ao menos em parte, as ferramentas de análise e a leitura analítica humana convergem na captação dos ODSs e metas. Por outro lado, o *SDG Mapper* identificou metas de caráter mais indireto, como 1.2, 1.5, 3.d, 7.3, 9.5 e 12.5. Essa diferença evidencia a importância de combinar abordagens computacionais com análise criteriosa e qualitativa.

4. CONCLUSÕES

A revisão sistemática conduzida permitiu identificar padrões de associação entre políticas públicas de mobilidade sustentável e os ODSs, revelando uma articulação com diversas metas da Agenda 2030. Essa integração demonstra que a mobilidade sustentável não é apenas um tema setorial, mas um componente transversal e estratégico para o avanço da agenda global. A comparação entre os resultados gerados pelo *SDG Mapper* e os obtidos por meio da interpretação dos autores destacou abordagens complementares. Enquanto a ferramenta automatizada demonstrou sensibilidade para captar conexões indiretas, a leitura analítica priorizou vínculos explícitos e temáticos diretamente discutidos pelos estudos. As evidências levantadas revelam um panorama em que estratégias de mobilidade urbana vêm sendo concebidas em consonância com diretrizes globais. A sistematização dos estudos analisados amplia a visão sobre o potencial transformador dessas políticas em diferentes temáticas conectando experiências relatadas na literatura às metas globais. As principais políticas identificadas e associadas às metas recorrentemente vinculadas (11.2 e 11.3) referem-se as seguintes iniciativas: linha verde, área calma, calçada verde e ciclomobilidade; financiamento e desenvolvimento do transporte urbano sustentável; promoção do transporte público; mobilidade segura e favorável ao clima; uso do solo sustentável em cidades de rápido crescimento; planejamento urbano e governança para veículos autônomos; infraestrutura urbana para pedestres; mobilidade inclusiva e resiliente às mudanças climáticas; e o Plano de Mobilidade Urbana Sustentável.

Para futuras pesquisas, sugere-se explorar políticas em realidades nacionais e internacionais, com atenção aos contextos específicos em que essas iniciativas foram implementadas. A investigação de territórios onde as políticas já foram aplicadas pode revelar os desafios de cada região, sejam eles institucionais, sociais, econômicos ou ambientais, contribuindo para uma compreensão dos fatores que influenciam sua efetividade e replicabilidade. Além disso, podem examinar como a vinculação das políticas públicas aos ODS se manifesta nas diversas realidades locais, observando variações temáticas e estratégicas que emergem conforme as especificidades de cada território.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e financiamento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, *15*(2), 73–80. DOI:10.1016/j.tranpol.2007.10.005

Cartenì, A., Henke, I., Molitierno, C., & Di Francesco, L. (2020). Strong Sustainability in Public Transport Policies: An e-Mobility Bus Fleet Application in Sorrento Peninsula (Italy). *Sustainability*, *12*(17), 7033. DOI:10.3390/su12177033

Cavoli, C. (2021). Accelerating sustainable mobility and land-use transitions in rapidly growing cities: Identifying common patterns and enabling factors. *Journal of Transport Geography*, *94*, 103093. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103093

Cinderby, S., Haq, G., Opiyo, R., Muhoza, C., Ngabirano, A., Wasike, Y., Mwamba, D., & Cambridge, H. (2024). Inclusive climate resilient transport challenges in Africa. *Cities*, *146*, 104740. DOI: 10.1016/j.cities.2023.104740

Comissão Europeia. (2021). *SDG Mapper*. Joint Research Centre. Recuperado em 4 de julho de 2025, de https://knowsdgs.jrc.ec.europa.eu/sdgmapper

Distefano, N., & Leonardi, S. (2023). Fostering Urban Walking: Strategies Focused on Pedestrian Satisfaction. *Sustainability*, *15*(24), 16649. DOI:10.3390/su152416649

Fronza, V., Barbero Vignola, G., Borchardt, S., Valentini, S., Buscaglia, D., Maroni, M., & Marelli, L. (2023). *Uncovering SDG Interlinkages: interconnection at the core of the 2030 Agenda*. DOI:10.2760/711960

Grindsted, T. S., Christensen, T. H., Freudendal-Pedersen, M., Friis, F., & Hartmann-Petersen, K. (2022). The urban governance of autonomous vehicles – In love with AVs or critical sustainability risks to future mobility transitions. *Cities*, *120*, 103504. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103504

Hackl, A. (2018). Mobility equity in a globalized world: Reducing inequalities in the sustainable development agenda. *World Development*, *112*, 150–162. DOI: 10.1016/j.worlddev.2018.08.005

Hidayati, I., Yamu, C., & Tan, W. (2019). The Emergence of Mobility Inequality in Greater Jakarta, Indonesia: A Socio-Spatial Analysis of Path Dependencies in Transport–Land Use Policies. *Sustainability*, *11*(18), 5115. DOI:10.3390/su11185115

Johansson, F., Åkerman, J., Henriksson, G., & Envall, P. (2022). A pathway for parking in line with the Paris Agreement. *Case Studies on Transport Policy*, *10*(2), 1223–1233. DOI: 10.1016/j.cstp.2022.04.008

Klanjčić, M., Gauvin, L., Tizzoni, M., & Szell, M. (2022). Identifying urban features for vulnerable road user safety in Europe. *EPJ Data Science*, *11*(1), 27. DOI:10.1140/epjds/s13688-022-00339-5

Lambat, N., Kapse, V., & Sabnani, C. (2022). Public transport (MRTS) and the need of choice mechanism: a case of the Indian public transport. *Current Science*, *122*(8), 888. DOI:10.18520/cs/v122/i8/888-899

Locatelli, I. P. V., Bernardinis, M. D. A. P., & Moraes, M. D. A. (2020). Uma aproximação entre as políticas públicas de mobilidade urbana e os objetivos de desenvolvimento sustentável em Curitiba-PR. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, *9*(1). DOI:10.5585/geas.v9i1.16850

Malik, S., Swapan, M. S. H., & Khan, S. (2020). Sustainable Mobility through Safer Roads: Translating Road Safety Strategy into Local Context in Western Australia. *Sustainability*, *12*(21), 8929. DOI:10.3390/su12218929

Michelini, G., Dametto, D., & Michel, A. (2023). Who is doing what and how? Descriptive analysis of the sustainable mobility planning practice in Germany. *Transport Policy*, *134*, 231–241. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.02.022

Montoya-Torres, J., Akizu-Gardoki, O., Alejandre, C., & Iturrondobeitia, M. (2023). Towards sustainable passenger transport: Carbon emission reduction scenarios for a medium-sized city. *Journal of Cleaner Production*, *418*, 138149. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138149

Okraszewska, R., Jamroz, K., Michalski, L., Żukowska, J., Grzelec, K., & Birr, K. (2019). Analysing Ways to Achieve a New Urban Agenda-Based Sustainable Metropolitan Transport. *Sustainability*, *11*(3), 813. DOI:10.3390/su11030813

Oleśków-Szłapka, J., Pawłyszyn, I., & Przybylska, J. (2020). Sustainable Urban Mobility in Poznan and Oslo-Actual State and Development Perspectives. *Sustainability*, *12*(16), 6510. DOI:10.3390/su12166510

PRISMA. (2020). Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses. *Checklist*. Retrieved May 25, 2023, from http://www.prisma-statement.org

Roy, J., Some, S., Das, N., & Pathak, M. (2021). Demand side climate change mitigation actions and SDGs: literature review with systematic evidence search. *Environmental Research Letters*, *16*(4), 043003. DOI:10.1088/1748-9326/abd81a

Ruggieri, R., Ruggeri, M., Vinci, G., & Poponi, S. (2021). Electric Mobility in a Smart City: European Overview. *Energies*, *14*(2), 315. DOI:10.3390/en14020315

Russo, F. (2022). Sustainable Mobility as a Service: Dynamic Models for Agenda 2030 Policies. *Information*, *13*(8), 355. DOI:10.3390/info13080355

Tiboni, M., Rossetti, S., Vetturi, D., Torrisi, V., Botticini, F., & Schaefer, M. D. (2021). Urban Policies and Planning Approaches for a Safer and Climate Friendlier Mobility in Cities: Strategies, Initiatives and Some Analysis. *Sustainability*, *13*(4), 1778. DOI:10.3390/su13041778

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. (2021) Sustainable Transport, Sustainable Development - Interagency Report | Second Global Sustainable Transport Conference. Nova York: 2021. DOI: 10.18356/9789210010788.

Vanderschuren, M. J. W. A., & Nnene, O. A. (2021). Inclusive planning: African policy inventory and South African mobility case study on the exclusion of persons with disabilities. *Health Research Policy and Systems*, *19*(1), 124. DOI:10.1186/s12961-021-00775-1

Ana Leticia Ramos Bezerra (ana.ramosb@ufpe.br)
Leonardo Herszon Meira (leonardo.meira@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas
Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE.
Isabel Magalhães (isabel.magalhaes@ufrn.br)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário - Lagoa Nova, Natal - RN, Brasil

MARCO CONCEITUAL PARA ATUALIZAÇÃO HIDROVIÁRIA DO SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO: RESOLVENDO UMA LACUNA DE QUARENTA ANOS

Eliezé Bulhões de Carvalho[1], Sergio Coelho dos Santos Junior[2], Adriane Marques Pimenta[2], Bruna Renata Cavalcante de Barros[1]
[1]Secretaria Nacional de Hidrovias e Navegação – Ministério de Portos e Aeroportos, [2]Ecoplan Engenharia

RESUMO
A confiabilidade da infraestrutura hidroviária é indispensável para que os transportadores de cargas optem por esse modo. No Brasil, a relação descritiva de infraestruturas aquaviárias do Sistema Federal de Viação está pendente de atualização desde 1973. Este trabalho visa descrever os procedimentos realizados em 2025 pelo Ministério de Portos e Aeroportos para por fim a essa lacuna normativa. Adotou-se metodologia qualitativa, em uma combinação de pesquisa bibliográfica, exploratória e descritiva de cinco passos, em um modelo de análise conceitual baseado em evidências. A relação descritiva proposta conta com 62.688,26 quilômetros de vias navegáveis, 143 instalações portuárias públicas de pequeno porte e sete eclusas. O conjunto visa atender os objetivos de integração, segurança e desenvolvimento do país, enquanto amplia as possibilidades de delegação, permissão, concessão e arrendamentos das infraestruturas, visando as concessões hidroviárias em fase de planejamento.

1. INTRODUÇÃO

Hidrovias sustentáveis requerem arranjos de governança que resguardem os usos múltiplos das águas e a convivência saudável com cidades, ao passo que promovem a equidade no desenvolvimento econômico (Barros *et al*., 2022). No Brasil, os transportadores apontam o aumento da confiabilidade da infraestrutura hidroviária como aspecto mais eficiente para atrair a carga do que a redução de custos (Larranaga *et al*., 2017). Integrar hidrovias com outros modos requer apoiar a construção e a manutenção de infraestruturas com melhorias na gestão (Calderón-Rivera *et al*., 2024). Para melhorar a sustentabilidade das redes hidroviárias, as autoridades podem ser estimuladas a questionar enquadramentos dominantes e incorporar conceitos e estratégias mais adaptáveis (Willems *et al*., 2018). Sejam os fornecedores de serviços de transporte atores públicos ou privados, o Estado precisa de alavancas eficazes para garantir um nível mínimo de quantidade e qualidade para este setor estratégico (Monios *et al*., 2019).

O processo de planejamento de transporte tem três atividades principais: definição de objetivos, restrições e estratégias; identificação da opção mais eficaz e implementação das opções (Luca, 2014). Neste trabalho adotou-se um modelo moderado de análise conceitual e avaliação crítica para políticas públicas baseadas em evidências para evitar as principais críticas aos modelos racionalista e construtivista. Os modelos racionalistas tendem a desconsiderar complexidades, ao passo que os modelos construtivistas dificultam fazer enunciados gerais – e alguma generalização é necessária para efetuar avaliações (Pinheiro, 2020). Os modelos moderados usam elementos e fontes de informação de forma crítica, sistematizada e rigorosa, no desenvolvimento contínuo de arcabouços metodológicos, conceituais e teóricos (Pinheiro, 2022).

A contribuição da sustentabilidade no planejamento de empreendimentos é sintetizar questões heterogêneas em uma abordagem sistêmica, por meio da realização de avaliações qualitativas abrangentes, em vez de avaliar quantitativamente com poucos critérios (Joumard & Nicolas, 2010). Reconhecer que as políticas, os atores das políticas e o contexto interagem entre si aumenta as chances de desenvolver ferramentas eficazes e apropriadas para aqueles a quem devem ajudar, reduzindo a distância entre os estudos e a formulação de políticas. (Marsden & Reardon, 2017). O acesso às hinterlândias dos portos marítimos pela via fluvial é uma alternativa aos gargalos terrestres, permitindo tempos de viagem menores (Krcum *et al*., 2015). Outra vantagem é reduzir o consumo de energia (Kishchenko *et al*., 2019). Em lugares onde hidrovias são a única ou principal forma de acesso a necessidades básicas, os investimentos devem considerar segurança, equidade e melhoria do padrão de vida da comunidade (Fathoni *et al*., 2017). Grandes hidrovias podem atuar como atalhos para a prosperidade socioeconômica, desde que estratégias específicas protejam o meio ambiente local (Wang *et al*., 2020).

No Brasil, o Sistema Nacional de Viação (SNV) tem como objetivos garantir a unidade nacional e a integração regional; garantir a rede de transporte necessária à segurança nacional; promover a integração com os países vizinhos; atender aos grandes fluxos de mercadorias e fornecer acesso ao transporte de cargas e passageiros (Brasil, 2011). O SNV é composto pelo sistema federal (SFV); sistemas estaduais e municipais. A Secretaria

Nacional de Hidrovias e Navegação (SNHN) foi instituída em abril de 2024 no âmbito do Ministério de Portos e Aeroportos (Brasil, 2024). Criar a SNHN é um movimento rumo ao fortalecimento do setor de hidrovias, que aparenta deixar para trás o histórico de instabilidade organizacional, mas requer uma governança voltada para a execução de projetos estruturantes (Bulhões *et al*., 2016). O presente trabalho tem por objetivo descrever os procedimentos realizados em 2025 pelo Departamento de Gestão Hidroviária da SNHN para atualizar a relação descritiva das vias navegáveis existentes e planejadas, das eclusas e das instalações portuárias públicas de pequeno porte (IP4) integrantes do Subsistema Aquaviário Federal, pondo fim a uma lacuna normativa que persistia desde 1973. Para executar a tarefa, este trabalho se organiza em quatro seções (Figura 1).

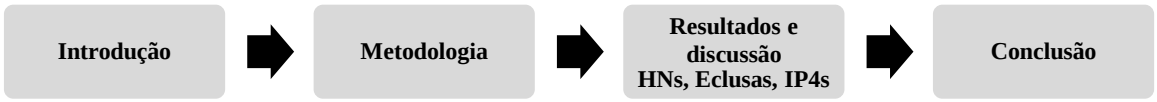


Figura 1: Esquematização deste trabalho. Fonte: elaboração própria.

A introdução trouxe o arcabouço legal e contextualizou a definição da relação descritiva do Sistema Federal de Viação. A seção de Metodologia pormenorizou o processo de elaboração da proposta de relação descritiva. A Seção de resultados e discussão iniciou-se pelas Hidrovias Nacionais, seguidas das eclusas e posteriormente, das Instalações Portuárias Públicas de Pequeno Porte. A conclusão sintetizou a discussão efetuada anteriormente e trouxe sugestões de trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

Para atualizar a relação descritiva das vias navegáveis existentes e planejadas, das eclusas e das IP4s integrantes do Subsistema Aquaviário Federal foi utilizada metodologia qualitativa, em uma combinação de pesquisa bibliográfica, exploratória e descritiva de cinco passos (Figura 3).



Figura 2: Metodologia de atualização da relação descritiva do Subsistema Aquaviário Federal. Fonte: elaboração própria.

Primeiro foi efetuada revisão de literatura, a fim de estabelecer um arcabouço teórico robusto que conferisse os elementos necessários à tomada de decisão. Também foi analisada a legislação pertinente, conforme a seção anterior. Além disso, foi analisado o seguinte conjunto de documentos:

1. Anexos IV e V da Lei nº 5.973, de 10 de setembro de 1973;
2. Anexos IV, V e VI da Lei nº 12.379, de 6 de janeiro de 2011;
3. Relatório final – Grupo de Trabalho Sistema Nacional de Viação;
4. Resolução DNIT nº 8, de 9 de junho de 2020;
5. Vias economicamente navegadas (VEN) 2022.
6. Portaria nº 148, de 17 de dezembro de 2022;
7. Portaria nº 1.169, de 30 de agosto de 2022;
8. Lei nº 14.822, de 22 de janeiro de 2024.

Esses documentos foram inteiramente analisados e comparados entre si, a fim de estabelecer semelhanças e contrastes. O passo seguinte foi a seleção de corpos hídricos, eclusas e IP4s que integram a relação proposta, com base na fase conceitual propiciada pela revisão de literatura e de legislação. Uma vez selecionados os corpos hídricos, procedeu-se à atualização da nomenclatura das hidrovias, nos termos da Metodologia de Gerenciamento das Hidrovias Interiores integrantes do Subsistema Aquaviário Federal (DNIT, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Lei nº 12.379/11 revogou a Lei nº 5.917/73, mas continha a relação atualizada do SNV em seus anexos, que foram vetados. As razões para não aceitar a relação descritiva proposta foram esclarecidas na respectiva Mensagem de Veto, da qual se destaca: “Com efeito, os Anexos deixaram de incluir projetos hoje constantes do PNV e fundamentais para o desenvolvimento do País, alguns, inclusive, integrantes do Programa de Aceleração do Crescimento – PAC”. Como resultado, a relação descritiva do SNV permaneceu, desde 2011, em um vazio legal, requerendo a utilização dos anexos da lei revogada, de 1973. Diante do veto, foi constituído Grupo de Trabalho para analisar, avaliar e propor aprimoramento e regulamentação da Lei nº 12.379/2011. O

GT era composto por membros do Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Agência Nacional de Transportes Terrestres, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Secretaria de Portos e Secretaria de Aviação Civil. Para a elaboração dos anexos, o GT-SNV analisou relações descritivas anteriores, o Plano Nacional de Logística de Transportes, projetos de lei e demais propostas relacionadas ao SNV em tramitação no Congresso Nacional. Além disso, consultou o Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República, em atendimento aos objetivos do SFV ligados à segurança nacional. Como resultado, foi proposta uma relação com 64.303 quilômetros de hidrovias interiores, 358 portos marítimos e interiores e 17 ligações hidroviárias. O relatório final do GT elaborou uma minuta de decreto que não foi publicada. O presente trabalho adequou a relação descritiva elaborada pelo GT à realidade atual e aos empreendimentos constantes da atual versão do Programa de Aceleração do Crescimento – Novo PAC, distribuídas pelas regiões hidrográficas usualmente adotadas. Portanto, em consonância com diretrizes de equilíbrio da matriz logística brasileira e de desenvolvimento sustentável propõe-se prover as hinterlândias dos portos nacionais de acessos fluviais (Tabela 1).

Tabela 1. Síntese das vias navegáveis do Subsistema Aquaviário Federal. Fonte: Elaboração própria.

Região Hidrográfica	Quantidade de corpos hídricos	Quilometragem
Amazônica (HN-100)	53	28.137,00
Tocantins-Araguaia (HN-200)	25	7.302,26
Atlântico Nordeste Ocidental (HN-300)	12	2.693,00
Parnaíba (HN-400)	5	1.652,00
São Francisco (HN-500)	22	5.043,00
Atlântico Sudeste (HN-600)	14	1.480,00
Atlântico Sul (HN-700)	17	1.846,00
Uruguai (HN-800)	8	1.573,00
Paraná-Paraguai (HN-900)	43	12.962,00
TOTAL	199	62.688,26

O então Ministério da Infraestrutura estabeleceu as diretrizes para inclusão ou remoção de IP4 de competência do DNIT. Entre essas diretrizes, se incluem: estar relacionada no Sistema Federal de Viação - SFV; operar exclusivamente com embarcações de navegação interior; estar fora da poligonal de porto organizado e possuir estudo técnico que comprove a necessidade e oportunidade de sua construção (MINFRA, 2021). As IP4s são terminais de passageiros e de carga acompanhada que atendem comunidades ribeirinhas onde o rio é o principal ou único acesso (Barnez, 2019). As IP4s integram o Sistema Nacional de Mobilidade Urbana, conjunto organizado e coordenado dos modos de transporte, dos serviços e de infraestruturas que garante os deslocamentos de pessoas e cargas no território (Brasil, 2012). Desde 2005, o DNIT construiu 54 IP4s em comunidades onde o rio é o principal ou único acesso. Esses empreendimentos figuram nas três edições do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), o maior programa recente de desenvolvimento de infraestrutura. Com efeito, mais da metade dos investimentos hidroviários do DNIT foram destinados às IP4s desde 2014 (CGU, 2023). Essas infraestruturas atendem demandas básicas das populações ribeirinhas, evidenciando um movimento do Governo Federal para acomodar as necessidades de mobilidade e acessibilidade. A relação de IP4s proposta neste trabalho visa se adequar à realidade fática de construção dessas infraestruturas e ao planejamento do Novo PAC (Tabela 2).

Tabela 2. Síntese das IP4s do Subsistema Aquaviário Federal. Fonte: Elaboração Própria.

	IP4s Implantadas	IP4s a serem implantadas	Total
AC	-	1	1
AL	-	4	4
AM	46	22	68
AP	-	2	2
BA	-	1	1
MA	10	3	13
PA	8	31	39
PE	-	9	9
RO	2	-	2
RR	1	2	3
RS	1	-	1
TOTAL	68	75	143

Desde 2015, as eclusas foram incorporadas à esfera de atuação do DNIT. A presença de eclusas em barragens

é critério para identificação de infraestruturas críticas (Santos *et al*., 2011). Infraestruturas críticas são instalações, serviços, bens e sistemas cuja interrupção ou destruição, total ou parcial, provoque sério impacto social, ambiental, econômico, político, internacional ou à segurança do Estado e da sociedade (Brasil, 2018). A Lei das Eclusas prevê que a construção de barragens para geração de energia elétrica em vias navegáveis ou potencialmente navegáveis deve ocorrer de forma concomitante com a construção, total ou parcial, de eclusas ou de outros dispositivos de transposição de níveis (Brasil, 2015). No caso das eclusas, a solução conceitual adotada no presente trabalho foi manter a relação atual de eclusas existentes (Tabela 3). Portanto, futuras atualizações anuais da relação descritiva do SFV contemplarão a inclusão de eventuais novas eclusas.

Tabela 3: Eclusas do Subsistema Aquaviário Federal. Fonte: Elaboração Própria

Eclusa	Rio	UF
Amarópolis	Jacuí	RS
Anel de Dom Marco	Jacuí	RS
Boa Esperança	Parnaíba	PI
Bom Retiro do Sul	Taquari	RS
Fandango	Jacuí	RS
Jupiá	Paraná	SP/MS
Tucuruí	Tocantins	PA
Sobradinho	São Francisco	BA

Acrescenta-se que há dois casos conhecidos de delegação de infraestruturas do SFV a unidades da federação. Atualmente o Departamento Hidroviário de São Paulo tem por finalidade administrar a hidrovia do Tietê (HN-913) no trecho entre a foz, no Rio Paraná, até 896 quilômetros a montante (Brasil, 1985). Já a exploração dos portos organizados de Porto Alegre, Pelotas, Rio Grande e Cachoeira do Sul, bem como das hidrovias, vias e canais navegáveis foram delegados ao governo do Rio Grande do Sul em 1997. Atualmente, Lago Guaíba, Lagoa dos Patos, o trecho do Canal de São Gonçalo entre a Lagoa dos Patos e o Porto de Pelotas estão delegados à empresa pública estadual PortosRS. Os dois casos consolidados de delegação de hidrovias confirmam que manter a relação descritiva do SNV atualizada é importante como instrumento de governança (Bulhões *et al*., 2016). Cabe ao MPOR, por meio da SNHN, definir a carteira de projetos em obras públicas, concessões, autorizações ou arrendamentos a empresas privadas, bem como das delegações a entes subnacionais. Em relação às oportunidades de concessão à iniciativa privada, observam-se os casos do Rio Paraguai e da Lagoa Mirim, em fase preparatória (Sena, 2025). Às regras estarão sujeitos eventuais delegatários, concessionários ou arrendatários, a fim de garantir o bom funcionamento do conjunto estratégico no qual se constitui o SFV.

4. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho para o SFV incorporou conceitos e estratégias adaptáveis por meio de um modelo moderado de análise conceitual baseado em evidências. A relação descritiva conta com 62.688,26 quilômetros de vias navegáveis, 143 IP4s e sete eclusas. A finalidade dos componentes físicos integrantes do SFV é atender os objetivos de integração, segurança e desenvolvimento do país. A noção de conjunto harmônico do SFV não se confunde com centralização, uma vez que permite a delegação, a permissão, a concessão e os arrendamentos. As especificações e normas técnicas que delegatários e concessionários deverão seguir permanecem sob responsabilidade do Governo Federal, que elabora a política de transporte aquaviário. Por outro lado, este tem o dever de manter os normativos em dia, uma vez que estes são indispensáveis para a governança do sistema. sujeitos a especificações e normas técnicas elaboradas pelo Governo Federal. Estudos futuros deverão verificar a influência da atualização do SNV nas carteiras de obras públicas, sobretudo a implantação de IP4s, e na concessão de hidrovias, uma vez que as possibilidades se ampliaram em comparação com a relação de 1973 que ora se propõe atualizar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ (2022). Vias economicamente navegadas (VEN) 2022. Agência Nacional de Transportes Aquaviários.

Barnez, A.S. (2019). Estudo para exploração das instalações portuárias públicas de pequeno porte - IP4 - localizadas na Região Norte. *In*: 11º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior. Brasília/DF. *Proceedings*.

Barros, B.R.C., Bulhões, E.C. & Brasil Jr., A.C.P. (2022). Inland waterway transport and the 2030 Agenda: taxonomy of sustainability issues. *Cleaner Engineering and Technology* 8, 100462.
Brasil (2024). Decreto nº 11.979, de 8 de abril de 2024.
Brasil (2018). Decreto nº 9.573, de 22 de novembro de 2018.
Brasil (2015). Lei nº 13.081, de 2 de janeiro de 2015.
Brasil (2012). Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012
Brasil (2011). Lei nº 12.379, de 6 de janeiro de 2011.
Brasil (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.
Brasil (1985). Decreto nº 91.975, de 17 de outubro de 1985.
Brasil (1973). Lei nº 5.917, de 10 de setembro de 1973.
Bulhões, E.C., Barros, B.R.C.B., Moura, G.A. & Caldeira, L.K.O. (2016). O setor hidroviário brasileiro: histórico e perspectivas para os próximos 15 anos. *In* Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Rio de Janeiro, RJ). Rio de Janeiro: ANPET, p. 2385-2396.
Calderón-Rivera, N., Bartusevičienė, I. & Ballini, F. (2024). Barriers and solutions for sustainable development of inland waterway transport: A literature review. *Transport Economics and Management* 2, 31-44.
DNIT (2020). Resolução nº 8, de 9 de junho de 2020.
Fathoni, M.; Pradono, P.; Syabri, I & Shanty, Y.R. (2017). Analysis to assess potential rivers for cargo transport in Indonesia. *Transportation Research Procedia* 25, 4544–4559.
IPEA (2018). *Avaliação de políticas públicas - Guia prático de análise Ex Ante – Volume 1*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8285, acesso em 24 jul. 2024.
Joumard, R. & Nicolas, J.P. Transport project assessment methodology within the framework of sustainable development. *Ecological Indicators* 10, 2010, pp. 136-142.
Krcum, M.; Plazibat, V. & Mrcelic, G.J. Integration sea and river ports - the challenge of the Croatian transport system for the 21st century. *International Journal of Maritime Science e Technology*, 62 (4), 2015, 247-255.
Luca, S. Public engagement in strategic transportation planning: an analytic hierarchy process based approach. *Transport Policy* 33, 2014, pp. 110-124.
Marsden, G. & Reardon, L. Questions of governance: Rethinking the study of transportation policy. *Transportation Research Part A* 101, 2017, pp. 238-251.
MINFRA (2021). Portaria nº 148, de 17 de dezembro de 2021.
MINFRA (2022). Portaria nº 1.169, de 30 de agosto de 2022.
Monios, J. (2019). Geographies of governance in the freight transport sector: The British case. *Transportation Research Part A* 121, 295-308.
Pinheiro, M.M.S. (2020). Políticas públicas baseadas em evidências: uma avaliação crítica. Boletim de Análise Político-Institucional, Ipea, 24, 17-27.
Pinheiro, M.M.S. (2022). Políticas públicas baseadas em evidências: um modelo moderado de análise conceitual e avaliação crítica. *In* Koga, N.M.; Palotti, P.L.M; Mello, J. & Pinheiro, M.M.S. (org.) *Políticas públicas e usos de evidências no Brasil*: conceitos, métodos, contextos e práticas. IPEA, 59-84.
Santos, D.B.M.; Carvalho, B.E.F.C & Cavalcante, S.P.P. (2011). Segurança de infraestruturas críticas no Brasil. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Disponível: https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=2462&ST=seguranca_de_infraestruturas_criticas_no_brasil, acesso 17/07/2024.
Sena, M. (2025) Mesmo com entraves, projetos de concessões hidroviárias começam a avançar. Agência Infra, 26/02/2025. Disponível em: https://agenciainfra.com/blog/mesmo-com-entraves-projetos-de-concessoes-hidroviarias-comecam-a-avancar/ (acesso em 2/7/2025)
Wang, Y.; Chen, X.; Borthwick, A.G.L.; Li, T.; Liu, H.; Yang, S.; Zheng, C.; Xu, J. & Ni. J. (2020). Sustainability of global Golden Inland Waterways. *Nature Communications* 11, 1553
Zhang, R.; Huang, C. & Feng, X. Empty container repositioning with foldable containers in a river transport network considering the limitations of bridge heights. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 133, 2020, 197-213.

Eliezé Bulhões de Carvalho (eliezec@gmail.com); *Bruna Renata Cavalcante de Barros* (buru.renata@gmail.com)
Ministério de Portos e Aeroportos, Secretaria Nacional de Hidrovias e Navegação, Esplanada dos Ministérios, Bloco R, Anexo, 1º Andar, Brasília, DF, Brasil.
Sergio Coelho dos Santos Junior (eng.scoelho@gmail.com); *Adriane Marques Pimenta* (adrioceano@gmail.com)
Ecoplan Engenharia, Setor de Autarquias Norte Quadra 3 Lote A, 1º Andar, Brasília, DF, Brasil.

METODOLOGIA DE REPASSE DOS RECURSOS DO PNATE: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO ATUAL E O SEU ANTECESSOR

Kariny Lessa Cardoso[1], **Willer Luciano Carvalho**[1], **Ronny Marcelo Aliaga Medrano**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este estudo faz uma análise comparativa entre os dois últimos modelos de cálculo do valor *per capta* de repasse de recursos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE), instituído pela Lei nº 10.880/2004, com o objetivo de garantir o acesso à educação a estudantes da zona rural. O último modelo proposto, buscou variáveis que representassem melhor as desigualdades regionais, no que se refere à operação do transporte escolar, além de trazer aspectos meritocráticos, inexistentes no modelo anterior. Dessa forma, além dos critérios de igualdade, o novo modelo tenta abordar questões de equidade na operação do transporte escolar. Os resultados mostram uma distribuição mais condizente com a complexidade operacional dos municípios brasileiros, representando um avanço significativo na promoção da equidade e justiça social, especialmente em regiões historicamente desfavorecidas como o Norte e o Nordeste, que passam a ter mais municípios enquadrados como os de maiores valores *per capta*.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A universalização do acesso à educação no Brasil é um desafio histórico que exige políticas públicas voltadas à inclusão de estudantes em condições de vulnerabilidade, especialmente os que residem em áreas rurais. Nesse contexto, foi instituído o Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar (PNATE), pela Lei nº 10.880, de 9 de junho de 2004, com o objetivo de oferecer assistência financeira suplementar aos estados, municípios e ao Distrito Federal, garantindo transporte escolar gratuito aos alunos da educação básica pública residentes na zona rural (BRASIL, 2004a).

Desse modo, a criação do PNATE desempenha um papel fundamental no desenvolvimento educacional do país, uma vez que promove a permanência e o acesso à escola para estudantes que encontram-se afastados do centro de ensino, enfrentam dificuldades de mobilidade ou dispõem de infraestruturas precárias. Ademais, para além do transporte físico, o programa também proporciona justiça social, ao reduzir desigualdades históricas entre zonas urbanas e rurais no que diz respeito à oferta educacional (CECATE-CO, 2020a).

A distribuição dos recursos do PNATE ocorre de forma direta, por meio de repasses realizados pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). Essa distribuição é definida através de uma metodologia de cálculo prevista na Resolução nº 18, de 22 de outubro de 2021, que detalha os fatores utilizados para determinar o valor per capita destinado a cada município, considerando dados como número de alunos, área territorial e indicadores educacionais (BRASIL, 2021).

A versão inicial do projeto, correspondente ao modelo antigo, baseava-se em uma lógica de distribuição uniforme de recursos, ou seja, a proposta deste era fazer o repasse de verbas aos órgãos responsáveis de modo igualitário a todos, adotando assim critérios igualitários para todo o território nacional, independentemente das especificidades regionais. Portanto, é possível perceber que o modelo antigo foi elaborado com o intuito de promover igualdade, ao tentar proporcionar o direito fundamental à educação a esses estudantes. No entanto, tal modelo não foi pensado para contemplar a equidade, uma vez que ao adotar uma lógica de distribuição igualitária, acaba por deixar de considerar as necessidades específicas de cada região (CECATE-CO, 2020b).

Com o tempo, observou-se que o modelo antigo apresentava limitações significativas, como a incapacidade de refletir a diversidade operacional do transporte escolar, as desigualdades regionais e os diferentes esforços empreendidos pelos municípios para melhorar a educação. Diante desse cenário, iniciou-se a discussão sobre a necessidade de um novo modelo, visto que, estudos realizados pela Universidade Federal de Goiás reforçaram essa percepção, ao apontar que o modelo anterior não captava de maneira adequada às realidades locais, o que justificou a elaboração de uma nova proposta, mais sensível às necessidades dos municípios e voltada à melhoria dos indicadores educacionais (CECATE-CO, 2020b).

Este artigo justifica-se pela necessidade de compreender quais são os reais impactos da mudança na metodologia de cálculo dos repasses do PNATE, com o intuito de mensurar as razões que motivaram as reformulações no modelo, realizando, assim, uma análise comparativa entre a versão original e a atualmente

utilizada. A partir disso, ao modificar-se a forma de distribuição, torna-se essencial compreender como os municípios foram afetados, especialmente aqueles situados em regiões historicamente desfavorecidas, a fim de visualizar os reais resultados dessa mudança de método. Por conseguinte, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise espacial comparativa entre o modelo antigo de repasse do PNATE e o modelo proposto recentemente, destacando diferenças, melhorias ou possíveis retrocessos em relação à distribuição dos recursos públicos, com ênfase nas consequências territoriais, sociais e educacionais dessa política pública.

2. O PROGRAMA NACIONAL DE APOIO AO TRANSPORTE DO ESCOLAR

O Governo Federal, por meio do Ministério da Educação – MEC e do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – FNDE, vem promovendo ações para o desenvolvimento do transporte escolar no Brasil, como mecanismo de garantia do acesso à educação de grande parte da população brasileira e, principalmente, daqueles que residem em área rural e possuem maiores dificuldades no deslocamento até uma unidade de ensino.

Diante desse quadro, foi criado, dentre outros programas e políticas, o Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – PNATE. Este programa foi instituído em 2004 por meio da Medida Provisória nº 173, de 16 de março de 2004, a qual foi convertida em lei, ainda no mesmo ano, lei nº 10.880 (BRASIL, 2004a).

Desde sua implementação em 2004, o Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar tem passado por diversos aperfeiçoamentos, tanto na formulação utilizada para definição dos valores de repasse, quanto na forma de repasses dos recursos ao Órgãos Executores.

Em seu primeiro ano de implementação, o montante de recursos destinados aos Estados, Distrito Federal e aos Municípios era repassado dividindo-se os recursos específicos consignados na Lei Orçamentária Anual pelo número de alunos do ensino fundamental público que residissem em área rural, utilizassem o transporte escolar oferecido pelos entes governamentais e constassem nos dados do censo escolar realizado pelo INEP referente ao ano anterior (BRASIL, 2004b).

Em 2006, houve a primeira alteração, que ocorreu a partir da inserção do Fator de Necessidade de Recursos do Município – FNR-M, sendo mantido o critério dos anos anteriores. A partir de então, o repasse era feito considerando o valor per capita do PNATE no ano de referência, acrescido do valor calculado a partir do Fator de Necessidade de Recursos do Município - FNR-M (BRASIL, 2006).

O FNR-M considera como variáveis o percentual da população rural do município (informação extraída do IBGE), área do município (extraído do IBGE) e o percentual da população abaixo da linha da pobreza (extraído do IPEADATA). A partir do produto destas variáveis, ordenou-se os municípios em quatro faixas de necessidade: muito baixa, baixa, média e alta.

No entanto, notou-se que municípios vizinhos e de características econômicas semelhantes estavam recebendo repasses de valores diferentes. Isso ocorria, pois municípios fronteiriços pertenciam à UFs diferentes e, desta forma, foram definidos Fatores de Necessidade diferentes. Visando suavizar esta diferença, em 2007, foi inserido o Fator de Correção de Desigualdades Regionais – FCDR (BRASIL, 2007). O FCDR consistia na aplicação de uma média móvel entre os municípios que possuíam, entre si, fronteira (SILVA, 2009).

Em 2008, houve uma nova alteração na metodologia de repasse dos recursos do PNATE com a inclusão do Índice de Desenvolvimento da Educação Básica – Ideb (definido pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira) na formulação do Fator de Necessidade.

Por fim, em 2020, em função de questionamentos à metodologia adotada, foi desenvolvida uma nova metodologia, agora baseada em conceitos de igualdade, equidade e de meritocracia. Não mais existindo uma separação por região, mas considerando as diferentes realidades nacionais.

3. NOVA METODOLOGIA DESENVOLVIDA E ADOTADA PELO FNDE A PARTIR DE 2020

Dentro da nova metodologia existem dois princípios importantes. A igualdade, entendida como um conceito de justiça e definido como “igualitarismo de oportunidades”, dos direitos humanos, garantindo a todos direitos

iguais. A igualdade já está garantida pelo próprio conceito do programa, que busca oferecer transporte escolar a todos os alunos da educação básica pública, residentes em área rural, por meio de assistência financeira, em caráter suplementar, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios (BRASIL, 2004).

Já a equidade passa a ser utilizado com a finalidade de reconhecer as diferenças e dar, assim, um tratamento diferenciado a todos. É importante destacar que as diferenças consideradas pela equidade dentro do novo modelo, estão associadas ao objetivo básico do PNATE, que é realizar a transferência de recursos financeiros para custear despesas relacionadas com a manutenção da operação do transporte escolar rural. Assim, para atender ao princípio da equidade buscou-se variáveis que refletem aspectos relacionados com a operação do transporte escolar rural, e que, logicamente, impactam no custo da operação desse serviço.

Além dos princípios de igualdade e equidade, entende-se que o programa, após 13 anos de existência, já apresenta uma maturidade e já propiciou igualdade de oportunidades a maioria dos municípios brasileiros, podendo agora evoluir e, também, premiar esforços que tenham promovido a melhoria da educação do país. Tal "prêmio" passa a ser uma estratégia no sentido de incentivar a melhoria contínua da educação do país, e é dado a partir da meritocracia. Essa meritocracia foi analisada por meio de variáveis que reflitam indicadores educacionais, uma vez que o PNATE é um programa inserido na política educacional do país.

Assim, o modelo final considerou as seguintes variáveis para o ranqueamento dos municípios em ordem decrescente em termos de valor *per capta* a ser recebido, com suas cargas fatoriais determinadas, pelo método de análise fatorial:

$$INP_{(i)} = Area_{(i)} \times CF_{Area} + Aq_{(i)} \times CF_{Aq} + Rd_{(i)} \times CF_{Rd} + Ev_{dist\,(i)} \times CF_{dist} + Ev_{ab\,(i)} \times CF_{ab} \quad (1)$$

Em que: $INP_{(i)}$= índice não padronizado; $Area_{(i)}$ = área do município; CF_{Area}= carga fatorial da variável Área; $Aq_{(i)}$ = total de alunos transportados no modo aquaviário; CF_{Aq}= carga fatorial da variável total de alunos transportados no modo aquaviário; $Rd_{(i)}$ = total de alunos transportados no modo rodoviário; CF_{Rd}= carga fatorial da variável total de alunos transportados no modo rodoviário; $Ev_{dist\,(i)}$ = evolução da taxa de distorção idade-série; CF_{dist} = carga fatorial da variável evolução da taxa de distorção idade-série; $Ev_{ab\,(i)}$ = evolução da taxa de abandono; CF_{ab} = carga fatorial da variável evolução da taxa de abandono; i = município de análise

4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MODELO ATUAL E O ANTERIOR

Para avaliar o modelo atual proposto, o mesmo foi analisado comparativamente com o modelo anterior no que ser refere ao ranqueamento dos municípios e suas classificações nos diferentes quartis. Para tal, foi realizada uma simulação com dados de 2017 e 2018 para gerar a distribuição de recursos referentes ao ano de 2019, comparando-se então os valores da simulação com os apresentados pelo FNDE, para o referido ano.

4.1. Análise comparativa

Como já foi apresentado, o modelo de distribuição de recursos do PNATE vigente anteriormente no FNDE parte do princípio de que tal distribuição é baseada na classificação dos municípios em quatro faixas de necessidade de recursos, a saber: faixa 1 - muito baixa, faixa 2 - baixa, faixa 3 - média e faixa 4 - alta necessidade. Sendo que tal classificação é realizada a partir do cálculo do FNRM (fator de necessidade de recursos do município) e os municípios são, então, alocados de forma equilibrada, dentro de cada estado, nas 4 faixas, ou seja, 25% dos municípios em cada uma. Assim, logicamente, tem-se a mesma divisão de 25% dos municípios alocados em cada faixa também nacionalmente.

É importante salientar que a nova proposta não trabalha com tal classificação, no entanto, apenas com o intuito de realizar a comparação com o modelo vigente, também foi feita a classificação dos municípios em quatro faixas de necessidade, a partir dos percentis. Para essa classificação foi desenvolvido o ranqueamento dos municípios e, a partir dele, foram utilizados os quartis para a separação nas quatro faixas de necessidade, conforme adotado pelo FNRM. A Tabela 1 apresenta a distribuição dos municípios por quartil (faixa de

necessidade) com a aplicação de cada modelo

Tabela 1: Distribuição percentual dos municípios por faixa de necessidade nos modelos

Modelo Antigo

Região	1	2	3	4	Total
Centro Oeste	24%	24%	25%	27%	100%
Nordeste	25%	25%	25%	25%	100%
Norte	25%	24%	24%	26%	100%
Sudeste	26%	25%	25%	25%	100%
Sul	25%	25%	25%	25%	100%
Total Geral	25%	25%	25%	25%	100%

Modelo Atual Proposto

Região	1	2	3	4	Total
Centro Oeste	21%	29%	32%	19%	100%
Nordeste	14%	14%	27%	46%	100%
Norte	12%	12%	24%	53%	100%
Sudeste	35%	33%	23%	9%	100%
Sul	35%	34%	23%	8%	100%
Total Geral	25%	25%	25%	25%	100%

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Como pode ser observado, os resultados mostram um equilíbrio de aproximadamente 25% dos municípios sendo alocados em cada faixa de necessidade em todas as regiões do país para o modelo anterior. No entanto, avaliando o comportamento do modelo atual proposto tal equilíbrio não é observado.

Nota-se então, que no modelo atual mais de 70% dos municípios das regiões nordeste e norte foram alocados nas faixas de maior necessidade de recursos (faixas 3 e 4), enquanto que mais de 65% dos municípios das regiões sul e sudeste foram alocados nas faixas de menor necessidade de recursos (faixas 1 e 2). Essa diferença apresentada entre os modelos é relevante, e mostra, claramente, que o modelo atual está coerente com séries históricas de pobreza e de deficiências educacionais das regiões norte e nordeste, o que efetivamente justifica alocações de maiores valores per capta para municípios dessas regiões. Assim, o modelo proposto mostra-se não só coerente com os aspectos socioeconômicos e educacionais existentes em estudos já realizados, mas também com os princípios e premissas adotadas na sua elaboração.

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos resultados contidos nas tabelas descritas, e nela é possível verificar a mudança importante que o modelo apresenta, ao considerar as questões relacionadas com as necessidades da operação do transporte escolar, concentrando os maiores valores de per capta, nas regiões norte e nordeste, que efetivamente transportam mais alunos, e alunos do aquaviário, como no Norte, e apresentam municípios com maiores extensões territoriais.

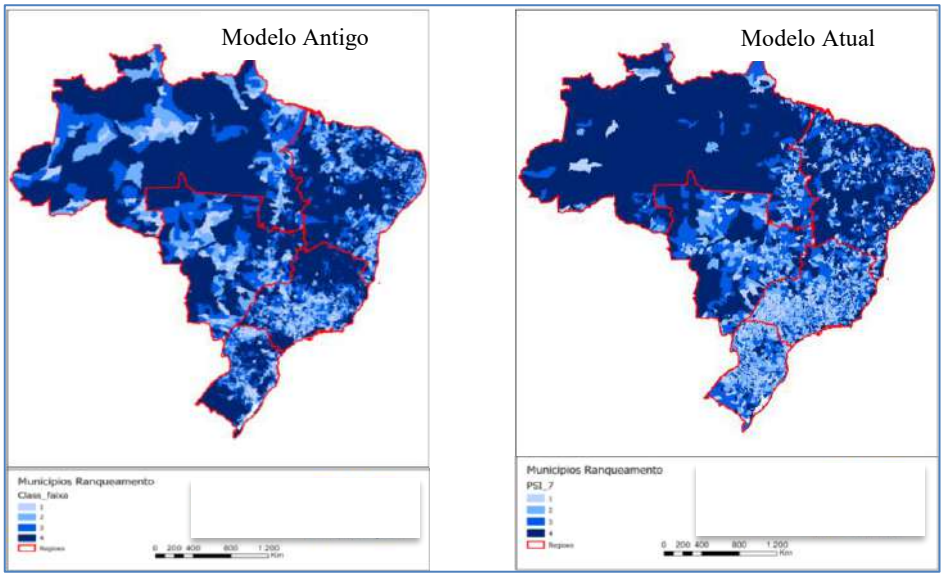


Figura 1: Distribuição espacial dos municípios nas faixas de necessidade por modelo aplicado
Fonte: elaborado pelos autores (2025)

5. CONCLUSÕES

Como pode ser observado o modelo atual apresenta resultados significativamente diferentes do modelo anterior. Tais divergências eram esperadas a partir do momento em que se optou por incluir variáveis que efetivamente tinham maior relação com a complexidade da operação do transporte escolar rural nos

municípios, e ainda se propôs a inserção das variáveis meritocráticas.

É importante salientar que os municípios que passam a ganhar maiores valores *per capta*, são aqueles que historicamente apresentam maiores déficits socioeconômicos e educacionais, que são os municípios das regiões Norte e Nordeste. Assim, percebe-se uma equidade realmente pensada nas necessidades voltadas ao custeio do transporte escolar e nas distintas realidades dos 5570 municípios brasileiros.

A distribuição espacial do ranqueamento pelo novo índice de necessidade apresentou uma distribuição da necessidade mais equitativa comparando as regiões norte, nordeste, sudeste e sul. A distribuição espacial da classificação das faixas de necessidade do FNRM resultou ser menos equitativa e mais focada numa distribuição de iguais proporções dentro de cada região. Considerando as análises realizadas, o novo índice de necessidade desenvolvido permite ranquear os municípios brasileiros atendendo as premissas de equidade e da meritocracia.

Agradecimentos
Agradecemos a todos que de forma direta ou indireta auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho, e ao FNDE pelo seu financiamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL (2004a). Lei nº 10.880, de 9 de junho de 2004. Institui o Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar - PNATE e o Programa de Apoio aos Sistemas de Ensino para Atendimento à Educação de Jovens e Adultos, dispõe sobre o repasse de recursos financeiros do Programa Brasil Alfabetizado, altera o art. 4o da Lei no 9.424, de 24 de dezembro de 1996, e dá outras providências. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2004.

BRASIL (2004b). Resolução/CD/FNDE nº 18, de 22 de abril de 2004. Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros ao Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar. Conselho Deliberativo do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, 2004.

BRASIL (2006). Resolução/CD/FNDE nº 12, de 5 de abril de 2006. Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo – Brasília – DF – 2006.

BRASIL (2007). Resolução/CD/FNDE nº 10, de 24 de abril de 2007. Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo – Brasília – DF – 2007.

CECATE-CO (2020a). Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar Centro-Oeste. Proposta de Nova Formulação para o Repasse dos Recursos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – PNATE. Volume 1: Fundamentação e Diagnóstico. Goiânia: UFG, Faculdade de

CECATE-CO (2020b). Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar Centro-Oeste. Proposta de Nova Formulação para o Repasse dos Recursos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – PNATE. Volume 2: Modelo Proposto. Goiânia: UFG, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Engenharia de Transportes, 2020.Coelho, C. (2021) Título do capítulo ou trabalho. In Abreu Jr., A. e B. Botelho Neto (eds.) Título do livro. Cidade: Editora, p. 108–118.

SILVA, A. R. da (2009). Metodologia para Avaliação e Distribuição de Recursos para o Transporte Escolar Rural. Tese de Doutorado, Publicação T.TD-001A/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 161p.

Kariny Lessa Cardoso (karinylessa@discente.ufg.br), Willer Luciano Carvalho (willer_carvalho@ufg.br), Ronny Marcelo Aliaga Medrano (ronnymarcelo@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes, Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio CEP: 74971-451, Aparecida de Goiânia - GO, Brasil.

MOBILIDADE ATIVA EM PORTO ALEGRE: PADRÕES DE USO DA BICICLETA EM DESLOCAMENTOS PARA INSTITUIÇÕES DE ENSINO E SAÚDE.

Mariana Lovato dos Santos[1,2], **João Paulo Cardoso Joaquim**[1,3]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Empresa Pública de Transporte e Circulação, [3]Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana

RESUMO
Este artigo apresenta uma pesquisa quantitativa que analisou o uso da bicicleta como meio de transporte em Porto Alegre, com foco nos deslocamentos até instituições de ensino e saúde. A partir de um questionário online aplicado a 677 participantes, buscou-se compreender os perfis dos usuários, as barreiras enfrentadas e as motivações para o uso da bicicleta nesses trajetos cotidianos. Os resultados indicam que, embora o uso da bicicleta ainda seja minoritário, há um público consolidado, especialmente no setor da saúde. Os principais obstáculos identificados incluem a falta de infraestrutura cicloviária e a insegurança no trânsito. A pesquisa também revelou uma percepção crítica sobre a rede cicloviária existente e evidenciou que melhorias na infraestrutura e na segurança pública são fundamentais para incentivar a adoção da bicicleta como meio de transporte. O estudo contribui com subsídios para o planejamento urbano voltado à mobilidade ativa e ao cumprimento das diretrizes dos planos municipais de mobilidade e cicloviário.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Viabilizar o deslocamento das pessoas tem sido um dos principais desafios contemporâneos enfrentados pelo planejamento urbano nas cidades brasileiras. Nesse contexto, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída pela Lei nº 12.587/2012, representa um marco normativo ao estabelecer princípios, diretrizes e instrumentos voltados à promoção de uma mobilidade mais equitativa, sustentável e integrada. Entre seus fundamentos centrais, destaca-se a priorização dos modos de transporte não motorizados, em especial a caminhada e o uso da bicicleta, reconhecidos como elementos essenciais para a construção de cidades mais acessíveis, saudáveis e ambientalmente responsáveis (Brasil, 2012).

O transporte não motorizado, também chamado de modo ativo de deslocamento, é caracterizado pelo uso da força humana como propulsão e tem se consolidado como uma alternativa relevante diante dos impactos negativos associados à utilização intensiva dos veículos motorizados, como a poluição atmosférica, o congestionamento viário e a segregação socioespacial. Além dos benefícios ambientais, a mobilidade ativa contribui significativamente para a promoção da saúde pública, a valorização do espaço urbano e a democratização do acesso às oportunidades urbanas, especialmente em trajetos de curta distância (Pucher *et al*., 2024).

Nesse cenário de valorização dos modos ativos, Porto Alegre institui em 2009 o seu Plano Diretor Cicloviário Integrado (PDCI, Lei Complementar n.º 626/2009). O PDCI é um instrumento técnico e normativo que foi concebido para orientar o planejamento e a implementação da infraestrutura cicloviária da cidade. Ele estabelece diretrizes para a criação de ciclovias, ciclofaixas e demais equipamentos de apoio ao ciclista, com o objetivo de garantir a segurança, conectividade e funcionalidade à rede de deslocamentos por bicicleta. Além disso, o PDCI incorpora ações voltadas à educação para o trânsito, à promoção da cultura do ciclismo e à integração modal (Porto Alegre, 2009).

A efetivação dessas e das diretrizes estabelecidas pela PNMU, contudo, exige uma articulação local mais abrangente entre planejamento urbano, políticas públicas e instrumentos de gestão. Com esse intuito, e em consonância com os princípios já delineados no PDCI, Porto Alegre aprovou em 2022 o seu Plano de Mobilidade Urbana (PMU), instituído pela Lei Complementar nº 951/2022. O PMU tem por objetivo orientar ações integradas de transporte e uso do solo, promovendo maior eficiência, segurança e sustentabilidade no sistema de mobilidade urbana. Entre as metas estabelecidas, se destaca a ampliação da infraestrutura destinada aos modos ativos, com ênfase na integração da rede cicloviária à malha urbana existente, consolidando uma estratégia de mobilidade que priorize o transporte sustentável e o direito à cidade (Porto Alegre, 2022).

Diante desse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo analisar os padrões de uso da bicicleta em Porto Alegre, com foco nos deslocamentos realizados com destino a instituições de ensino e de saúde — setores considerados estratégicos tanto pelo volume de viagens geradas quanto pelo potencial de indução de mudanças comportamentais favoráveis à mobilidade ativa. A investigação visa oferecer subsídios empíricos e analíticos

que contribuam para o aprimoramento das políticas públicas locais, em especial no que se refere à efetividade das ações previstas no PMU e no PDCI, reforçando o papel da bicicleta como componente essencial da mobilidade urbana sustentável.

2. METODOLOGIA

Como já mencionado, esta pesquisa teve como principal objetivo compreender os fatores que influenciam o uso da bicicleta como meio de transporte em Porto Alegre com foco em dois contextos específicos: o deslocamento até instituições de ensino e de saúde. A escolha desses dois ambientes se justifica pela sua relevância no cotidiano urbano (grande número de viagens com motivo trabalho e/ou estudo, de acordo com pesquisas de origem e destino realizadas), representando destinos regulares e potencialmente compatíveis com o uso da bicicleta (Porto Alegre, 2003).

A condução foi feita a partir de uma abordagem quantitativa, com objetivo descritivo, adotando como procedimento técnico o levantamento (*survey*) e recorte transversal. O instrumento de coleta de dados consistiu em um questionário estruturado, elaborado previamente pela equipe técnica da Secretaria de Mobilidade Urbana de Porto Alegre e aplicado por meio da plataforma Google Formulários. Todos os respondentes receberam as mesmas perguntas, com alternativas padronizadas, o que possibilitou a análise estatística dos dados coletados. A coleta foi realizada entre os meses de agosto e setembro de 2022, de forma online, o que permitiu alcançar públicos distintos em diferentes instituições da cidade de Porto Alegre, respeitando o anonimato e a voluntariedade da participação (Zangirolami-Raimundo, J. *et al*., 2018; Sampaio, 2022).

A amostra total final foi composta por 677 respondentes, sendo 416 participantes vinculados a instituições de ensino (categoria "educação") e 261 participantes vinculados a instituições de saúde (categoria "saúde"). Trata-se de uma amostragem não probabilística por conveniência, adequada ao objetivo exploratório da pesquisa e à estratégia de distribuição online (Oliveira, 2011; Guimarães, 2008). Ainda que não seja representativa da população de Porto Alegre como um todo, a amostra fornece indícios relevantes sobre comportamentos, barreiras e motivações relacionados ao uso da bicicleta na cidade. Dessa forma, todas as participações foram consideradas válidas.

O questionário foi composto por 16 perguntas e a primeira parte da pesquisa buscou traçar o perfil sociodemográfico das pessoas participantes, com perguntas sobre gênero e faixa etária, permitindo análises comparativas quanto a diferenças de percepção entre grupos populacionais. Em seguida, o questionário explorou aspectos ligados à instituição de destino (educação ou saúde), como a identificação do local frequentado, o papel desempenhado na instituição (estudante, docente, funcionário, técnico-administrativo etc.) e os turnos de início e término das atividades. Essas informações são relevantes para analisar a compatibilidade dos horários com o uso da bicicleta e a necessidade de infraestrutura de apoio (como vestiários e bicicletários).

Outro aspecto levantado foi o meio de transporte usualmente utilizado para os deslocamentos. Os respondentes que declararam não utilizar a bicicleta foram direcionados a um bloco de perguntas onde foi solicitado que indicassem até três principais motivos para isso, entre eles: falta de segurança no trânsito, ausência de infraestrutura cicloviária, relevo desfavorável, fatores climáticos, não possuir bicicleta ou habilidades para pedalar. Com essas informações é possível mapear com maior clareza os fatores que desencorajam a adoção da bicicleta e fornece subsídios diretos para ações públicas. Em complemento, foi incluída uma pergunta sobre ações ou condições que motivariam o uso da bicicleta, como o aumento da segurança pública, a ampliação da rede cicloviária ou a disponibilidade de bicicletários, para identificar oportunidades de incentivo à mudança modal. Os participantes que informaram já utilizar a bicicleta foram convidados a responder sobre a frequência de uso (até três vezes por semana, entre três e cinco vezes, ou diariamente), a modalidade da bicicleta utilizada (própria ou compartilhada) e as motivações principais que os levam a pedalar, como saúde, economia, rapidez, lazer ou preocupação ambiental. Essas variáveis são fundamentais para compreender o perfil do ciclista urbano e seus valores associados.

A parte final do questionário tratou da infraestrutura urbana e da percepção da população em relação à rede cicloviária de Porto Alegre. Foi solicitado que os participantes avaliassem o nível de cobertura da malha cicloviária em seu trajeto cotidiano. Também foi solicitado que indicassem os principais problemas

enfrentados pelos usuários da bicicleta, como rede mal conectada, falta de segurança e ausência de bicicletários. Por fim, o questionário ofereceu um campo aberto para comentários, sugestões ou críticas, permitindo a coleta de dados qualitativos complementares.

Os dados foram exportados da plataforma Google Formulários em formato de planilha eletrônica, o que possibilitou sua organização, tratamento e posterior análise estatística. A maioria das variáveis é categórica, com escalas nominais ou ordinais. Algumas perguntas permitiram múltiplas respostas, sendo essas convertidas em variáveis binárias para viabilizar a análise.

A análise dos dados será apresentada na próxima seção, com foco na identificação de padrões de comportamento, barreiras percebidas e motivações associadas ao uso da bicicleta em Porto Alegre.

3. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos a partir da análise dos questionários aplicados, com foco na identificação de padrões de comportamento, barreiras percebidas e motivações associadas ao uso da bicicleta nos deslocamentos diários. A exposição dos achados está organizada em categorias temáticas que abrangem o perfil sociodemográfico dos respondentes, os modais de transporte utilizados, a frequência de uso da bicicleta, os fatores que dificultam ou desestimulam sua adoção, além da avaliação da infraestrutura cicloviária disponível na cidade. Também são discutidas as sugestões apontadas pelos participantes para a promoção do uso da bicicleta como meio de transporte cotidiano, considerando as especificidades dos dois contextos institucionais analisados: educação e saúde.

Em ambos os setores analisados, observou-se predominância de mulheres entre os respondentes: 66,7% nas instituições de saúde e 70,7% nas instituições de ensino. A distribuição etária variou entre os segmentos, com predominância de faixas etárias mais elevadas no setor educacional: 58% dos respondentes estavam acima de 40 anos, e 30% acima de 50 anos, enquanto na saúde, a faixa entre 30 e 49 anos concentrou aproximadamente 68% das respostas. Em termos ocupacionais, o setor educacional foi composto majoritariamente por docentes (54%), enquanto o setor da saúde apresentou maior presença de técnicos e administrativos (46%).

Em relação aos modos de transporte utilizados, o automóvel particular foi o modal predominante em ambos os setores, citado por 30,7% dos respondentes da saúde e 40,6% da educação, seguido do transporte público, que também teve participação expressiva (30,3% e 26,9%, respectivamente). O uso da bicicleta apresentou diferenças entre os segmentos, com maior proporção no setor da saúde (22,2%) em comparação ao educacional (13,7%). Já a caminhada foi mais recorrente nas instituições de ensino (11,1%) do que nas de saúde (5,7%), o que pode indicar maior proximidade entre moradia e local de trabalho/estudo nesse grupo.

Quanto à frequência de uso da bicicleta, 12,3% dos respondentes da saúde e 7,0% da educação relataram pedalar entre três e cinco dias por semana, enquanto o uso diário foi registrado por 6,1% e 3,6%, respectivamente. Esses dados revelam que, embora ainda minoritário, o uso regular da bicicleta encontra maior aderência entre profissionais da saúde, possivelmente em razão de maior previsibilidade dos horários de trabalho, infraestrutura institucional de apoio e localização dos equipamentos de saúde em áreas com maior conectividade cicloviária.

As principais barreiras ou motivos para a não adoção da bicicleta como meio de transporte foram semelhantes nos dois segmentos e indicam entraves estruturais: a ausência de infraestrutura cicloviária adequada foi apontada como o principal fator limitador, seguida da insegurança viária (relacionada ao compartilhamento de espaço com veículos motorizados) e da insegurança pública. Fatores secundários incluem a inexistência de bicicletários, as condições topográficas desfavoráveis, o clima e a limitação de tempo disponível, elementos que reforçam a multifatorialidade dos obstáculos enfrentados.

Do ponto de vista das soluções sugeridas, a maior parte dos respondentes indicou que o aumento da oferta de infraestrutura cicloviária e o reforço da segurança pública seriam os principais fatores capazes de incentivar o uso da bicicleta. A criação de estações de compartilhamento, bicicletários em pontos estratégicos e a integração com outros modos de transporte também apareceram como medidas relevantes, apontando para a necessidade de um planejamento urbano mais inclusivo e integrado.

No que se refere à avaliação da infraestrutura existente, a percepção dos ciclistas foi predominantemente negativa: menos de 2% consideraram a malha cicloviária satisfatória em termos de extensão e qualidade, enquanto mais de 80% classificaram como pequena ou apenas razoável. A desconexão da rede foi particularmente crítica entre os usuários vinculados às instituições de ensino, sendo mencionada como principal problema por 75% dos respondentes, frente a 43% no grupo da saúde. Essa diferença pode refletir a maior dispersão territorial das instituições educacionais e a menor disponibilidade de rotas seguras e contínuas.

Por fim, a análise dos padrões espaciais revelou uma distribuição relativamente dispersa dos locais de origem e destino, com destaque para o Hospital de Clínicas e a Santa Casa no segmento da saúde, e o Campus Centro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul no segmento educacional. Essa dispersão territorial reforça a necessidade de políticas públicas que considerem a articulação em rede da infraestrutura cicloviária, de modo a garantir conectividade e acessibilidade para diferentes perfis de usuários e trajetos urbanos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo revelam um padrão claro e consistente de dependência predominante dos modos motorizados entre profissionais vinculados às instituições de saúde e de educação em Porto Alegre. Ainda que o uso da bicicleta esteja presente em ambos os contextos, seu alcance permanece limitado por um conjunto de barreiras recorrentes, de natureza estrutural e institucional.

No segmento da saúde, ainda que pequena, observou-se uma proporção ligeiramente maior de ciclistas regulares (22,2%) em comparação às instituições de ensino (13,7%). Essa diferença pode estar relacionada à maior previsibilidade dos turnos de trabalho e à presença de equipamentos de maior porte, com infraestrutura mínima de apoio ao ciclista, como bicicletários e espaços internos protegidos. Em contrapartida, o perfil mais envelhecido e composto majoritariamente por docentes nas instituições de ensino — mais de 50% dos respondentes — pode contribuir para uma menor adesão ao modal ativo, especialmente em uma cidade com desafios topográficos e insegurança no tráfego urbano.

As barreiras identificadas pelos participantes, com destaque para a ausência de ciclovias, insegurança viária e falta de segurança pública, demonstram que a escolha modal é fortemente condicionada por fatores externos ao indivíduo. Trata-se, portanto, de um problema de ordem estrutural e sistêmica, que demanda ação coordenada do poder público e investimentos em infraestrutura física e valorização da mobilidade ativa. A falta de conectividade da malha cicloviária, sua pequena extensão e a escassez de facilidades nos destinos (como bicicletários e vestiários) foram destacadas como entraves significativos à adoção da bicicleta como meio de transporte cotidiano.

Diante disso, a convergência das sugestões oferecidas pelos respondentes reforça o diagnóstico de que há um potencial não aproveitado de ampliação do uso da bicicleta em Porto Alegre. A adoção de medidas como a ampliação da rede cicloviária, a qualificação da infraestrutura de apoio ao ciclista, o fortalecimento da segurança pública e a integração modal entre bicicleta e transporte coletivo surgem como elementos fundamentais para a reversão do atual quadro de baixa adesão.

As contribuições qualitativas, oriundas das respostas abertas, reiteram a necessidade de um planejamento urbano mais sensível às especificidades locais, considerando a topografia acidentada de parte da cidade e a dispersão dos polos geradores de viagem, como hospitais e instituições educacionais. Isso implica em repensar

o desenho da rede cicloviária não apenas como um elemento funcional mas como um componente estratégico para o desenvolvimento urbano sustentável e inclusivo.

Por fim, os achados deste estudo indicam que há uma base social receptiva ao uso da bicicleta mas que essa disposição esbarra em limitações estruturais ainda não superadas. Para que a bicicleta possa se consolidar como alternativa viável, segura e atrativa para os deslocamentos urbanos cotidianos, é imprescindível a implementação de políticas públicas robustas, integradas e orientadas à equidade no acesso à mobilidade. Sem esses esforços, a hegemonia dos modos motorizados tende a se perpetuar, restringindo os avanços em saúde pública, sustentabilidade ambiental e qualidade de vida urbana que a mobilidade ativa pode oferecer.

Agradecimentos
Ao Laboratório de Transportes do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana de Porto Alegre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil (2012) **Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui a Política Nacional de Mobilidade Urbana**. Brasília, DF: s.n.], 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm

Guimarães, P. R. B. (2008) **Métodos Quantitativos Estatísticos.** Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008. Disponível em: https://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/LIVROS/LIVROS/Metodos%20Quantitativos%20%20Estatisticos%20Paulo%20Ricardo%20BittencourtGuimar%E3es.pdf

Sampaio, T. B. (2022) **Metodologia da Pesquisa** [recurso eletrônico] (Gestão em organização pública em saúde) 1. ed. – Santa Maria, RS : UFSM, CTE, UAB, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/26138/MD_Metodologia_da_Pesquisa.pdf?sequence=1

Oliveira, M. F. (2011) **Metodologia Científica: Um Manual para a Realização de Pesquisas em Administração** Catalão: UFG, 2011. 72 p.: il. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/567/o/Manual_de_metodologia_cientifica_-_Prof_Maxwell.pdf.

Porto Alegre, Prefeitura Municipal de. (2003) **Pesquisa de Origem e Destino de Porto Alegre 2003**. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/eptc/usu_doc/relatorio_edom_2003.pdf.

Porto Alegre (2009) **Lei Complementar nº 626, de 13 de outubro de 2009. Institui o Plano Diretor Cicloviário Integrado (PDCI) e dá outras providências**. Disponível em: https://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/eptc/usu_doc/lei_complementar_626_alterada_pela_lc_710_pdci.pdf

Porto Alegre (2022) **Lei Complementar nº 951, de 13 de agosto de 2022. Institui o Plano Municipal de Mobilidade Urbaba de Porto Alegre**. Disponível em: https://www.camarapoa.rs.gov.br/draco/processos/137529/LC_951.pdf

Pucher, J.; Dill, J.; Handy, S. (2024) **The co-benefits of active travel interventions beyond physical activity**. *The Lancet Regional Health – Europe*, 2024. DOI: 10.1016/S2542-5196(24)00201-8

Zangirolami-Raimundo J, Echeimberg JO, Leone C. (2018) **Research Methodology Topics: Cross-sectional Studies**. Journal of Human Growth and Development. 2018; 28(3):356-360. DOI: http://dx.doi.org/10.7322/jhgd.152198

Mariana Lovato dos Santos (marianalovato@ufrgs.br)
João Paulo Cardoso Joaquim (jpc_eng@hotmail.com)
Departamento de Produção e Transportes, Laboratório de Sistemas de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 99 – Porto Alegre, RS, Brasil

MOBILIDADE E MILITÂNCIA: A ATUAÇÃO DE GRUPOS ATIVISTAS EM BELO HORIZONTE E REGIÃO METROPOLITANA

Danielle Saranh Galdino Duarte Garcia[1], **Agmar Bento Teodoro**[2], **Luiza Maciel Costa da Silva**[2], **Renato Guimarães Ribeiro**[2]
[1]Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do CEFET/MG
[2]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET/MG

RESUMO
Este estudo analisa a atuação de sete grupos ativistas na área de transportes em Belo Horizonte e sua Região Metropolitana. As organizações apresentam perfis variados, atuando principalmente na defesa da mobilidade urbana. A maioria funciona de forma voluntária e com estruturas horizontais, enfrentando desafios como falta de financiamento e dificuldades para engajar novos membros. Destacam-se movimentos consolidados, como o Movimento Nossa BH e o BH em Ciclo, que participam ativamente em espaços institucionais, além de coletivos informais focados na mobilidade ativa, como o SOnhANDO A PÉ. O diagrama de Venn evidencia a sobreposição e complementaridade das pautas desses grupos. Eles identificam a precarização do transporte público como problema central, defendendo sistemas mais justos e sustentáveis. Apesar disso, avaliam que a participação popular nas decisões é limitada. O estudo reforça o papel dos movimentos sociais na construção de políticas públicas de mobilidade e a importância de ampliar a participação cidadã.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana constitui um dos principais desafios enfrentados pelas grandes cidades contemporâneas, refletindo questões sociais, econômicas e ambientais que impactam diretamente a qualidade de vida da população (Silva, 2017) Assim, os grupos militantes e ativistas desempenham um papel crucial ao promover debates, mobilizações e ações voltadas para a melhoria do sistema de transporte e para a garantia do direito à cidade. A cidade de Belo Horizonte e sua Região Metropolitana, marcada por complexidades urbanísticas e desigualdades territoriais, apresenta uma diversidade de organizações que atuam na defesa de uma mobilidade mais justa, sustentável e inclusiva.

Este estudo tem como objetivo analisar a participação desses grupos militantes na área de transportes, investigando suas finalidades, estratégias, níveis de engajamento e percepção sobre o papel político-social que desempenham no contexto da mobilidade urbana. Além disso, busca compreender a avaliação dessas organizações quanto à resposta do poder público às suas demandas, contribuindo para a reflexão sobre a efetividade da participação social nas políticas públicas de transporte em Belo Horizonte e sua região metropolitana.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O ativismo é descrito na literatura, como o conjunto de práticas desenvolvidas por grupos ou indivíduos que objetivam promover mudanças sociais, ambientais, culturais ou políticas. Essas ações visam exercer influência sobre comportamentos, mentalidades e até políticas públicas, mostrando-se de muita relevância para o alcance de uma sociedade mais democrática (Sebastião e Vila Verde, 2018).

No Brasil, a atuação de grupos ativistas acompanha a própria história do país, com mobilizações populares organizadas em torno de diversas demandas políticas e sociais. Na sua história, destacam-se movimentos como as Diretas Já (1983), que, embora tenham tido sua proposta rejeitada pelo Congresso, marcaram o processo de redemocratização; o movimento “Fora Collor” (1992), que levou ao impeachment do presidente após denúncias de corrupção; e os protestos de 2013, liderados pelo Movimento Passe Livre, inicialmente contra o aumento das tarifas de transporte, que ganharam amplitude diante da repressão e das críticas aos gastos públicos com a Copa do Mundo em detrimento de serviços essenciais. (Leonelli e Oliveira, 2004; Caruso, 1992; Gohn, 2014).

Diversos estudos têm se debruçado sobre os movimentos sociais que atuam na mobilidade urbana em Belo Horizonte e Região Metropolitana, com destaque para o Movimento Tarifa Zero. Oliveira e Leão (2020) analisam o protagonismo juvenil e o engajamento político de seus participantes a partir de uma abordagem de copesquisa militante. Carneiro et al. (2021) investigam a trajetória do movimento entre 2013 e 2019, seus repertórios de ação e formas de incidência sobre as políticas municipais de transporte, por meio de revisão

bibliográfica, análise documental e entrevistas. Já Oliveira (2022) realiza uma etnografia engajada, enfocando a luta contra a mercantilização do transporte e os desafios enfrentados na promoção da tarifa zero.

3. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas, descritas a seguir.

Na primeira etapa, realizou-se o mapeamento dos grupos ativistas na área de transportes de Belo Horizonte e RMBH, centrado na identificação das organizações de maior relevância no cenário local. Essa relevância foi aferida através da visibilidade em redes sociais, engajamento em pautas ligadas à mobilidade urbana e ao transporte e também do histórico de atuação. Foram mapeadas 19 organizações. Destaca-se que, apesar do empenho inicial para contatar a totalidade dos grupos identificados, a efetiva participação limitou-se àqueles que, de maneira voluntária, se dispuseram a colaborar com a pesquisa. Portanto, a amostra reflete não apenas critérios de relevância, mas também a disponibilidade e o interesse dos grupos em integrar o estudo, o que é um aspecto comum em pesquisas que envolvem atores sociais organizados. Na segunda etapa, estabeleceu-se contatos com as organizações e seus representantes por meio de suas redes sociais. O primeiro contato consistiu no envio de uma mensagem explicativa, descrevendo o objetivo da pesquisa e convidando-os a participar. Neste momento, solicitou-se a indicação dos e-mails e números de contato das respectivas organizações, prontamente disponibilizados pelos grupos que aceitaram participar da pesquisa. Ressalta-se que este estudo não foi submetido a um comitê de ética em pesquisa com seres humanos, uma vez que não envolveu coleta de informações de caráter pessoal, sensível ou que pudesse expor os participantes a riscos diretos. A terceira etapa consistiu na elaboração de um questionário online, desenvolvido com a ferramenta virtual Google Forms. O formulário foi estruturado com 24 perguntas, entre abertas e fechadas e teve como objetivo levantar o perfil das organizações, a dinâmica interna de funcionamento, os desafios e as formas de atuação e organizações da sociedade civil que trabalham com pautas relacionadas à mobilidade urbana em Belo Horizonte e em sua Região Metropolitana. Na quarta etapa, procedeu-se à aplicação do questionário, realizada entre os dias 13 de maio e 16 de junho de 2025. Na quinta e última etapa, analisou-se os dados obtidos por meio do questionário, com a realização de uma análise descritiva das respostas e a utilização do diagrama de Venn para identificar interseções entre os focos de atuação dos grupos. Originalmente criado pelo matemático britânico John Venn em 1880 e desenvolvido para a lógica matemática, o diagrama permite visualizar intersecções, uniões e exclusões entre diferentes categorias (Venn, 1880), sendo uma importante ferramenta gráfica utilizada para representar relações lógicas entre conjuntos. No contexto deste estudo, o diagrama de Venn é utilizado para ilustrar as intersecções temáticas entre as organizações analisadas, permitindo uma compreensão visual das áreas de atuação compartilhadas e específicas de cada coletivo. Sua aplicação, no entanto, extrapola o campo da matemática, sendo amplamente utilizado em ciências sociais para representar sobreposições e distinções entre grupos ou conceitos. Este diagrama permitiu visualizar graficamente as áreas específicas de atuação das organizações quanto aos pontos de convergência, evidenciando os temas em destaque.

4. RESULTADOS

Dentre os 19 grupos para os quais o questionário foi enviado, apenas sete (7) responderam o instrumento. Os dados obtidos das sete organizações participantes subsidiam a análise apresentada neste artigo. Essas organizações apresentam perfis diversificados e o período de fundação dos grupos varia entre 1995 e 2022. A Figura 1, a seguir, mostra a linha do tempo de criação das sete organizações que participaram da pesquisa.

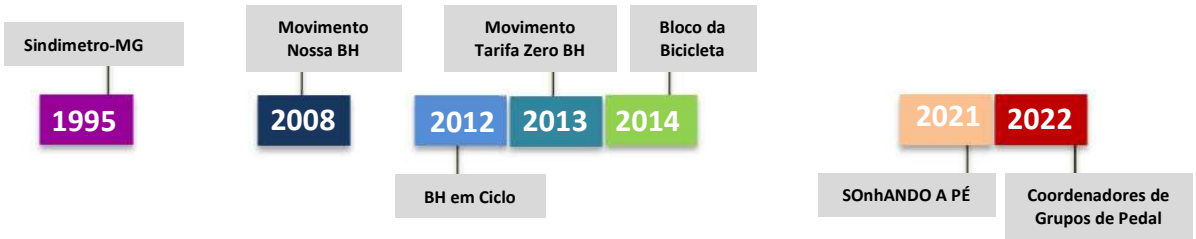


Figura 1: Linha do tempo – Criação das organizações

A maior parte dessas organizações funciona em regime de voluntariado, sem cobrança de mensalidades e com estruturas horizontais de gestão, embora haja também experiências de coordenação rotativa e de remuneração pontual de membros.

4.1 Configuração institucional e padrões de atuação das sete organizações participantes da pesquisa

O Sindicato dos Metroviários de Minas Gerais (Sindimetro-MG), criado em 1995, é uma entidade formal com diretoria eleita composta por 24 membros. Sua atuação é voltada à defesa do transporte coletivo e à promoção da acessibilidade, especialmente no contexto dos trabalhadores metroviários e do sistema ferroviário de passageiros. Sua organização é estruturada de forma tradicional e hierarquizada, e mantém interlocução com instâncias institucionais e políticas. O sindicato não possui financiamento de projetos externos nem histórico de premiações no campo da mobilidade urbana. Sua atuação é caracterizada pela defesa de direitos trabalhistas e do fortalecimento dos modos coletivos de transporte, com foco nas condições de trabalho e na qualidade dos serviços prestados.

O Movimento Nossa BH, criado em 2008, é uma associação sem fins lucrativos que atua na defesa da participação social nas políticas urbanas e na promoção de uma cidade mais justa, inclusiva e sustentável. Atua em temas como transporte coletivo, mobilidade ativa, justiça social e meio ambiente. Adota uma organização baseada em coordenação rotativa, com forte atuação em espaços institucionais, como o COMPUR. Sua incidência política combina campanhas públicas, produção de materiais técnicos e pressão institucional. Conta com financiamento via emendas parlamentares e já recebeu prêmios como Gentileza Urbana e Ecofalante. Os principais desafios são a dificuldade de efetivar os avanços legais conquistados na cidade. Defende o fortalecimento do transporte coletivo, com foco na inclusão, sustentabilidade e justiça social. Participa ativamente de projetos e processos institucionais, com atuação consolidada na cidade.

O BH em Ciclo, Associação dos Ciclistas Urbanos de Belo Horizonte, fundado em 2012, é uma associação sem fins lucrativos que tem como missão promover o uso da bicicleta como meio de transporte, lazer e esporte, atuando em defesa de uma cidade mais justa, democrática e sustentável. Atua em temas como mobilidade ativa, justiça espacial, meio ambiente e direito à cidade, organizando-se por meio de autogestão e participação em fóruns, conferências e conselhos, como o Conselho Municipal de Política Urbana (COMPUR). A organização articula campanhas, produção técnica e incidência institucional, sem contar, até o momento, com financiamento público, embora tenha sido reconhecida com o Prêmio Lúcio Costa. Seus desafios estão centrados na obtenção de financiamento e no engajamento de novas pessoas. Defende um sistema de transporte multimodal, equânime, com prioridade para modos ativos e coletivos, e considera a participação popular imprescindível, tendo histórico de participação em projetos e intervenções de mobilidade na cidade.

O Movimento Tarifa Zero BH, criado em 2013, é um coletivo informal que defende o transporte como direito social, com foco na implementação da tarifa zero na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Atua prioritariamente na pauta do transporte coletivo, associada às discussões sobre planejamento urbano, justiça social e intersecções como gênero e mobilidade. Organiza-se horizontalmente, com atuação no Conselho Municipal de Mobilidade Urbana. Suas estratégias incluem campanhas públicas, elaboração de conteúdos técnicos e articulação junto ao legislativo municipal. Não conta com financiamento público, mas já recebeu reconhecimentos não especificados. Os desafios estão na renovação de membros e na sustentabilidade da mobilização. Defende o transporte coletivo gratuito, público e de qualidade como um bem universal. Considera que a participação popular é praticamente inexistente, sobretudo no nível metropolitano, e atua especialmente na elaboração de propostas legislativas.

O Bloco da Bicicleta, fundado em 2014, é um coletivo informal cuja missão é ocupar o espaço público por meio da cultura ciclística, fortalecendo a bicicleta como instrumento de convivência, transformação social e mobilidade. Atua nos campos da mobilidade ativa, da justiça espacial e da valorização do espaço público. Sua organização interna é horizontal, com participação em fóruns e conferências populares, e sua atuação política é centrada em eventos culturais e oficinas, com menor envolvimento institucional formal. Recebeu financiamento esporádico por meio de editais culturais, como os da Belotur, além de ter sido premiado por iniciativas sustentáveis. A organização avalia que há deficiência de investimentos nos modos ativos e no transporte coletivo. Defende a mobilidade ativa como prioridade e considera a participação social fraca. Até o momento, não participou diretamente de projetos governamentais.

O SOnhANDO A PÉ, coletivo informal criado em 2021, atua na promoção da mobilidade ativa, especialmente do caminhar, e na construção de espaços urbanos mais seguros, acessíveis e inclusivos. Atua também nas pautas de acessibilidade, justiça espacial e planejamento urbano, com organização horizontal e participação

em fóruns populares. Embora não conte com financiamento, foi reconhecido com o Prêmio Parque da Mobilidade Urbana (2024). O principal desafio identificado é a limitação de tempo dos voluntários para sustentar as atividades. Defende a mobilidade ativa, especialmente o caminhar, como central para as políticas públicas.

O grupo dos Coordenadores de Grupos de Pedal se apresenta como um coletivo sem estrutura formal, formado em 2022, e com atuação voltada exclusivamente à promoção da mobilidade ativa, especialmente o uso da bicicleta. Sua organização interna é informal e não há mecanismos estruturados de tomada de decisão coletiva. O grupo possui algum nível de articulação institucional e realiza atividades recorrentes no território. Não conta com fontes de financiamento externas e tampouco relatou ter recebido premiações ou reconhecimentos até o momento. Seu foco é o incentivo direto à prática do ciclismo, com ênfase em ações locais e comunitárias.

4.2 Focos de atuação das sete organizações participantes da pesquisa

O diagrama de Venn ilustra as intersecções entre os principais focos de atuação das organizações analisadas, agrupando-as em três grandes eixos temáticos: (1) Mobilidade Ativa, (2) Tarifa Zero e (3) Direito à Cidade. A distribuição no diagrama evidencia que há organizações com atuação concentrada em um único eixo, como é o caso do Bloco da Bicicleta, do SOnhANDO A PÉ e dos Coordenadores de grupos de pedal, que atuam prioritariamente na promoção da mobilidade ativa, e do coletivo Movimento Tarifa Zero BH, cujo foco principal é a defesa da tarifa zero no transporte coletivo. Por outro lado, o diagrama também demonstra a existência de organizações com atuação interseccional. O Movimento Nossa BH aparece na intersecção entre os três eixos, refletindo sua ampla agenda, que integra a defesa do transporte coletivo, da mobilidade ativa e da participação social. Já a BH em Ciclo se posiciona na sobreposição entre Mobilidade Ativa e Direito à Cidade, indicando que, além da defesa da bicicleta, também pauta questões estruturais relacionadas à justiça espacial, participação e transformação urbana. Dessa forma, o diagrama evidencia tanto as especificidades quanto as convergências temáticas entre os grupos, refletindo a diversidade e, ao mesmo tempo, a complementaridade de suas atuações no campo da mobilidade urbana. Ressalta-se que o Sindicato dos Metroviários de Minas Gerais (Sindimetro/MG) não foi indicado no diagrama. A Figura 2 apresenta o diagrama de Venn.



Figura 2: Diagrama Venn – Focos de atuação das organizações

As sete organizações analisadas compartilham uma atuação voltada à mobilidade urbana sustentável, com foco na mobilidade ativa, no transporte coletivo gratuito e no direito à cidade. Predominam estruturas horizontais, atuação voluntária e uma postura crítica ao modelo de transporte centrado no automóvel. A Tabela 1 sintetiza suas principais características organizacionais.

Tabela 1: Síntese das organizações investigadas

Organização	Ano de Criação	Forma Jurídica	Organização Interna	Financiamento	Premiações
BH em Ciclo	2012	Associação	Horizontal	Não	Sim
SOnhANDO A PÉ	2021	Coletivo	Horizontal	Não	Sim
Bloco da bicicleta	2014	Informal	Horizontal	Sim	Sim
Movimento Nossa BH	2008	Associação	Rotativa	Sim	Sim
Movimento Tarifa Zero	2013	Informal	Horizontal	Não	Sim
Coordenadores de grupos de pedal	2022	Coletivo	Sem estrutura formal	Não	Não
Sindimetro-MG	1995	Sindicato	Diretoria eleita e composta de 24 membros	Não	Não

Entre as principais forças dos grupos destacam-se a capacidade de mobilização, a construção de redes colaborativas, a atuação em campanhas de sensibilização e a produção técnica qualificada. Por outro lado, as fragilidades incluem a ausência de financiamento estruturado, a dificuldade de garantir renovação e engajamento contínuo dos membros e a percepção generalizada de que os espaços institucionais oferecem pouca abertura para uma participação popular efetiva. As diferenças entre os grupos se expressam principalmente nos focos de atuação, bem como nos graus de formalização, na inserção em espaços institucionais e na trajetória de cada organização no campo da mobilidade urbana. Ainda assim, é evidente que todos compartilham a compreensão de que a mobilidade urbana deve ser tratada como um direito e que sua efetivação passa por uma transformação estrutural do modelo de transporte, das prioridades urbanas e dos processos participativos nas cidades.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As organizações ativistas que responderam à pesquisa demonstram uma diversidade significativa em suas origens, estruturas e estratégias de atuação, refletindo a complexidade e pluralidade do campo da mobilidade urbana em Belo Horizonte e sua região metropolitana. Apesar das diferenças, há um compromisso comum com a promoção da mobilidade ativa, o direito à cidade e a defesa do transporte coletivo, especialmente no que tange à tarifa zero. Os desafios enfrentados, como a limitação de recursos financeiros, o engajamento de voluntários e a participação popular ainda restrita, evidenciam as dificuldades intrínsecas à atuação cidadã em um contexto urbano marcado pela priorização do transporte individual e motorizado e por estruturas institucionais pouco inclusivas. O diagrama de Venn revela, contudo, que essas organizações, mesmo atuando em áreas específicas, possuem pontos de convergência importantes, sugerindo possibilidades de articulação e fortalecimento conjunto para a construção de políticas públicas mais justas, sustentáveis e democráticas. Essas constatações apontam para a necessidade de apoio institucional e maior abertura dos espaços de participação popular, de modo a ampliar o impacto e a efetividade das lutas por mobilidade urbana inclusiva na região.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET/MG, à FAPEMIG e ao CNPQ pelo apoio para participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARNEIRO, Ricardo et al. Transporte coletivo e movimento Tarifa-Zero-BH: repertórios de ação e incidência na política local. Revista Política Pública, 2021. Disponível em: https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/rppublica/article/view/19600. Acesso em: 3 jul. 2025.

CARUSO, Chico. Fora Collor: o fenômeno em decomposição. Rio de Janeiro: Globo, 1992.

GOHN, Maria da Glória. A sociedade brasileira em movimento: vozes das ruas e seus ecos políticos e sociais. CADERNO CRH, Salvador, v. 27, n. 71, p. 431-441, Maio/Ago. 2014.

LEONELLI, Domingos; OLIVEIRA, Dante de. Diretas Já: 15 meses que abalaram a ditadura. Rio de Janeiro: Record, 2004. 644 p. ISBN 978-85-01-06779-1.

MOVIMENTO TARIFA ZERO BH. Tarifa zero: entre a utopia e a prática. 2020. Disponível em: https://www.tarifazerobh.org/tarifa-zero-entre-a-utopia-e-a-pratica/. Acesso em: 3 jul. 2025.

OLIVEIRA, Igor Thiago Moreira. Sonhos diurnos em meio aos destroços do presente: o movimento Tarifa Zero e a luta pelo direito ao transporte em Belo Horizonte. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-BA6KUF. Acesso em: 3 jul. 2025.

OLIVEIRA, Igor Thiago Moreira; LEÃO, Geraldo. Horizontes juvenis da luta por transporte: o Movimento Tarifa Zero em Belo Horizonte. Praxis Educativa, 2020. Disponível em: https://revistas.uepg.br/index.php/praxiseducativa/article/view/13475. Acesso em: 3 jul. 2025.

SEBASTIÃO, Sónia Pedro; VILA VERDE, Daniela. Grupos ativistas e as funções de Relações Públicas: os casos dos lesados do BPN e do BES. Estudos em Comunicação, n. 27, v. 1, art. 10, 2018. DOI: 10.20287/ec.n27.v1.a10.

SILVA, Glauco Peres da. Mobilidade urbana: o desafio para as cidades no século XXI. Oxfam Brasil, 8 fev. 2017. Disponível em: https://www.oxfam.org.br/noticias/mobilidade-urbana-o-desafio-para-as-cidades-no-seculo-xxi/. Acesso em: 2 jul. 2025.

VENN, John. On the diagrammatic and mechanical representation of propositions and reasonings. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, v. 10, n. 59, p. 1–18, jul. 1880.

MOBILIDADE URBANA NO RECIFE - PE: DESAFIOS DA TRANSIÇÃO MODAL E DA PRIORIDADE AO TRANSPORTE COLETIVO

Matheus Moreira dos Santos Marinho, Rafaella Paula Palmeira dos Santos, Ligia Rabay
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
O presente estudo tem como objetivo analisar os entraves da mobilidade urbana no Recife, capital de Pernambuco, relacionados à priorização do transporte coletivo, ao tempo de deslocamento e ao descompasso entre o Plano de Mobilidade Urbana e a realidade observada, a partir da relação entre a estrutura urbana, o planejamento de transporte e o tempo excessivo de deslocamento. A metodologia adotada combinou abordagem qualitativa e análise exploratória de três bases de dados: as diretrizes e diagnóstico do Plano de Mobilidade Urbana do Recife, a matriz Origem-Destino da Região Metropolitana do Recife e os indicadores do TomTom Traffic Index. Os resultados revelam um descompasso entre o planejamento proposto e a realidade operacional, marcada por elevada dependência do transporte individual e longos tempos de deslocamento e deficiências. A análise aponta que a ineficiência do sistema de mobilidade reflete uma lógica urbana excludente e pouco integrada. O estudo reforça a necessidade de um planejamento urbano estruturado, com priorização do transporte coletivo e ações voltadas à equidade na mobilidade.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana nas cidades brasileiras tem se constituído como um dos principais desafios contemporâneos do planejamento urbano, em especial em cidades marcadas por crescimento acelerado e ocupação desordenada. De acordo com Andrade (2015), a ocupação no Recife se dá de maneira dispersa e a concentração de atividades no centro urbano aumenta a necessidade de deslocamentos mais longos, agravando os problemas de mobilidade. Segundo dados do SENATRAN (2025), Recife possui frota de aproximadamente 390 mil carros e 188 mil motocicletas. O estímulo à motorização individual, aliado à carência de investimentos estruturantes em transporte coletivo, resultou em um sistema de circulação disfuncional, com elevados níveis de congestionamento, longos tempos de deslocamento e acentuada perda de qualidade de vida para a população. As cidades devem ser planejadas para as pessoas antes de serem moldadas para os veículos. Esse princípio básico muitas vezes é negligenciado em áreas urbanas em detrimento do automóvel (Gehl, 2010).

A fragmentação da malha urbana e a expansão horizontal das áreas residenciais intensificaram a dependência do transporte motorizado, tornando o elevado volume de veículos um fator central na ineficiência da mobilidade. Como ressalta Sales (2013), a mobilidade urbana vai além da simples disponibilidade de modos de transporte, envolvendo também a infraestrutura viária e as condições de acessibilidade que garantam o pleno deslocamento das pessoas. No entanto, no caso do Recife, o autor aponta que a política de mobilidade urbana se configura como uma construção histórica, moldada por negociações e disputas dentro de um processo social complexo.

Os efeitos dessa estrutura urbana não se restringem apenas à dimensão física do deslocamento, mas atingem diretamente o direito à cidade e ao próprio exercício da cidadania. A inacessibilidade se torna evidente quando o espaço urbano não é concebido para as pessoas. Como afirma Meira (2013), a cidade não pode ser pensada partindo da premissa de que, um dia, todos terão um automóvel. Portanto, a imobilidade forçada, resultante da combinação entre baixa acessibilidade e custos elevados de transporte, revela-se como um mecanismo silencioso, porém potente, de reprodução da desigualdade urbana. Ainda segundo Meira (2013), o crescimento do uso de veículos particulares, gera uma série de externalidades negativas. Entre elas estão o prolongamento dos tempos de deslocamento, a intensificação das emissões de poluentes com impactos diretos na saúde pública, e o encarecimento da operação do transporte coletivo, o que, por sua vez, pressiona o aumento das tarifas. Esses efeitos comprometem o direito pleno à mobilidade e à cidade.

A importância atribuída ao automóvel como principal modo de transporte não apenas alterou a configuração espacial urbana, como também impactou a forma como as pessoas se relacionam com o território. Nesse contexto, o automóvel não é apenas um meio de transporte, mas um agente modelador da vida urbana, como aponta Gallo (2025), o automóvel reformulou a paisagem urbana e o estilo de vida moderna, instituindo uma forma de subordinação, condicionando e limitando a autonomia do indivíduo na sociedade moderna. Ao

contrário do que se propaga como símbolo de liberdade, o automóvel cria dependência, impõe custos elevados e contribui para a fragmentação urbana.

O tempo excessivo gasto no trânsito representa uma forma de perda da qualidade de vida. Em metrópoles como Recife, onde o sistema de mobilidade é desarticulado e ineficiente. Nesse cenário, o trânsito deixa de ser apenas um entrave logístico e passa a configurar um mecanismo de desgaste físico, emocional e social. Como destaca Costa (2008), é fundamental elaborar diagnósticos mais precisos sobre a mobilidade urbana, que considerem a complexa relação entre os habitantes e a infraestrutura disponível para seus deslocamentos. Segundo o autor, somente a partir dessa compreensão será possível propor soluções eficazes que promovam melhorias reais na qualidade de vida da população, além de impulsionar o desenvolvimento esperado pelos municípios e pela gestão pública.

De acordo com Banister (2008), promover a mobilidade urbana exige o desenvolvimento de cidades que priorizem o transporte coletivo, reduzindo assim a dependência do automóvel. A intenção não é restringir o uso dos carros, o que poderia ser inviável é interpretado como limitação da liberdade individual, mas sim estruturar as cidades de maneira tão eficaz que o automóvel deixe de ser indispensável no dia a dia. Isto posto, o paradigma da mobilidade propõe uma ruptura com a ênfase histórica em ampliar a infraestrutura viária, priorizando modos de transporte alternativos e a integração com o planejamento urbano. Uma mobilidade acessível vai além de melhorias técnicas, ela articula transporte e planejamento urbano em prol da equidade socioespacial (Cardozo, 2025).

Em suma, a busca por soluções para a mobilidade urbana no Recife não pode estar dissociada de um processo mais amplo de reforma conceitual na forma como se planeja a cidade. Este artigo, portanto, parte do reconhecimento da centralidade do planejamento de mobilidade urbana no debate sobre urbanismo e propõe uma análise propositiva sobre como o planejamento urbano pode ser reposicionado como vetor de transformação da mobilidade na cidade do Recife.

2. MATERIAIS E METODOS

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se na combinação de análise qualitativa e exploratória, com o objetivo de diagnosticar alguma ineficiência do sistema de mobilidade urbana da cidade do Recife - PE. Baseando-se na articulação de três conjuntos principais de dados: (i) as diretrizes estratégicas e diagnósticos técnicos presentes no Plano de Mobilidade Urbana do Recife - PlanMob Recife (Recife, 2021), (ii) os dados da matriz Origem-Destino (OD) da Região Metropolitana do Recife realizada em 2021 (Recife, 2024), que registra os fluxos de deslocamento da população entre zonas urbanas, e (iii) os indicadores de desempenho viário disponibilizados pela plataforma TomTom Traffic Index. Essa combinação metodológica permite observar como se dá o tempo perdido nos deslocamentos diários, de acrodo com o material a qual se dispõe

A partir das propostas do plano, foi realizada uma análise de sua aderência à realidade atual. Em complemento a isso, os dados da matriz Origem-Destino (OD) foram utilizados para identificar os principais vetores de deslocamento pendular entre as zonas urbanas, considerando o motivo das viagens (trabalho e estudo), os bairros de origem e destino, os tempos médios estimados de deslocamento e a atratividade das zonas. Ademais, os dados de tráfego urbano obtidos via TomTom Traffic Index foram empregados para mensurar o desempenho da circulação viária em Recife. Foram analisados indicadores como tempo médio para percorrer 10 km, nível de congestionamento por horário e impacto anual do congestionamento em horas perdidas. Esses dados ofereceram subsídios para a comparação entre a situação atual e os objetivos traçados no PlanMob (Recife, 2021).

Portanto, a metodologia adotada estrutura-se em duas dimensões analíticas complementares: macroscópica e microscópica. Macroscopicamente, a análise contempla dados oficiais sobre a mobilidade e deslocamento urbano do Recife, conforme propõem Zhang et al. (2022). Já na perspectiva microscópica, são considerados elementos culturais, que influenciam diretamente a escolha do modo. Como destaca Metz (2023), a decisão sobre o modo de deslocamento envolve variáveis subjetivas, como a atribuição simbólica de *status* ao automóvel, a conveniência do uso cotidiano e a percepção individual de segurança, fatores que ajudam a explicar o padrão de mobilidade adotado pela população.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa entre o sistema de mobilidade urbana do Recife e as diretrizes estratégicas propostas no Plano de Mobilidade Urbana da cidade revela um descompasso entre planejamento e execução. Esse comparativo está presente na Tabela 1. A partir da sistematização dos eixos temáticos como qualidade do sistema, matriz de mobilidade, infraestrutura, gestão, tecnologia e transporte público foi possível mapear diversos objetivos que permanecem em estado de baixa ou nenhuma implementação.

No eixo "Matriz de Mobilidade", por exemplo, o plano prevê a redução da participação dos veículos privados e a ampliação dos modos coletivos e ativos (ônibus, metrô, bicicleta, caminhada). No entanto, os dados do TomTom apontam uma velocidade média reduzida (23,5 km/h), 45% de nível de congestionamento e 105 horas perdidas anualmente por motorista, indicadores que demonstram a prevalência do automóvel como principal meio de transporte e a ineficiência dos modos coletivos em competir com o carro. Essa evidência é reforçada pela ausência de faixas exclusivas consolidadas nos eixos estruturantes, também previstas no plano. No que se refere à "Infraestrutura" e à "Tecnologia e Gestão", o plano propõe soluções modernas como a revisão e adequação dos corredores viários, a implantação de ciclovias, painéis informativos, semáforos inteligentes e um centro integrado de controle e monitoramento. Contudo, os dados de desempenho real sugerem que a cidade ainda carece de instrumentos básicos de gestão da mobilidade. A ausência desses mecanismos impacta diretamente na capacidade do município de prever e reagir a picos de tráfego ou falhas de operação**.**

Tabela 1: Tabela qualitativa comparativa entre PlanMob Recife e sua aplicabilidade

Tema / Área	Proposta do PlanMob	Situação Atual Observada	Avaliação Qualitativa
Qualidade do Sistema	Manutenção adequada da infraestrutura e dos serviços	Sistema viário saturado, com manutenção deficiente e transporte coletivo ineficiente	Parcialmente implementado
Matriz de Mobilidade	Reduzir uso de veículos privados e incentivar modos coletivos e ativos	Forte dependência do carro; transporte público pouco atrativo; baixa infraestrutura ativa	Não implementado
Gestão da Mobilidade	Modernizar processos de gestão e reduzir tempo de resposta para usuários.	Ausência de dados integrados e respostas ineficazes às crises de mobilidade	Implementação incipiente
Pesquisa e Diagnóstico	Diagnóstico contínuo da mobilidade urbana	Dados defasados; ausência de banco de dados operacional georreferenciado	Parcialmente implementado
Infraestrutura	Ampliação de ciclovias, faixas exclusivas e revisão viária	Ciclovias descontínuas e sem integração modal; faixas exclusivas ineficazes ou inexistentes	Baixa execução
Transporte Público	Expansão do BRT, faixas exclusivas e integração tarifária	Sistema BRT ineficiente; sobrecarga nos ônibus; falta de integração modal e física	Implementação insuficiente
Logística Urbana	Ordenar operações de carga e descarga	Trânsito agravado por circulação desordenada de veículos de carga	Não implementado
Estacionamento	Regular oferta, ampliar Zona Azul e integrar com transporte público	Ausência de controle efetivo; rotatividade limitada	Implementação parcial
Tecnologia e Gestão	Painéis informativos, semáforos inteligentes e centro de controle	Ausência de integração tecnológica em larga escala; semáforos descoordenados	Pouca aplicação prática

Fonte: Autoria própria

A análise da matriz Origem-Destino (Tabela 2) evidencia os principais vetores de deslocamento pendular urbano na RMR, revelando um cenário de mobilidade ineficiente. Entre as zonas com maior atratividade e tempo de viagem elevado, destacam-se algumas, como a zona 59, com motivação predominante laboral e um tempo médio de deslocamento de aproximadamente 45 minutos. Outros pontos críticos incluem a zona 114, com viagens motivadas, primordialmente, por estudo, e a zona 116 (Várzea), impactados pela conexão à BR-101. Apesar da presença de zonas com alta densidade de polos geradores de viagem, como Derby e Graças (Zona 124) e Cidade Universitária, a infraestrutura de mobilidade coletiva não atende de forma eficaz à demanda. A dependência do transporte individual nestas regiões é um fator agravante dos tempos elevados de deslocamento, que refletem tanto a falta de corredores de alta capacidade quanto a baixa integração modal e ausência de priorização ao transporte público prevista no plano de mobilidade urbana.

Tabela 2: Recorte de dados da matriz Origem-Destino (OD)

Zona	Bairro(s) principais	Motivo principal	Atratividade	Tempo médio estimado	Observações urbanas principais
59	Paissandu, Boa Vista, Ilha do leite e Soledade	Trabalho	Muito Alta (>15%)	~45 min	Principal zona de destino por trabalho; polo médico e serviços
124	Derby e Graças	Estudo/ Trabalho	Alta	~30 à 45min	Concentração de escolas, faculdades, hospitais
65	Pina (RioMar)	Trabalho	Média-Alta	~45–50 min	Comércio e serviços; shoppings e fluxo turístico
71	Boa Viagem	Trabalho	Média-Alta	~45–50 min	Zona residencial e turística com atratividade moderada
114	Cidade Universitária	Estudo/Trabalho	Média-Alta	~55 min	Presença da UFPE
127	Jaqueira, Rosarinho, Tamarineira	Estudo	Média	~35–40 min	Área de classe média com colégios e serviços
72	Pina	Trabalho	Média	~45 min	Zona mista com comércio, hotéis e vias estruturadoras
116	Várzea	Estudo	Média	~50–55 min	Conecta à UFPE, com fluxo intenso na BR-101

Fonte: Autoria própria

A análise dos dados fornecidos pelo *TomTom Traffic Index* (Tabela 3) revela um cenário de ineficiência no sistema viário de Recife. O tempo necessário para percorrer apenas 10 km chega a 32 minutos e 52 segundos no horário de pico da tarde, sendo a média anual de 25 minutos e 30 segundos, o que reflete uma mobilidade comprometida em termos de fluidez. Em comparação com outras capitais latino-americanas, Recife ocupa a 18ª posição em tempo de viagem na América do Sul e a 6ª no Brasil. O nível médio de congestionamento anual é de 45%, isso compromete a velocidade média de circulação, que despenca para 18,3 km/h nas tardes e 19,2 km/h nas manhãs. A velocidade média semanal gira em torno de 22 km/h. Apesar da cidade registrar apenas dois congestionamentos ativos mapeados por sensores (48h atualizados), esses picos atingem até 100% de saturação, sobretudo no final da tarde. O impacto da má fluidez é mensurado em 108 horas extras anuais perdidas por motorista, o que equivale a mais de quatro dias úteis imobilizados no trânsito. Este tempo compromete diretamente a produtividade urbana e reforça a ausência de medidas eficazes para o gerenciamento da mobilidade.

Tabela 3: Dados fornecidos pelo TomTom *Traffic Index*

Indicador	Valor Recife (2024)	Interpretação crítica
Tempo médio por 10 km	25min 30s (anual) até 32min 52s (pico da tarde)	Alta perda de tempo urbano
Nível de congestionamento anual	45% (anual), sendo que 75% (pico da manhã) e 85% (pico da tarde)	Trânsito 45% mais lento que o normal
Impacto anual (tempo perdido)	108h	> 4 dias úteis por motorista
Velocidade média no pico tarde	18,3km/h	Muito inferior à ideal urbana (~40 km/h)
Ranking América do Sul (viagem)	22º	Desempenho abaixo de várias capitais latino-americanas
Ranking Brasil (viagem)	6º	A 9ª cidade em número de habitantes e a 6ª em tempo de viagem
Ranking Mundial de congestionamento	18º	Recife se encontra entre as 20 cidades mais congestionadas do mundo

Fonte: Autoria própria

A Figura 1 ilustra a variação semanal do congestionamento em Recife, revelando que os maiores índices ocorrem durante os dias úteis, com picos entre 70 a 80%. Essa tendência confirma o padrão pendular de mobilidade urbana centrado em atividades laborais e educacionais. Já aos finais de semana, observa-se uma redução, com o domingo apresentando o menor valor. Essa oscilação destaca a necessidade de intervenções específicas nos horários de pico, adotar medidas estruturais para reduzir o uso do automóvel individual**,** melhorar a atratividade do transporte público e implementar tecnologias de gestão do tráfego.

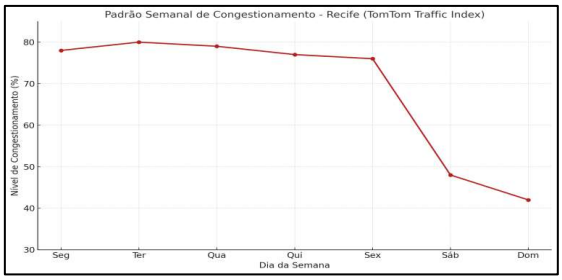


Figura 1: Padrão semanal de congestionamento em Recife
Fonte: Adaptação dados *TomTom Traffic Index*

4. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam a imobilidade urbana no Recife, marcada por congestionamentos e longos tempos de deslocamento, como mostram os dados apresentados. Observa-se um descompasso entre o que prevê o Plano de Mobilidade Urbana e o que de fato é executado, sobretudo em transporte público e gestão do tráfego. A solução para esse cenário já está delineada no próprio plano, mas esbarra na falta de investimentos e decisão política. Priorizar o transporte coletivo com corredores exclusivos, restringir o uso do automóvel e integrar mobilidade e inclusão social são medidas para reverter à lógica excludente da mobilidade atual.

Diante das análises, conclui-se que os objetivos do estudo foram atingidos ao evidenciar entraves especificos da mobilidade no Recife. A pesquisa confirmou a forte dependência do transporte individual e a ineficácia das medidas de incentivo ao transporte coletivo.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros explorem abordagens como a percepção dos usuários. Além disso, seria relevante aplicar ferramentas quantitativas de modelagem estatística para cruzar os dados do Plano de Mobilidade, da matriz Origem-Destino e do TomTom Traffic Index, bem como utilizar técnicas de geoprocessamento para identificar espacialmente os principais eixos críticos de deslocamento.

REFERÊNCIAS

Andrade, J. N. e R. S. Silveira Jr. (2015) Traffic calming: o uso dos dispositivos de acalmamento de tráfego na cidade do Recife. *Revista Hum@næ – Questões Controversas do Mundo Contemporâneo*, Edição Especial SETA.

Banister, D. (2008) The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, v. 15, n. 2, p. 73–80.

Bodnar, Z. (2022) Autonomia e importância do Direito da Cidade. *Revista de Direito da Cidade*, v. 14, n. 1, p. 581–607. DOI: 10.12957/rdc.2022.49761.

Cardozo, R. J. M. (2025) *Fatores que influenciam o uso do transporte público na Região Metropolitana do Recife: uma análise por Modelagem de Equações Estruturais*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife.

Costa, M. D. S. (2008) *Um índice de mobilidade urbana sustentável*. Monografia (iniciação científica). Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos.

Gallo, D. (2025) Cidade ativa: considerações sobre a cidade saudável. *Cadernos Metrópole*, v. 27, n. 63, e6363255.

Gehl, J. (2010) *Cities for People*. Washington: Island Press.

Meira, L. H. (2013) *Políticas públicas de mobilidade sustentável no Brasil: barreiras e desafios*. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife.

Metz, D. (2023) Drivers' perspectives of car dependence. *Urban Planning*, publicado em 25 jul. 2023.

Recife (2021) *Plano Diretor de Transporte e Mobilidade Urbana do Recife*. Recife: Prefeitura da Cidade do Recife.

Recife (2024) *Relatório da Pesquisa Origem-Destino Recife 2021*. Recife: Prefeitura do Recife.

Sales, R. S. F. (2013) *Políticas públicas e sua implementação: um estudo de caso da Política de Mobilidade Urbana da Região Metropolitana do Recife*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal de Pernambuco. Recife.

TomTom (s.d.) *Traffic Index Ranking*. Amsterdam: TomTom International BV. Disponível em: https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/?country=CO%2CPE%2CAR%2CMX%2CBR%2CUY%2CCL (acesso em 25/05/2025).

Zhang, C.; Y. Zhao; X. Liu e S. Gao (2022) Factors and mechanism affecting the attractiveness of public transport: macroscopic and microscopic perspectives. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2022, n. 1, p. 5048678. DOI: 10.1155/2022/5048678.

O IMPACTO DA EXPANSÃO DA INFRAESTRUTURA NA DEMANDA DE SISTEMAS DE BICICLETAS COMPARTILHADAS: UM ESTUDO DE CASO PREDITIVO EM FORTALEZA

Marco Antonio Machado de Araújo[1], Paulo Bruno de Sousa Nunes[1], Alan Victor Rodrigues Coelho[2], Clovis Ernesto de Alencar Matos Filho[2], Saulo Santiago Oliveira[2]
[1]Universidade Federal do Ceará (UFC), [2]Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC)

RESUMO
A gestão eficiente de sistemas de compartilhamento de bicicletas (SBC), como o Bicicletar em Fortaleza, exige ferramentas de previsão para otimizar a alocação de recursos públicos. Este estudo desenvolve um modelo de Regressão com erros ARIMA, com base em dados diários de 2018 a 2025, para avaliar o impacto na demanda de dois cenários estratégicos até 2030: Manutenção do Sistema atual e uma Expansão Planejada da infraestrutura (até 4.800 vagas e 2.400 bicicletas). Os resultados indicam que o cenário de expansão tem o potencial de gerar aproximadamente 1,3 milhão de viagens adicionais em comparação à manutenção da rede existente. Este volume representa mais de 3,8 milhões de quilômetros pedalados, com potencial de evitar a emissão de cerca de 494 toneladas de CO_2. Conclui-se que a metodologia oferece uma ferramenta quantitativa de apoio à decisão, capaz de justificar investimentos e subsidiar o planejamento da mobilidade sustentável.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de compartilhamento de bicicletas (SBC), que surgiram na Europa em 1965 e foram introduzidos no Brasil em 2011, consolidaram-se como um serviço inovador de mobilidade urbana. Neles, bicicletas são disponibilizadas para uso compartilhado por tempo limitado, permitindo que usuários cadastrados realizem trajetos entre diferentes estações (Kohl *et al.*, 2015; IPEA, 2019). No contexto brasileiro, estes programas cumprem um importante papel na promoção do uso da bicicleta e na democratização do acesso ao transporte público.

Em Fortaleza, o SBC, denominado Bicicletar, foi implementado em dezembro de 2014 e desde então tem passado por sucessivas expansões. Atualmente, o sistema atingiu uma escala de grande relevância para a cidade, contabilizando 253 estações, com mais de 3.500 vagas que atendem 85 bairros, e uma frota de aproximadamente 1.300 bicicletas, das quais 100 são elétricas. Essa extensa infraestrutura, que já registrou cerca de 7,9 milhões de viagens, garante uma cobertura notável: estima-se que 60,9% da população de Fortaleza resida a uma distância de 500 metros de uma estação, uma taxa significativamente superior à de metrópoles como Rio de Janeiro (18%) e São Paulo (7%) (Araújo *et al.*, 2024).

O sucesso e a escala do Bicicletar, no entanto, trazem consigo desafios de gestão significativos. A operação do sistema é financiada por um modelo híbrido, com 173 estações custeadas pela prefeitura e 80 por patrocínio privado, e sua integração com o passe de transporte público (Bilhete Único) reforça seu caráter de serviço essencial. A manutenção desta ampla rede possui custos elevados, tornando a eficiência operacional um fator crítico. Um planejamento inadequado pode resultar tanto na insatisfação dos usuários, pela falta de bicicletas ou de vagas, quanto na alocação ineficiente de recursos públicos.

Nesse contexto de otimização de recursos, a previsão de demanda emerge como uma ferramenta gerencial estratégica. A capacidade de antecipar as flutuações diárias, sazonais e de longo prazo no número de viagens permite subsidiar decisões sobre a expansão da rede e a logística operacional. A literatura acadêmica tem validado o uso de modelos de séries temporais como uma abordagem eficaz para a previsão de demanda em SBC (Lahuerta-Pueyo e Tarliz, 2023).

Alinhado a essa abordagem consolidada na literatura, o presente artigo tem o objetivo de desenvolver um modelo preditivo para estimar a demanda diária do sistema Bicicletar. O propósito é utilizar este modelo para avaliar o impacto de dois cenários estratégicos para o horizonte de 2025 a 2030. O primeiro, um cenário de Manutenção do Sistema, analisa a evolução da demanda caso não haja novos investimentos. O segundo, um cenário de Expansão Planejada, projeta o crescimento da infraestrutura até as metas de 4.800 vagas (aproximadamente 400 estações) e 2.400 bicicletas. Por meio desta análise comparativa, busca-se fornecer uma ferramenta quantitativa de apoio à decisão, capaz de subsidiar o planejamento de médio e longo prazo e garantir que o crescimento do Bicicletar continue a beneficiar a cidade de Fortaleza de forma sustentável e eficiente.

2. MÉTODO

A metodologia deste estudo foi estruturada em três etapas principais: (1) preparação da base de dados e análise exploratória para compreensão dos padrões de demanda; (2) desenvolvimento do modelo preditivo para estimar as viagens diárias; e (3) construção de cenários futuros para projetar a demanda em diferentes contextos de investimento.

2.1. Preparação dos Dados

O estudo utilizou uma base de dados anonimizada contendo 2.738 observações diárias de operação do sistema Bicicletar, coletadas no período entre 1º de janeiro de 2018 e 30 de junho de 2025. O marco inicial foi definido em função da consistência no registro da quantidade diária de bicicletas em operação. As variáveis utilizadas foram: o total de viagens diárias (QdeViagens) como variável de resposta; e três variáveis preditoras (regressores externos): o número de bicicletas efetivamente disponíveis (BikeCampo), a quantidade total de vagas nas estações (QdeVagas), e a classificação do dia (TipoDia). Para a modelagem, a variável categórica TipoDia (com os níveis "DiaUtil" e "DiaNaoUtil") foi transformada em uma variável binária (*dummy*) denominada dia_nao_util, que assume o valor 1 para fins de semana e feriados, e 0 para dias úteis.

2.2. Análise Exploratória e Modelagem Preditiva

Para investigar a estrutura dos dados, foi realizada uma Análise Exploratória dos Dados (AED), que envolveu a Decomposição da série temporal pelo método STL para visualizar os componentes de tendência e sazonalidade, e a Análise da Função de Autocorrelação (ACF) para diagnosticar a presença de dependência serial. Com base nas características temporais dos dados e na necessidade de incorporar as variáveis operacionais, foi selecionado um modelo de Regressão com erros ARIMA. Esta classe de modelo, uma extensão da estrutura clássica de Box *et al.* (2015), é particularmente adequada por sua capacidade de, simultaneamente, estimar o impacto dos regressores externos e tratar a estrutura de autocorrelação residual. O ajuste do modelo foi realizado em ambiente R com o auxílio da função auto.arima do pacote forecast, que seleciona a ordem ótima do processo ARIMA (p,d,q) ao minimizar o Critério de Informação de Akaike Corrigido (AICc), conforme detalhado em Hyndman e Athanasopoulos (2021). A adequação do modelo final foi validada por meio da análise de seus resíduos, que devem se comportar como um ruído branco, ou seja, sem padrões de autocorrelação.

2.3. Construção dos Cenários de Previsão

Para estimar a demanda futura até 31 de dezembro de 2030, foram desenvolvidos dois cenários para o comportamento das variáveis preditoras. Em ambos, a variável dia_nao_util foi determinada com base no calendário futuro.

- Cenário 1: Manutenção do Sistema. Este cenário, que serve como linha de base, considera a interrupção de novos investimentos. Os valores de BikeCampo e QdeVagas foram mantidos constantes durante todo o horizonte de previsão, utilizando-se como base o último nível observado em junho de 2025.
- Cenário 2: Expansão Planejada. Este cenário simula um crescimento direcionado e sincronizado da infraestrutura até metas específicas, estipuladas com base em diretrizes da Prefeitura de Fortaleza e em estudos de viabilidade para a expansão do próprio sistema. Para ambos os preditores (BikeCampo e QdeVagas), foram construídas curvas de saturação não-lineares, modelando um crescimento que desacelera à medida que se aproxima dos tetos predefinidos (2.400 bicicletas e 4.800 vagas), refletindo um processo de expansão por fases que tende à maturação da rede.

Para cada um destes cenários de insumos, o modelo ARIMA ajustado foi utilizado para gerar uma projeção de demanda diária.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia, divididos em quatro partes. A primeira detalha a caracterização da demanda e os padrões temporais identificados. A segunda apresenta o modelo preditivo final, incluindo sua equação e o impacto dos preditores. A terceira exibe as projeções comparativas dos cenários de Manutenção do Sistema e Expansão Planejada, quantificando seus impactos. A quarta, por fim, discute esses resultados e suas implicações.

3.1. Caracterização da Demanda e Padrões Temporais

A Análise Exploratória dos Dados (AED) foi fundamental para desvendar os padrões que governam o uso do sistema Bicicletar. A aplicação da decomposição da série temporal pelo método STL, cujo resultado é ilustrado na Figura 1, permitiu isolar e analisar os componentes de tendência, sazonalidade e resíduos, revelando a complexa dinâmica da demanda.

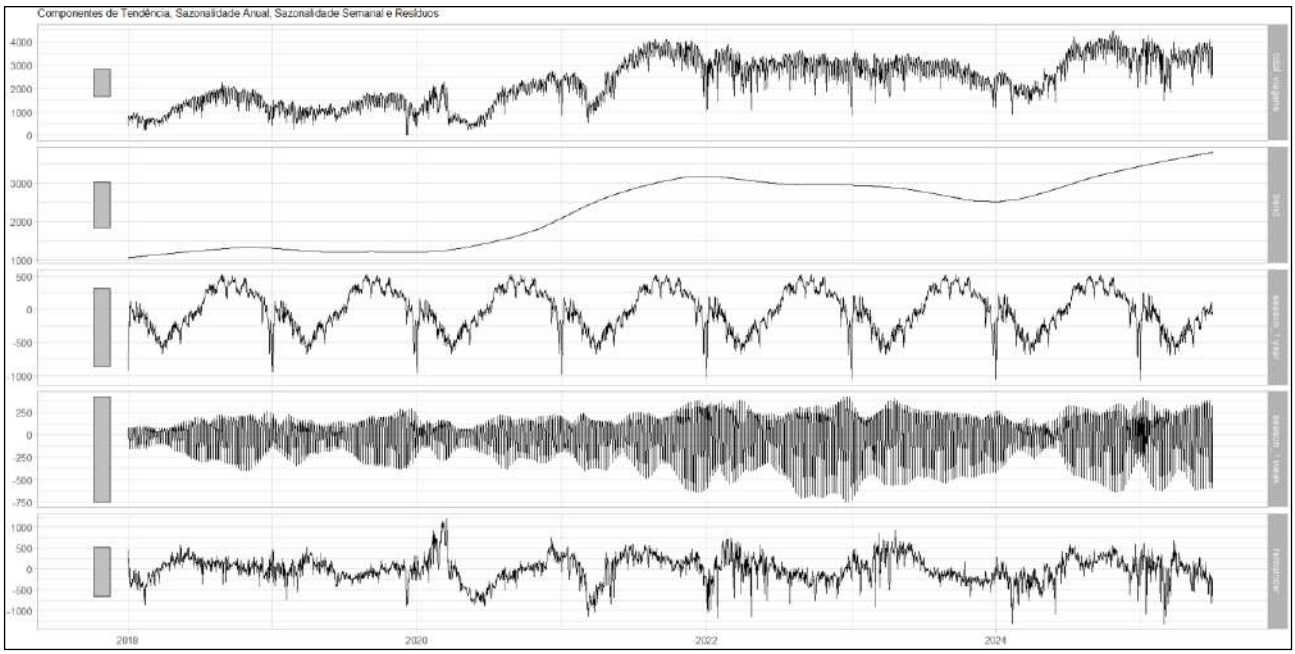


Figura 1: Decomposição da série de viagens diárias.

A componente de tendência confirmou um crescimento consistente e acentuado no número de viagens diárias ao longo do período analisado (2018-2025). Essa trajetória ascendente, com períodos de aceleração mais íngremes, indica não apenas uma contínua popularização do serviço, mas também reflete o impacto positivo das sucessivas expansões da rede, que ampliaram o acesso e a conveniência para novos usuários. A análise das componentes de sazonalidade revelou dois padrões cíclicos dominantes e previsíveis. A sazonalidade semanal é o padrão de curto prazo mais influente, com picos de demanda nos dias úteis e quedas acentuadas nos fins de semana. Este ritmo regular pode ilustrar um caráter predominantemente pendular do uso do sistema, consolidando-o como um modo de transporte funcional para deslocamentos de trabalho e estudo. Adicionalmente, a sazonalidade anual evidencia períodos de maior utilização que coincidem com o segundo semestre, o que em Fortaleza corresponde à estação com menor incidência de chuvas, sugerindo que fatores climáticos também modulam a demanda ao longo do ano.

Por fim, a análise do componente residual (o que sobra após a remoção da tendência e das sazonalidades) permite identificar dias atípicos, cujas flutuações não são explicadas pelos padrões regulares. Picos ou vales neste componente podem estar associados a eventos específicos, como feriados prolongados ou condições climáticas extremas, representando informações valiosas para uma análise mais aprofundada da operação. A clara identificação destas componentes, tendência, múltiplas sazonalidades e dependência temporal, não apenas caracteriza a demanda, mas também fundamenta a escolha de um modelo preditivo capaz de endereçar tal complexidade, conforme detalhado na seção seguinte.

3.2. Desempenho e Interpretação do Modelo Preditivo

As características temporais da série fundamentaram o ajuste de um modelo de Regressão com erros ARIMA(3,1,2). A performance do modelo, avaliada dentro do período de treinamento, demonstrou boa capacidade de aderência aos dados. O Erro Médio Absoluto (MAE) foi de 181,1 viagens, o que, em termos práticos, significa que a previsão do modelo se desviou do valor real em, na média, 181 viagens por dia, para mais ou para menos. Adicionalmente, o Erro Quadrático Médio da Raiz (RMSE) foi de 257,3; por ser uma métrica que penaliza desproporcionalmente os erros grandes, seu valor superior ao MAE sugere que o modelo, embora geralmente preciso, comete erros pontuais de maior magnitude em dias atípicos. Ambos os indicadores,

contudo, atestam a capacidade do modelo em se ajustar aos dados históricos. A equação final do modelo ajustado, que relaciona as variáveis preditoras à demanda diária, é apresentada a seguir:

$$Viagens_t = 0{,}53 \times BikeCampo_t + 0{,}32 \times Vagas_t - 364{,}73 \times dia_nao_util_t + \eta_t$$

Onde η_t representa o termo de erro, modelado como um processo ARIMA(3,1,2). A análise dos coeficientes dos regressores, detalhada na Tabela 1, quantifica o impacto de cada variável operacional. Todos os coeficientes se mostraram estatisticamente significativos. O preditor de maior magnitude foi o dia_nao_util, quantificando a forte natureza pendular do uso do sistema, provavelmente ligada a deslocamentos de trabalho e estudo.

Tabela 1: Coeficiente e interpretação do modelo final.

Variável Preditora	Coeficiente Estimado	Interpretação Prática
Nº de Bikes em campo	+ 0,53	A cada bicicleta a mais em operação, estima-se um aumento de 0,53 viagens por dia.
Nº de Vagas no sistema	+ 0,32	A cada vaga a mais no sistema, estima-se um aumento de 0,32 viagens por dia.
Dia Não Útil	- 364,73	Em um fim de semana/feriado, estima-se uma redução de 365 viagens vs. um dia útil.

3.3. Projeção e Análise Comparativa dos Cenários

Com o modelo ajustado, procedeu-se à projeção da demanda. A Tabela 2 resume a evolução anual da infraestrutura e da demanda para os dois cenários e a Figura 2 visualiza o retorno deste investimento em termos de demanda agregada por ano. O Cenário de Manutenção, que serve como linha de base, projeta uma demanda estável em torno de 1,24 milhão de viagens anuais. Em contraste, o Cenário de Expansão Planejada, que pressupõe um investimento para acrescentar 147 novas estações e 1.100 novas bicicletas à frota, mostra um crescimento acentuado e contínuo.

Tabela 2: Resumo das estimativas dos dois cenários.

Ano	Cenário Manutenção			Cenário Expansão			
	Bicicletas	Vagas	Viagens	Bicicletas	Vagas	Viagens	% Viagens
2025	1.304	3.575	625.680	1.543	3.821	661.780	5,8%
2026	1.304	3.575	1.240.388	1.876	4.215	1.390.865	12,1%
2027	1.304	3.575	1.240.388	2.043	4.401	1.454.826	17,3%
2028	1.304	3.575	1.240.388	2.178	4.552	1.506.899	21,2%
2029	1.304	3.575	1.240.388	2.295	4.683	1.544.251	24,5%
2030	1.304	3.575	1.240.388	2.400	4.800	1.580.150	27,4%

Nota: Os dados de 2025 referem-se apenas ao segundo semestre

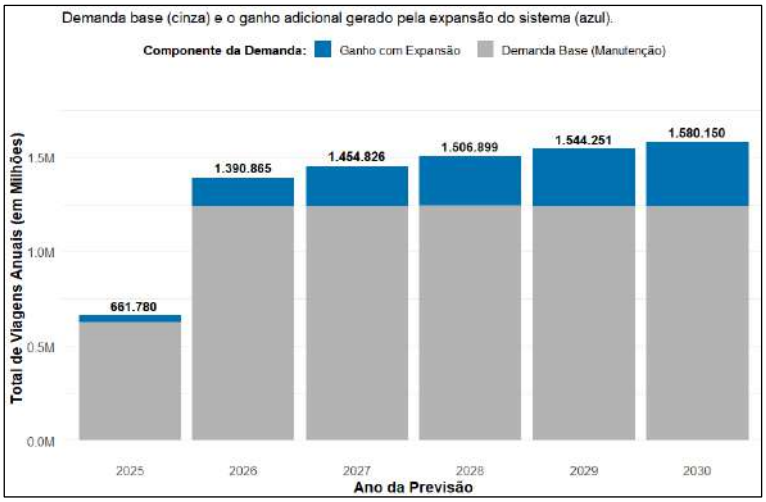


Figura 2: Gráfico de Barras Anual com o Ganho da Expansão.

A análise da projeção anual revela o impacto direto da expansão. Já no segundo semestre de 2025, o plano de crescimento geraria um adicional de 36.100 viagens. Este ganho incremental se acentua ao longo do tempo,

atingindo um adicional de 339.762 viagens em 2030. Ao todo, o investimento na expansão tem o potencial de gerar aproximadamente 1,3 milhão de viagens adicionais que não ocorreriam caso a infraestrutura permanecesse inalterada.

3.4. Discussão das Implicações Urbanas e Ambientais

O aumento de 1,3 milhão de viagens ao longo do horizonte de previsão se traduz em impactos tangíveis. Com base em parâmetros da Autarquia Municipal de Trânsito de Fortaleza (duração média de 25 min/viagem; velocidade média estimada de 7 km/h), calcula-se que uma viagem média percorre 2,92 km. Dessa forma, o "Ganho com a Expansão" equivale a mais de 3,8 milhões de quilômetros pedalados. Assumindo que parte dessas viagens substitua deslocamentos de automóvel (emissão de ~130g de CO_2/km), a expansão do sistema teria o potencial de evitar a emissão de aproximadamente 494 toneladas de CO_2 na atmosfera, contribuindo para as metas de sustentabilidade da cidade.

4. CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu e aplicou uma metodologia de série temporal para estimar a demanda futura do sistema Bicicletar, avaliando o impacto de diferentes cenários de investimento. A análise comparativa demonstrou quantitativamente o retorno do investimento em infraestrutura, projetando um ganho de aproximadamente 1,3 milhão de viagens adicionais ao longo de um horizonte de 5,5 anos. A principal contribuição do trabalho reside em oferecer aos gestores e planejadores urbanos uma ferramenta de apoio à decisão baseada em evidências, capaz de traduzir planos de expansão em resultados tangíveis como o aumento do uso, a quilometragem pedalada e a potencial redução de emissões de CO_2, fortalecendo a justificativa para a alocação de recursos públicos em mobilidade ativa.

Apesar da relevância dos resultados, é importante reconhecer as limitações do estudo. A projeção da demanda é inerentemente dependente das premissas estabelecidas para os cenários futuros e da continuidade dos padrões históricos, não sendo capaz de prever eventos exógenos disruptivos. Adicionalmente, a performance do modelo foi validada apenas com dados de treinamento (*in-sample*), e não através de um conjunto de teste ou validação cruzada. Além disso, o modelo não incorporou variáveis que sabidamente influenciam a demanda diária, como dados meteorológicos ou a ocorrência de grandes eventos na cidade. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão dessas variáveis para refinar a precisão do modelo, bem como a aplicação de técnicas de validação cruzada para séries temporais. Adicionalmente, futuras investigações poderiam explorar abordagens de *machine learning* e expandir a análise de cenários para avaliar o impacto de outras políticas, como alterações tarifárias ou a integração com outros modos de micromobilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC) pelas informações disponibilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, M. A. M. *et. al.* (2024). Análise exploratória da implementação de bicicletas elétricas (e-bikes) no sistema bicicletar de fortaleza. In: anais do 38º congresso de pesquisa e ensino em transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos..., Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/analise-exploratoria-da-implementacao-de-bicicletas-eletricas-e-bikes-no-sistema?lang=pt-br> Acesso em: 04 Jul. 2025.

Box, George E. P. et al. (2015). Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

Hyndman, R, J.; Athanasopoulos, G. (2021). Forecasting: principles and practice. 3. ed. Melbourne: OTexts, 2021. Disponível em: https://otexts.com/fpp3/. Acesso em: 4 jul. 2025.

Instituto de pesquisa econômica aplicada (IPEA). Sistemas de bicicletas compartilhadas no Brasil: panorama e principais desafios. Rio de Janeiro: Ipea, 2015. (Texto para Discussão, n. 2129).

Kohl, P. L. et al. O programa de bicicletas públicas de Nova York: inspiração para o caso brasileiro? In: Congresso brasileiro de transporte e trânsito, 20., 2015, Santos. Anais..Santos: ANTP, 2015.

Lahuerta-pueyo, C.; Tarliz, V. (2023). A comprehensive review of demand forecasting in bike-sharing systems. Transport Reviews, v. 43, n. 5, p. 1029-1055, 2023.

R core team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 4 jul. 2025.

Marco Antonio Machado de Araújo (marco.araujo@det.ufc.br)
Paulo Bruno de Sousa Nunes (paulo.nunes@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará (UFC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)
Rua Prof. Armando Farias, 703, Pici, Fortaleza, Ceará, Brasil

Alan Victor Rodrigues Coelho (victoralanrc2@hotmail.com)
Clovis Ernesto de Alencar Matos Filho (clovis.mts9@gmail.com)
Saulo Santiago Oliveira (saulo3san@gmail.com)
Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania de Fortaleza (AMC)
Av. Desembargador Gonzaga, 1630, Parque Iracema, Fortaleza, Ceará, Brasil

O PARADIGMA DAS CIDADES LENTAS PERANTE A MOBILIDADE E A ACESSIBILIDADE URBANAS SUSTENTÁVEIS: O CASO DO MUNICÍPIO DE SOCORRO, SP

Suettinni Jean, Anísio Brasileiro
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RESUMO
Este estudo investiga o paradigma das Cidades Lentas com foco na mobilidade e acessibilidade urbanas sustentáveis, utilizando o município de Socorro, SP, como caso de estudo. Através de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e análise de documentos oficiais, foram identificadas as principais características das cidades lentas, aplicáveis ao contexto de Socorro. Os resultados mostram que as Cidades Lentas, em sua rede internacional, implementaram políticas de mobilidade urbana sustentável e acessibilidade, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU 2030, especialmente o ODS 11. Conclui-se que as práticas adotadas em Socorro contribuem significativamente para a sustentabilidade urbana e podem servir como modelo para futuros projetos em outras cidades brasileiras de pequeno e médio portes.

1. INTRODUÇÃO

O paradigma das Cidades Lentas, ou Cittaslow, surgiu como uma resposta ao crescimento urbano acelerado e seus impactos negativos, promovendo um estilo de vida mais sustentável (Çiçek *et al*., 2019). Este movimento internacional enfatiza a mobilidade urbana e a acessibilidade, focando na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos (Oliveira, 2021; Banister, 2008). Socorro, SP, destaca-se como a primeira cidade lenta do Brasil, servindo como um estudo de caso relevante para explorar esses conceitos na prática.

O movimento Cittaslow integra princípios do Novo Urbanismo, como caminhabilidade, diversidade de usos do solo, acessibilidade universal, transporte ativo e sustentável, além da valorização de espaços públicos de qualidade (Yasin *et al*., 2023). Fundado em 1999 pelo economista Paolo Saturnini e um grupo de prefeitos italianos em Orvieto, na região da Úmbria, Itália, os objetivos iniciais e gerais do movimento das Cidades Lentas visavam promover ambientes urbanos sustentáveis através da desaceleração do ritmo de vida (Şengür & Atabeyoğlu, 2018; Zadęcka, 2018).

As Cidades Lentas, através de suas redes internacionais, implementaram políticas de mobilidade urbana sustentável e acessibilidade, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU 2030, especialmente o ODS 11. As práticas adotadas em Socorro contribuem para a sustentabilidade urbana e podem servir como modelo para futuros projetos em outras cidades brasileiras de pequeno e médio portes.
Essa valorização da lentidão também é entendida como uma forma de resgatar o tempo urbano como um bem comum, conforme argumenta Fleury (2022), que propõe um "urbanismo dos comuns". Nessa mesma direção crítica, Legros e Madelin (2020) apontam que a noção de desaceleração urbana pode ser mobilizada como resistência ao produtivismo e à lógica de crescimento contínuo nas cidades contemporâneas.

A literatura especializada oferece importantes contribuições para a compreensão das Cidades Lentas no que se refere à mobilidade e à acessibilidade urbanas sustentáveis. Banister (2008) enfatiza a caminhabilidade e a diversidade de usos do solo como fundamentos essenciais para uma mobilidade mais equitativa e eficiente. Oliveira (2021) ressalta a importância da mobilidade urbana sustentável para a melhoria da qualidade de vida, sobretudo em contextos urbanos de menor escala. Yasin et al. (2023) analisam a integração dos princípios do Novo Urbanismo no escopo do movimento *Cittaslow*, destacando aspectos como transporte ativo, espaços públicos de qualidade e uso misto do território.

Outrossim, Şengür & Atabeyoğlu (2018) discutem os desafios relacionados à implementação de políticas de acessibilidade universal. Por fim, Çiçek et al. (2019) aprofundam os fundamentos conceituais das Cidades Lentas e seus efeitos sobre a sustentabilidade urbana, consolidando o movimento como alternativa viável ao modelo desenvolvimentista hegemônico.

Os artigos analisados, como os de Banister (2008) e Monteiro *et al*. (2024), destacam a importância da mobilidade sustentável no desenvolvimento urbano. Banister (2008) discute a necessidade de reavaliar os princípios tradicionais do planejamento de transportes, enfatizando a flexibilidade no paradigma existente para

tornar a mobilidade sustentável uma realidade. Monteiro *et al*. (2024) acrescentam que o ambiente criado pode impactar a mobilidade ativa.

A revisão teórica abrange artigos publicados entre 2018 e 2024, concentrando-se em conceitos de mobilidade urbana sustentável e acessibilidade, alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU 2030, especialmente o ODS 11. Os principais autores que contribuem para esses conceitos incluem Çiçek *et al*. (2019), que exploram os fundamentos das Cidades Lentas e seus impactos na sustentabilidade urbana; Oliveira (2021), que discute a mobilidade urbana sustentável e os benefícios para a qualidade de vida dos cidadãos; Yasin *et al*. (2023), que abordam a integração dos princípios do Novo Urbanismo no contexto das Cidades Lentas; Banister (2008), que examina a importância da caminhabilidade e da diversidade de usos do solo para a mobilidade sustentável; e Şengür & Atabeyoğlu (2018), que analisam a implementação das políticas de acessibilidade urbana em diferentes contextos.

A pesquisa busca responder como as práticas das Cidades Lentas contribuem para a mobilidade e acessibilidade urbanas, tendo como hipótese que as práticas implementadas promovem a sustentabilidade urbana e podem ser replicadas em outras cidades brasileiras. O objetivo geral é analisar as contribuições das Cidades Lentas para a mobilidade e acessibilidade urbanas sustentáveis, examinando suas políticas públicas, planos de mobilidade e características urbanas.

2. METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa, estruturada em duas estratégias metodológicas complementares: a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida segundo o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses), e a análise documental de políticas públicas, normas técnicas e legislações do município de Socorro (SP).

A RSL teve como objetivo identificar produções científicas que abordassem os conceitos de Cidades Lentas, mobilidade urbana sustentável e acessibilidade. As buscas foram realizadas nas bases Scopus e Google Acadêmico, utilizando palavras-chave em português e inglês, como “Slow Cities”, “Cidades Lentas”, “sustainable urban mobility” e “acessibilidade urbana”, combinadas por operadores booleanos (AND e OR), com recorte temporal entre 2018 e 2025. A triagem envolveu leitura de títulos, resumos e textos completos. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, nove artigos científicos foram selecionados para compor a amostra final da RSL.

Como aporte teórico complementar, foram incorporados três textos fundamentais: Banister (2008), uma referência clássica sobre mobilidade sustentável; Fleury (2022), que analisa o urbanismo da lentidão e os bens comuns; e Legros e Madelin (2020), que discutem criticamente o crescimento urbano sob a ótica da *décroissance*. Apesar de não integrarem formalmente a revisão sistemática da literatura, especialmente por estarem redigidos em francês no caso dos dois últimos, esses trabalhos contribuem significativamente para o aprofundamento da base conceitual deste estudo.

A análise documental concentrou-se em instrumentos legais e técnicos de Socorro (SP), como o Plano Diretor Municipal (Lei nº 109/2006, complementado pela Lei nº 135/2024), o Plano de Mobilidade Urbana (2014), o Plano de Arborização Urbana (2023), pautado no plantio de árvores ao longo das vias públicas, além de decretos e publicações institucionais. Também foram considerados os referenciais normativos da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), com destaque para a NBR 9050:2020, relativa à acessibilidade, e a NBR 16537:2016, que trata da mobilidade urbana.

A triangulação entre RSL e análise documental permitiu articular o referencial teórico com a realidade empírica de Socorro, proporcionando uma reflexão aprofundada sobre os desafios e as potencialidades da implementação dos princípios do movimento Cittaslow em cidades brasileiras de pequeno porte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conceito de Cidades Lentas promove uma urbanização mais humanizada e sustentável, com ênfase em mobilidade e acessibilidade. As cidades lentas estão distribuídas globalmente, com exemplos de sucesso em diversos continentes. A RSL mostra que essas cidades implementam políticas que favorecem a sustentabilidade

urbana, mas também enfrentam desafios.

Zadęcka (2018) discute os desafios do planejamento urbano e rural, enfatizando como as Cidades Lentas podem enfrentar esses desafios, especialmente em cidades pequenas. Outro estudo (Stanowicka *et al*., 2023) afirma que as autoridades municipais e as empresas desenvolvem várias atividades para maximizar a vantagem competitiva de suas cidades, considerando seu desenvolvimento sustentável. Para atingir esse objetivo, buscam diversas oportunidades através da cooperação entre cidades, sendo a adesão à rede internacional Cittaslow um exemplo de cooperação entre pequenas cidades.

Monteiro *et al*. (2024) analisam os desafios da transformação urbana nas cidades lentas, destacando as dificuldades enfrentadas durante a implementação dessas práticas. Oliveira (2021) examina o planejamento urbano sustentável no contexto das cidades lentas, abordando estratégias específicas para alcançar a sustentabilidade urbana.

O turismo tem uma enorme capacidade de gerar crescimento econômico e dinamizar o mercado de trabalho, sendo um de seus principais desafios atuais contribuir para o desenvolvimento sustentável (Yasin *et al*., 2023). A filosofia slow promove o turismo slow como uma forma de vida e consumo responsável e sustentável, adotada pela rede Cittaslow na Espanha (Maroto-Martos *et al*., 2023). No contexto das Cidades Lentas, o turismo sustentável está intimamente ligado à mobilidade urbana, com a utilização de modos de transporte ativos como caminhabilidade, ciclismo e outros transportes sustentáveis.

Na Espanha, as Cidades Lentas focam em estratégias de turismo sustentável que integram preservação ambiental e cultural com melhorias na mobilidade urbana e turística. A promoção de modos de transporte ativos, como caminhada e ciclismo, tem um impacto positivo na qualidade de vida dos moradores e atrai turistas interessados em experiências sustentáveis (Maroto-Martos *et al*., 2023).

Na Polônia, a cooperação entre cidades na rede Cittaslow promove o desenvolvimento sustentável através de políticas integradas de transporte público e incentivo ao uso de modos de transporte não motorizados. A ênfase no transporte coletivo de vizinhança melhora a mobilidade urbana e a acessibilidade, proporcionando benefícios ambientais e sociais significativos (Stanowicka *et al*., 2023).

Na Turquia, a rede de Cidades Lentas implementa inovações em mobilidade urbana sustentável, como infraestrutura cicloviária, zonas de pedestres e áreas de baixa velocidade. As políticas de baixa emissão e incentivo ao uso de veículos elétricos promovem o transporte sustentável e reduzem o impacto ambiental (Şengür & Atabeyoğlu, 2018).

4. CONTRIBUIÇÕES DO MUNICÍPIO DE SOCORRO

Socorro, localizada na Serra da Mantiqueira, possui uma área de 449,029 km² e uma população de 40.122 pessoas (IBGE, 2022). Integrando o Circuito Paulista das Águas, a cidade tem no turismo de patrimônio histórico e ambiental uma de suas maiores rendas. A morfologia urbana de Socorro combina traçados espontâneos, adaptados à topografia montanhosa, com uma tendência maior à ortogonalidade dos quarteirões e vias. O centro histórico apresenta ruas estreitas e íngremes, características do seu desenvolvimento inicial oitocentista, enquanto as expansões urbanas seguem um padrão radial e linear, com quadras regulares.

A cidade implementou várias políticas que promovem a mobilidade urbana sustentável e a acessibilidade, incluindo o Plano Municipal de Mobilidade Urbana e o Plano Municipal de Arborização. O Plano Diretor do Município de Socorro, estabelecido pela Lei nº 109/2006 (complementado pela Lei nº 135/2024), dispõe sobre diretrizes de desenvolvimento sustentável que harmonizam atividades econômicas com a qualidade de vida e a preservação ambiental (Socorro, 2006, 2024).

O Plano Municipal de Mobilidade Urbana é um exemplo das políticas implementadas. Este plano inclui infraestrutura para mobilidade sustentável, como ciclofaixas, ciclovias e calçadas acessíveis para promover transporte seguro e eficiente no dia a dia. A cidade incentiva o transporte ativo através de campanhas educativas e programas de compartilhamento de bicicletas, aumentando a mobilidade cicloviária e a caminhabilidade. O

transporte de vizinhança e a integração modal são combinados, utilizando bicicletas, ônibus e caminhadas para reduzir a dependência de transporte automotivo individual.

A acessibilidade universal é garantida por meio de infraestruturas adaptadas que seguem a NBR 9050, especialmente para pessoas com deficiência e pessoas idosas. Parques verdes e espaços públicos de qualidade são promovidos para a educação inclusiva e engajamento comunitário, com programas educativos e ações de mobilidade sustentável. Estratégias para reduzir a velocidade de veículos motorizados, sobretudo motocicletas, são implementadas visando a segurança de pedestres e ciclistas. Além disso, o transporte turístico sustentável é incentivado através do uso de veículos elétricos para reduzir emissões.

O Plano Municipal de Arborização de Socorro destaca-se pela atenção dada à arborização de vias e ruas. Esse plano visa melhorar a qualidade de vida dos habitantes, promovendo sombra e conforto térmico, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental (Socorro, 2024).

A hierarquia viária de Socorro, evidenciada na planta urbana, revela a coexistência de vias expressas, arteriais e coletoras com o traçado orgânico do centro histórico. Essa configuração impõe desafios para compatibilizar o tráfego regional de alta velocidade com a caminhabilidade, a acessibilidade e os modos ativos de transporte, mas também abre oportunidades para integrar os princípios das Cidades Lentas à gestão da mobilidade local.



Figura 1: Hierarquia viária do município de Socorro (SP). Fonte: Socorro (2024).

Ainda que haja convergência entre os planos municipais e os princípios das Cidades Lentas, observa-se um distanciamento entre o discurso normativo e as ações concretas. Essa tensão reforça a leitura proposta por Fleury (2022), que entende o "urbanismo da lentidão" como uma prática política e coletiva, voltada à construção do comum. Para Legros e Madelin (2020), tal desalinhamento evidencia a dificuldade estrutural de compatibilizar os paradigmas da desaceleração urbana com a racionalidade desenvolvimentista ainda predominante.

Apesar desses limites, as políticas adotadas em Socorro indicam esforços relevantes de aproximação com os valores do movimento *Cittaslow*, especialmente no que se refere à promoção da mobilidade e acessibilidade urbanas sustentáveis**,** bem como à preservação ambiental. A experiência da cidade, embora marcada por

tensões e contradições, contribui para refletir sobre a importância de políticas públicas integradas como caminho possível para a promoção do desenvolvimento urbano sustentável em municípios de pequeno porte.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões indicam que o paradigma das Cidades Lentas pode ser uma abordagem eficaz para promover a sustentabilidade urbana, alinhando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. A implementação de infraestrutura para mobilidade sustentável, incentivo ao transporte ativo, integração modal e acessibilidade universal são elementos centrais que mostram como Socorro está alinhada aos preceitos das Cidades Lentas e aos ODS. As políticas de arborização urbana também destacam o compromisso da cidade com o conforto térmico e a sustentabilidade ambiental.

Futuras pesquisas poderiam explorar a aplicação dessas práticas em diferentes contextos urbanos, ampliando a compreensão sobre os benefícios e desafios das Cidades Lentas, enfatizando, por exemplo, a questão do transporte sustentável em cidades turísticas interioranas. A experiência de Socorro pode servir de inspiração para outras cidades brasileiras de mesmo porte que buscam um desenvolvimento urbano mais sustentável, promovendo práticas que não apenas melhorem a qualidade de vida dos moradores, mas também atraiam turismo sustentável e preservem o meio ambiente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, *15*(2), 73–80. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005

Çiçek, M., Ulu, S., & Uslay, C. (2019). The Impact of the Slow City Movement on Place Authenticity, Entrepreneurial Opportunity, and Economic Development. *Journal of Macromarketing*, *39*(4), 400–414. https://doi.org/10.1177/0276146719882767

Cittaslow International (2024) Network: Socorro. Disponível em: https://www.cittaslow.org/network/socorro

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados: São Paulo. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-paulo.html

Fleury, L. (2022) Lenteur, Slow et commons : Vers un urbanisme des communs. Revue Française des Méthodes Visuelles, n. 10. Disponível em: https://rfmv.fr/index.php/RFMV/article/view/207 (acesso em 01/07/2025).

Legros, J.-B. e M. Madelin (2020) Le mot décroissance : un mot de critique urbaine. Métropolitiques, 24 nov. Disponível em: https://metropolitiques.eu/Le-mot-decroissance-un-mot-de-critique-urbaine.html (acesso em 01/07/2025).

Maroto-Martos, J.-C., Pinos-Navarrete, A., & Carballo-Cruz, E. (2023). Estrategias de Turismo Sostenible en las Cittaslow Españolas. *Anduli*, *24*, 1–25. https://doi.org/10.12795/anduli.2023.i24.01

Monteiro, J., Sousa, N., Coutinho-Rodrigues, J., & Natividade-Jesus, E. (2024). Challenges Ahead for Sustainable Cities: An Urban Form and Transport System Review. *Energies*, *17*, 409. https://doi.org/10.3390/en17020409

Oliveira, E. E. D. (2021). Slow Cities: Uma experiência da contemporaneidade. *Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo (Online)*, *19*, 1–9. https://doi.org/10.11606/1984-4506.risco.2021.153236

Şengür, Ş., & Atabeyoğlu, Ö. (2018). Slow City Movement: A Case Study Cittaslow Perşembe-Ordu. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, *4*(1), Artigo 1. https://dergipark.org.tr/tr/pub/kastamonujes/issue/41743/440599

Soares, M. (2018) A velocidade das cidades lentas. Revista e-metropolis, n. 34, p. 15–25.

Socorro (2006) Lei Complementar nº 109/2006. Plano Diretor do Município de Socorro, SP.

Socorro (2022a) Onde é bom viver! Socorro torna-se a primeira Cittaslow do Brasil. Disponível em: https://www.socorro.sp.gov.br/noticias/onde-e-bom-viver-socorro-torna-se-a-primeira-cittaslow-do-brasil

Socorro (2022b) Prefeitura de Socorro realiza evento de apresentação da certificação Cittaslow. Disponível em: https://www.socorro.sp.gov.br/noticias/prefeitura-de-socorro-realiza-evento-de-apresentacao-da-certificacao-cittaslow

Socorro (2023) Decreto 1.102/2023. Plano Municipal de Arborização Urbana de Socorro, SP.

Socorro (2024) Lei Complementar nº ‘135/2024. Plano Municipal de Mobilidade Urbana de Socorro, SP.

Stanowicka, A., Kobylińska, M., & Wichowska, A. (2023). Awareness of the Cittaslow Brand among Polish Urban Dwellers and Its Impact on the Sustainable Development of Cities. *Sustainability*, *15*(10), Artigo 10. https://doi.org/10.3390/su15107799

United Nations (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Disponível em:

https://sdgs.un.org/2030agenda
Yasin, S., Cemile, B. K., & Koray, G. (2023). Slow City and Tourism Coexistence. *Journal of Geography*, *0*(47), Artigo 47. https://doi.org/10.26650/JGEOG2023-1264642
Zadęcka, E. (2018). ”Slow City” as a Local Development Model. *Economic and Regional Studies / Studia Ekonomiczne i Regionalne*, *11*, 84–106. https://doi.org/10.2478/ers-2018-0027

Suettinni Jean (suettinni.lima@ufpe.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Av. da Arquitetura, s/n – Recife, PE, Brasil.
Anísio Brasileiro (anisio.brasileiro@ufpe.br)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Av. da Arquitetura, s/n – Recife, PE, Brasil.

O TRATAMENTO DOS CENTROS HISTÓRICOS NOS PLANOS DE MOBILIDADE URBANA: UM ESTUDO EM ALGUMAS CAPITAIS BRASILEIRAS

Cleber Veras Pacheco da Silva[1], **Yara Cristina Labronici Baiardi**[1], **Leonardo Herszon Meira**[1]
[1]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

RESUMO
A mobilidade urbana, quando articulada à preservação patrimonial, pode desempenhar um papel estratégico na requalificação de centros históricos, que são territórios sensíveis e negligenciados no planejamento urbano. Logo, este artigo analisa como os Planos de Mobilidade Urbana das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador e Recife consideram essas áreas em seus instrumentos oficiais. A metodologia adotada foi uma análise documental dos planos e dos documentos complementares. Os resultados mostram que Recife e Salvador citam diretamente os centros históricos e apresentam diretrizes específicas, com foco na mobilidade ativa e na redução do transporte individual. Entretanto, São Paulo e Rio de Janeiro se limitam a referências genéricas, sem tratamento diferenciado. Portanto, apesar de avanços pontuais, é possível dizer que nas cidades analisadas ainda há baixa integração entre políticas de mobilidade e preservação, comprometendo a efetividade das ações voltadas à revitalização de seus centros históricos urbanos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade sustentável tem sido abordada na literatura como um elemento-chave na estruturação urbana e na redefinição das dinâmicas sociais e territoriais. Segundo Banister (2008), o planejamento urbano deve ser pensado de forma integrada com a mobilidade, impactando na organização espacial e funcional das cidades, especialmente quando articulada ao uso do solo. Na prática, entretanto, essa integração nem sempre ocorre de maneira eficaz. Jahangir *et al.* (2024) afirmam que embora muitos projetos de infraestrutura de transporte tenham sido implementados para atender às demandas da urbanização, esses novos sistemas frequentemente beneficiam os grupos de maior renda, reforçando disparidades de acesso e as desigualdades urbanas.

Nesse contexto, Yu *et al.* (2025) reafirmam que houve uma mudança no paradigma do transporte, que pensar a mobilidade de forma integrada, de fato, transforma a estrutura espacial da cidade, favorecendo novas centralidades e modos de acesso. É nesse cenário que os Planos de Mobilidade Urbana (PlanMob) ganham destaque como instrumentos estruturantes, voltados ao planejamento dos sistemas de transporte, influenciando na qualificação dos espaços urbanos (Damidavičius *et al.*, 2019). No Brasil, o planejamento da mobilidade urbana é orientado pela Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída por meio da Lei Federal nº. 12.587 (Brasil, 2012), que estabelece princípios como acessibilidade, eficiência e integração entre transporte e uso do solo. Portanto, a Lei busca enfrentar desafios históricos da mobilidade, como a falta de planejamento viário e o domínio do transporte individual motorizado (Lourenço *et al.*, 2019).

Todavia, na relação entre mobilidade e estruturação urbana, alguns territórios demandam um tratamento diferenciado, que é o caso dos centros de cidades que possuem espaços históricos, que é o núcleo urbano original, onde se deu o desenvolvimento inicial da cidade. Conforme dito por Machado e Piccinini (2017), o automóvel transformou a paisagem urbana, então os centros, que foram pensados para o deslocamento a pé com presença de muitas ruas estreitas, tornaram-se inadequados na era do automóvel, contribuindo para o esvaziamento desses espaços. E segundo ElSerafi (2025), embora sejam locais com valor simbólico, cultural e patrimonial, o processo de urbanização é desafiador, porque é preciso equilibrar a modernização com a preservação do patrimônio. A mobilidade, nesse sentido, pode atuar como agente de mudança na regeneração urbana, reforçando conectividade, acessibilidade e coesão das cidades (Reyes-Schade *et al.*, 2024).

Apesar disso, a maioria das cidades brasileiras que possuem um centro com patrimônio histórico, a mobilidade e a acessibilidade urbana permanecem sem soluções adequadas (Ribeiro, 2014). Mesmo sendo territórios complexos, Silva (2021) destaca que os centros históricos raramente têm diretrizes específicas nos planos, revelando sua invisibilidade institucional. Diante desse cenário, é preciso avaliar como essas áreas são tratadas pelas políticas de mobilidade. Logo, o artigo tem como objetivo analisar os planos de mobilidade urbana das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador e Recife, a fim de verificar se os centros históricos dessas capitais são reconhecidos como territórios distintos no planejamento e se foram contemplados por diretrizes específicas de mobilidade. Busca-se identificar padrões, omissões e seus efeitos no planejamento urbano, contribuindo para o debate sobre a integração entre mobilidade e preservação patrimonial.

2. METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo definido, foi adotada uma abordagem de análise documental qualitativa, no qual a coleta dos documentos foi realizada diretamente em portais oficiais das prefeituras ou órgãos municipais de transporte e mobilidade. Para a análise de conteúdo, foram estabelecidas categorias para sistematizar os dados. A princípio, o Reconhecimento Institucional, por meio da verificação de menções diretas aos termos 'centro histórico', 'centro antigo' ou termos que remetem a esses territórios na legislação principal do plano; em seguida, o Tratamento em Documentos Complementares, identificando referências a essas áreas nos diagnósticos, relatórios e produtos dos planos; e por fim, a Especificidade das Diretrizes, realizando um levantamento de propostas e ações de mobilidade voltadas para os desafios dos centros históricos.

A escolha das quatro cidades baseou-se em critérios que combinam relevância nacional, diversidade regional e importância histórica. São Paulo foi incluída por ser a maior metrópole do país, com um centro histórico denso e culturalmente significativo, abrangendo os distritos da República e Sé (São Paulo, 2022). O Rio de Janeiro, por sua vez, por ser a antiga capital federal, reúne um núcleo histórico expressivo e institucional, sua área central abrange a Região Portuária e o bairro do Centro, que se desdobra em diversas subáreas de grande importância cultural e econômica (Rio de Janeiro, 2021). No recorte regional, Salvador foi incluída por ter sido a primeira capital do Brasil, com um centro histórico tombado pela UNESCO e formada por um conjunto de onze bairros que constituem o chamado Centro Antigo (Bahia, 2010). Por fim, Recife, por ser a capital estadual mais antiga do país e por sua relevância na região Nordeste, tendo seu centro, que compreende o núcleo histórico, delimitado por sete bairros (Recife, 2025).

Logo, a análise buscou identificar e compreender menções, diretas ou indiretas, aos centros históricos nos planos de mobilidade urbana. E posteriormente, organizar os dados coletados em uma tabela comparativa de modo que permita visualizar convergências, omissões e especificidades de cada plano em relação ao tratamento dado a esses espaços. Embora outras políticas urbanas eventualmente tratem da mobilidade em centros históricos, este estudo se restringe à análise dos Planos de Mobilidade Urbana e seus produtos, por serem os documentos específicos voltados ao planejamento da mobilidade. Essa delimitação busca assegurar coerência metodológica e permitir a comparação entre os casos com base em um mesmo tipo de instrumento.

3. RESULTADOS

A análise revelou diferenças na forma como os centros históricos são tratados nos planos de mobilidade das quatro cidades. Recife e Salvador apresentam instruções específicas a essas áreas e as outras as mencionam apenas de forma indireta. Evidenciando a falta de reconhecimento institucional das demandas de mobilidade próprias desses territórios. A seguir, a Tabela 1 sintetiza os achados por cidade, considerando o número de menções, seus contextos e a presença ou ausência de diretrizes para a mobilidade nos centros históricos.

Tabela 1: Tratamento dos centros históricos nos planos de mobilidade urbana das cidades analisadas

Cidade	Decreto / lei do Plano	Nº de menções no decreto / lei	Menções em produtos do Plano	Diretrizes específicas	Contexto das menções	Observações relevantes
São Paulo	56.834/ 2016	0	Sim	Não	Criação de linhas de reforço de ônibus para o centro histórico e menções indiretas como centro da cidade.	Embora citado no livro -síntese e mencione o Plano Diretor no decreto, que trata sobre o centro e mobilidade, o PlanMob, não trata o centro histórico como território específico.
Rio de Janeiro	45.781/ 2019	0	Sim	Não	Caracterização da área; Ampliação do transporte público e Programa de sinalização para pedestres.	Citação na etapa do diagnóstico, no livro-síntese e no CicloRio (produto). Mas não trata o centro histórico como território específico, apenas como região central.
Salvador	9.374/ 2018	0	Sim	Sim	Pedágio Urbano; Pedestrianização; Redução do	Embora não seja citado na lei, há menções no livro -síntese e nos relatórios.

					transporte individual e estacionamento.	Cita que o centro histórico terá um plano específico.
Recife	18.887/ 2021	5	Sim	Sim	Infraestrutura para pedestres e ciclistas; Pedágio Urbano; Estímulo à moradia e Logística.	Citado também na etapa do diagnóstico do Plano e no produto, chamado Manual de Desenho de Ruas do Recife (MDRR).

No caso da cidade de São Paulo, não há qualquer menção direta ao centro histórico no Decreto Municipal nº. 56.834/2016, que instituiu o Plano Municipal de Mobilidade Urbana (São Paulo, 2016). Entretanto, o livro-síntese do plano (São Paulo, 2015) apresenta algumas referências ao centro histórico, no contexto de oferta do transporte coletivo, ao destacar a necessidade de linhas de reforço de ônibus com destino a essas áreas. Além disso, há menções indiretas na caracterização da área e nas análises de fluxos e acessibilidade, não se referindo especificamente ao centro histórico, e sim à região central da cidade, por meio dos termos “centro” ou “centro da cidade”, que incluem essa região histórica. Embora cite o Plano Diretor (São Paulo, 2014), que aborda o centro histórico e a mobilidade, vale destacar que, conforme já mencionado, o foco deste artigo é a presença de diretrizes nos planos de mobilidade, e não em instrumentos urbanísticos mais amplos.

Da mesma forma, ao instituir o Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS-Rio) por meio do Decreto Municipal nº. 45.781/2019, o município do Rio de Janeiro também não apresenta qualquer menção direta ao centro histórico (Rio de Janeiro, 2019). Nos documentos complementares e nos produtos associados ao plano, como o relatório-síntese (Rio de Janeiro, 2025), o relatório da etapa de diagnóstico (Rio de Janeiro, 2016) e o Plano de Expansão Cicloviária (Rio de Janeiro, 2022), que é um desdobramento do PMUS, as referências ao centro histórico se restringem a menções indiretas, uma vez que são usadas expressões como "Centro da cidade" ou "área central" e a área histórica do município encontra-se nesta região. Essas menções aparecem em seções sobre caracterização urbana, transporte público e sinalização para pedestres, mas sem reconhecer o centro histórico como território que demande tratamento específico na mobilidade.

Ao analisar o Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Salvador, instituído pela Lei Municipal nº. 9.374/2018 (Salvador, 2018), que, embora não traga menções diretas ao Centro histórico ou Centro antigo em seu texto, apresenta no livro-síntese (Salvador, 2018) e nos relatórios de propostas e consolidação do plano (Salvador, 2017; Salvador, 2018) referências relevantes a esse território. As propostas incluem ações como a implementação de pedágio urbano e reestruturação do programa de estacionamento, a fim de reduzir o fluxo de veículos individuais e internalizar os custos da infraestrutura ociosa. Também há propostas de pedestrianização em trechos do centro, visando qualificar o ambiente urbano e valorizar sua função social. Além disso, o documento faz menção ao programa Salvador 360, que é específico para o centro histórico e estava em elaboração à época do PlanMob, por isso não foi internalizado nas diretrizes do plano.

Por fim, Recife, que instituiu o plano de mobilidade urbana por meio da Lei Municipal nº. 18.887/2021, é a única que menciona diretamente o centro histórico em seu texto (Recife, 2021). O documento prevê a criação de espaços para pedestres, melhorias na infraestrutura urbana e incentivos à instalação de Centros de Distribuição de Cargas, para reorganizar a logística urbana. Também são propostas ações de infraestrutura cicloviária em áreas mais comerciais, políticas de pedágio urbano para desestimular o uso de veículos individuais e estratégias para estimular a moradia no centro. Além da lei, o centro histórico também aparece em produtos do plano, como na segunda etapa do diagnóstico, chamada Mobilidade no Recife Hoje (Recife, 2016), por meio da caracterização territorial e no Manual de Desenho de Ruas do Recife (Recife, 2023), plano que propõe diretrizes atualizadas para projetos de mobilidade e incluem orientações para o redesenho e qualificação das ruas do centro histórico, com foco na valorização do pedestre e do patrimônio urbano.

A abordagem de São Paulo e do Rio de Janeiro, que se limita a termos genéricos como 'centro' ou 'área central', exemplifica a 'invisibilidade institucional' dos centros históricos apontada por Silva (2021). Em contraste, as propostas de Recife e Salvador, focadas na mobilidade ativa e na restrição ao transporte individual, alinham-se ao paradigma da mobilidade sustentável defendido por Banister (2008). Essas iniciativas reconhecem que a mobilidade pode atuar como um agente de regeneração urbana, utilizando instrumentos de planejamento para qualificar o espaço público e não apenas gerenciar fluxos de veículos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos Planos de Mobilidade evidenciou diferentes níveis de reconhecimento dos centros históricos como territórios com necessidades específicas no campo da mobilidade. Entretanto, a ausência de diretrizes próprias nos Planos Municipais de Mobilidade Urbana (PMMU) não significa que não há preocupação com a mobilidade em centros históricos. Em todas as cidades analisadas, há programas, em execução ou sendo elaborados, voltados a essas áreas que contemplam aspectos relacionados à mobilidade. Como o programa Salvador 360, Centro do Recife na Rota do Futuro, do programa Reviver Centro, no Rio de Janeiro, e do Projeto de Intervenção Urbana (PIU) do Setor Central de São Paulo, que propõem intervenções integradas.

No entanto, nem todos esses projetos estão articulados de forma sistêmica com os PMMU, o que reforça a lacuna identificada neste artigo, a desconexão entre os instrumentos setoriais e as iniciativas urbanas voltadas à preservação patrimonial. A desconexão identificada entre os Planos de Mobilidade e os projetos urbanos específicos para os centros históricos não é uma mera falha administrativa, mas um sintoma da fragmentação do planejamento urbano no Brasil. Essa lacuna reflete a dificuldade de superar um modelo de desenvolvimento urbano historicamente dominado pelo transporte individual motorizado e de integrar a preservação do patrimônio, muitas vezes vista como um entrave, às políticas setoriais. A falta de articulação entre as ações compromete a efetividade, causando sobreposição, dispersão de recursos e perda de oportunidades para requalificar esses espaços a partir de uma abordagem urbana integrada.

Com base nos resultados, recomenda-se que a revisão ou elaboração de futuros Planos de Mobilidade Urbana contemplem de forma explícita os centros históricos. Por fim, uma possível agenda futura de pesquisa consiste em aprofundar a análise dos projetos urbanos específicos voltados aos centros, identificando as propostas relacionadas à mobilidade presentes nesses instrumentos e avaliando o grau de articulação com os planos de mobilidade urbana. Contribuindo para um planejamento integrado, sensível ao patrimônio e capaz de promover requalificações que unam mobilidade e inclusão.

Agradecimentos

O presente artigo contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

Bahia (2010) *Centro Antigo de Salvador: Plano de Reabilitação Participativo*. Secretaria de Cultura; Instituto do Patrimônio Artístico e Cultural da Bahia; UNESCO. Salvador, BA. Disponível em: pt.scribd.com/document/94758657/Centro-Antigo-de-Salvador-Plano-de-Reabilitacao-Participativo (acesso em 06/06/2025).

Banister, D. (2008) The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, v. 15, n. 2, p. 73–80. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005.

Brasil (2012) Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm (acesso em 06/06/2025).

Damidavičius, J.; M, Burinskienė e R, Ušpalytė-Vitkūnienė (2019) A Monitoring System for Sustainable Urban Mobility Plans. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, v. 14, n. 2, p. 158–177. DOI: https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.438.

Elserafi, T. (2025) Integrating transit-oriented development in historic urban districts: Enhancing mobility and preservation in ElMosky, Cairo. *Civil Engineering and Architecture*, v. 13, n. 2, p. 1326–1346. DOI: https://doi.org/10.13189/cea.2025.130243.

Jahangir, S.; A, Bailey; M. M. U. Hasan e S, Hossain (2024) Inequalities in accessing public transportation and social exclusion among older adults and people with disabilities in Bangladesh: A scoping review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 26, p. 101138. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101138.

Lourenço, G. H.; A, Dal Bosco Júnior e M. A. P. Bernardinis (2019) Respostas à política nacional de mobilidade urbana: comparativo entre capitais dos incentivos ao transporte público e à bicicleta. *Transportes*, v. 27, n. 2, p. 1–16. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1413.

Machado, F. e L., Piccinini (2017) Medidas de mobilidade: estratégia de competição e gentrificação dos centros urbanos. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, v. 21, n. 563. DOI: https://doi.org/10.1344/sn2017.21.18576

Recife (2016) *Plano de Mobilidade Urbana do Recife - Mobilidade no Recife Hoje*. Secretaria de Planejamento Urbano, Recife, PE. Disponível em: cttu.recife.pe.gov.br/plano-de-mobilidade-urbana-do-recife (acesso em 13/06/2025).

Recife (2021) Lei nº 18.887, de 29 de dezembro de 2021. Institui a Política de Mobilidade Urbana do Recife – PMU. *Diário Oficial do Recife*, Recife, PE. Disponível em: http://leismunicipa.is/zodtu (acesso em 13/06/2025).

Recife (2023) *Manual de desenho de ruas do Recife*. Secretaria de Política Urbana e Licenciamento, Recife, PE. Disponível em: https://manuais.urbanismo.recife.pe.gov.br/manual-de-desenho-de-ruas/ (acesso em 13/06/2025).

Recife (2025) *Centro do Recife na Rota do Futuro: Plano Estratégico para a Área Central da Capital Mais Antiga do Brasil*. Secretaria de Política Urbana e Licenciamento. Recife, PE.

Reyes-Schade, E.; C. Grande-Ayala; A. Imam; A. M. Gbban; M. Summan; A. S. Karban; A. A. Majrashi e M. Alamoudi (2024) (Re)writing the city from within: An exploratory approach to sustainable urban morphologies from the dialogue between public space and public transport in Barcelona's Trambesòs. *Sustainability*, v. 16, n. 22, p. 9667. DOI: https://doi.org/10.3390/su16229667.

Ribeiro, S. B. (org.) (2014) *Mobilidade e acessibilidade urbana em centros históricos*. Brasília: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), 120 p. (Cadernos Técnicos; 9). ISBN 978-85-7334-253-6.

Rio de Janeiro (Município) (2016) *Resultados do produto 3: Diagnóstico*. Secretaria Municipal de Transportes, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: transportes.prefeitura.rio/planos_de_mobilidade/ (acesso em 10/06/2025).

Rio de Janeiro (Município) (2019) Decreto nº 45.781, de 10 de abril de 2019. Institui a Política de Mobilidade Urbana Sustentável e Integrada da Cidade do Rio de Janeiro – PMUSI-Rio. *Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: http://leismunicipa.is/0ds1i (acesso em 11/06/2025).

Rio de Janeiro (Município) (2021) *Plano de Requalificação do Centro do Rio de Janeiro*. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Licenciamento, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/12886446/4326001/PlanoRequalificacao.pdf (acesso em 02/07/2025).

Rio de Janeiro (Município) (2022) *Plano de Expansão Cicloviária – CicloRio*. Secretaria Municipal de Transportes, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: https://transportes.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/31/2022/07/ CicloRio-Plano-de-Expansa%CC%83o-Ciclovia%CC%81ria-transportes.pdf. (acesso em 11/06/2025).

Rio de Janeiro (Município) (2025) *Relatório Síntese: Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Cidade do Rio de Janeiro*. Secretaria Municipal de Transportes, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: https://transportes.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/31/2025/02/PRODUTO-7-RELATORIO-SINTESE.pdf (acesso em 11/06/2025).

Salvador (2017) *Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Salvador: Relatório Técnico RT11 – Resultados e Avaliação dos* . Secretaria Municipal de Mobilidade, Salvador, BA. Disponível em: https://planmob.salvador.ba.gov.br/images/consulte/planmob/RT11--Resultados-e-Avaliacao-dos-Cenarios-v2.pdf (acesso em 06/06/2025).

Salvador (2018) Lei nº 9.374, de 16 de janeiro de 2018. Institui a Política Municipal de Mobilidade Urbana Sustentável – PMOB Salvador. *Diário Oficial do Município de Salvador*, Salvador, BA. Disponível em: http://leismunicipa.is/lmwin (acesso em 07/06/2025).

Salvador (2018) *PlanMob – Livro Síntese: Plano de Mobilidade Urbana Sustentável.* Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana, Salvador, BA. Disponível em: https://planmob.salvador.ba.gov.br/ (acesso em 07/06/2025).

Salvador (2018) *Plano de Mobilidade Urbana Sustentável de Salvador – PlanMob Salvador: Relatório Técnico RT14 – Tomo I.* Secretaria Municipal de Mobilidade, Salvador, BA. Disponível em: https://planmob.salvador.ba.gov.br/images/consulte/planmob/1_RT_14-PlanMob_SSA-TOMO_I.pdf (acesso em 06/06/2025).

São Paulo (Município) (2014) Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014. Aprova o Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo. *Diário Oficial da Cidade de São Paulo*, São Paulo, SP. Disponível em: https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16050-de-31-de-julho-de-2014 (acesso em 09/06/2025).

São Paulo (Município) (2015) *PlanMob/SP 2015: Plano de Mobilidade Urbana do Município de São Paulo*. Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana e Transporte, São Paulo, SP. Disponível em: www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/planmobsp_v072__1455546429.pdf (acesso em 08/06/2025).

São Paulo (Município) (2016) Decreto nº 56.834, de 24 de fevereiro de 2016**.** Institui o Plano Municipal de Mobilidade Urbana de São Paulo – PlanMob/SP 2015. *Diário Oficial da Cidade de São Paulo*, São Paulo, SP. Disponível em: legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/decreto-56834-de-24-de-fevereiro-de-2016 (acesso em 09/06/2025).

São Paulo (Município) (2022) Lei nº 17.844, de 14 de setembro de 2022. Aprova o Projeto de Intervenção Urbana Setor Central – PIU-SCE. *Diário Oficial da Cidade de São Paulo*, São Paulo, SP. Disponível em: legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-17844-de-14-de-setembro-de-2022 (acesso em 01/07/2025).

Silva, L. S. P. M. (2021) *Acessibilidade em sítios históricos urbanos: a contribuição da sinalização para orientação espacial*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Bahia, Salvador. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/35890/1/Tese_Larissa%20Scarano.pdf (acesso em 06/06/2025).

Yu, Y.; D, Li; B, Han; Q, Zhang; Y, Huang e R, Yang (2025) Enhancing urban mobility: A multi-modal travel plan recommendation framework integrating the influences of temporal characteristics and candidate sets. *Information Sciences*, v. 709, p. 122042. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122042.

Cleber Veras Pacheco da Silva (cleber.pacheco@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
Yara Cristina Labronici Baiardi (yara.baiardi@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Arquitetura e Urbanismo.
Leonardo Herszon Meira (leonardo.meira@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

PERCEPÇÕES DE ESPECIALISTAS DA ÁREA DA SAÚDE SOBRE OS EFEITOS DOS DESLOCAMENTOS PROLONGADOS NO TRÂNSITO

Nicholas Miralhes de Freitas[1], **Ana Carolina de Barros Pamplona**[1], **Larissa Rodrigues Turini**[1], **Joyce Azevedo Caetano**[1], **Eunice Horácio de Souza de Barros Teixeira Rodrigues**[2], **Cintia Machado de Oliveira**[2], **Glaydston Mattos Ribeiro**[1]

[1] Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), [2] Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ)

RESUMO

Este artigo analisa os impactos dos longos deslocamentos e tempos de viagem no trânsito e transporte sobre a saúde física e mental da população da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, com base na percepção de especialistas da área da saúde. Foram coletadas 34 respostas por meio de questionário digital, entre 24 de setembro e 5 de outubro de 2024, contemplando profissionais de Medicina, Enfermagem, Psicologia e Fisioterapia. Os resultados indicam forte associação entre deslocamentos prolongados e sintomas como estresse, ansiedade, dores musculares, fadiga e queda na produtividade. A maioria dos especialistas aponta a ausência de estratégias institucionais para mitigar esses efeitos e destaca a importância de trajetos mais curtos, entre 15 e 30 minutos. Os achados reforçam a necessidade de políticas públicas que integrem mobilidade urbana e saúde, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, promovendo bem-estar e qualidade de vida nas grandes cidades.

1. INTRODUÇÃO

O tempo de deslocamento urbano é uma variável central na qualidade de vida nas grandes cidades, influenciando diretamente a saúde física e mental, a produtividade e a gestão do tempo cotidiano. Em centros urbanos com mais de 60 mil habitantes, estima-se que sejam consumidas anualmente mais de 30 bilhões de horas em deslocamentos, com impacto significativo sobre os usuários de transporte público, especialmente em horários de pico, quando o tempo no trânsito pode aumentar em até 90% (ANTP, 2020; CNT, 2024). A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), marcada por desigualdades territoriais e dependência estrutural do modo rodoviário, apresenta um cenário crítico, em que o ônibus é o principal meio de transporte coletivo, mas enfrenta sérios desafios de eficiência, conforto e integração modal (Semove, 2024).

Nesse contexto, os efeitos do tempo excessivo em deslocamento sobre a saúde vêm ganhando atenção no debate sobre mobilidade urbana sustentável. A exposição prolongada ao trânsito pode agravar quadros de estresse, ansiedade, distúrbios musculoesqueléticos e fadiga crônica, afetando a produtividade no trabalho, a qualidade do sono, a convivência familiar e o bem-estar geral. Tais impactos reforçam a urgência de políticas públicas que considerem a mobilidade urbana como determinante social da saúde. Alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), este estudo dialoga com o ODS 3 (saúde e bem-estar), o ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico) e o ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis), ao investigar a relação entre transporte, saúde e produtividade em um dos principais aglomerados urbanos do país.

Este artigo analisa, com base em dados primários coletados por meio de entrevistas com especialistas da área da saúde, as percepções clínicas sobre os efeitos do tempo de deslocamento no trânsito e transporte sobre a saúde da população da RMRJ. O estudo busca identificar sintomas físicos e emocionais associados ao deslocamento prolongado, compreender suas implicações sobre o desempenho profissional e acadêmico e contribuir com recomendações para políticas públicas integradas que priorizem trajetos mais curtos, acessíveis e menos exaustivos. Ao centrar a análise nas experiências de quem atua diretamente com a saúde da população, o trabalho oferece subsídios relevantes para o planejamento urbano e para a gestão de sistemas de transporte mais humanos e resilientes.

2. METODOLOGIA

A pesquisa com profissionais da área da saúde teve como objetivo identificar as percepções desses especialistas sobre os efeitos dos longos deslocamentos no trânsito e transporte na saúde física e mental dos indivíduos. Buscou-se compreender, a partir da experiência clínica dos respondentes, como essas externalidades impactam o bem-estar e a qualidade de vida da população urbana. Para isso, foram convidados profissionais das áreas de Psicologia, Psiquiatria, Terapia Ocupacional, Fisioterapia, Medicina e Enfermagem, com a possibilidade de os participantes indicarem outras especialidades relacionadas.

O instrumento utilizado foi um questionário estruturado, disponibilizado em formato digital entre os dias 24 de setembro e 5 de outubro de 2024. O formulário foi dividido em dois blocos: o primeiro coletou informações sobre o perfil profissional dos respondentes, como área de atuação, tempo de experiência, modalidade de atendimento (presencial, remoto ou híbrida) e vínculo com as redes pública e/ou privada. O segundo bloco apresentou questões sobre os impactos percebidos dos deslocamentos prolongados, sendo segmentado entre especialistas em saúde mental e em saúde física para possibilitar análises específicas e comparativas.

A pesquisa contou com a participação de 34 profissionais. Os dados quantitativos foram analisados por meio de estatísticas descritivas (frequências e percentuais), e as informações qualitativas, extraídas de respostas abertas, foram organizadas com base em categorias temáticas. Essa abordagem permitiu identificar padrões de percepção entre os especialistas, além de destacar recomendações práticas e lacunas na atuação profissional diante dos efeitos da mobilidade urbana sobre a saúde da população.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os principais achados da pesquisa realizada com especialistas das áreas de saúde física e mental com o objetivo de compreender os impactos dos longos deslocamentos no trânsito sobre a saúde física, mental e a qualidade de vida dos indivíduos.

A pesquisa contou com a participação de especialistas das áreas de Medicina (38,24%), Enfermagem (32,35%), Psicologia (23,53%) e Fisioterapia (5,88%), com ampla diversidade de atuação, incluindo áreas como saúde do trabalhador, urgência e emergência, fisioterapia respiratória e psicologia clínica. A maioria (67,62%) tem mais de 10 anos de experiência profissional, conforme mostra a Figura 1.

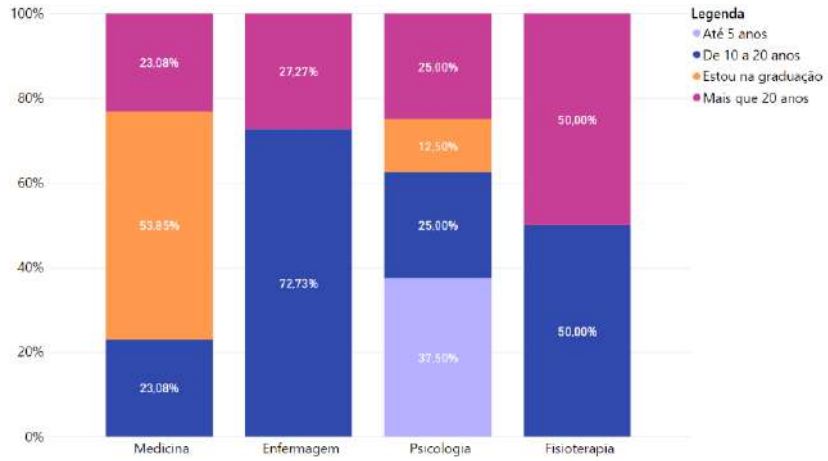


Figura 1: Perfil dos especialistas conforme área e tempo de atuação. Fonte: Elaboração própria.

A maior parte atua presencialmente, principalmente nos municípios do Rio de Janeiro, Niterói, Duque de Caxias, Mesquita e Nova Iguaçu. Quanto à rede de atendimento, 58,06% atuam no setor público, 22,58% no privado e 19,35% em ambos.

3.1. Pesquisa com os Especialistas da Área da Saúde Mental

Os especialistas em saúde mental (psicólogos) identificaram fortes vínculos entre longos deslocamentos e o agravamento de transtornos como ansiedade, estresse e depressão, além de sintomas como desânimo, cansaço extremo, irritabilidade e esgotamento emocional. O tempo excessivo no trânsito é associado à perda de produtividade, sensação de tempo desperdiçado e impacto no envolvimento com atividades pessoais. Todos os profissionais da área concordaram que há prejuízo à qualidade do sono, especialmente pela dificuldade em manter rotinas regulares de descanso.

Esses deslocamentos prolongados geram sobrecarga emocional e física, alimentando um ciclo de estresse contínuo. Os entrevistados destacaram que o acúmulo de fadiga, associado à limitação de tempo para lazer, descanso e convívio familiar, afeta diretamente o bem-estar. Em alguns casos, foram observados efeitos como tristeza, dificuldades de concentração e queda de entusiasmo com a vida cotidiana.

Cerca de 62,5% dos especialistas já recomendaram mudanças nos hábitos de transporte, para evitar o trânsito, como trabalhos híbridos, alterações de rota, inserção de pequenas atividades de lazer durante o trajeto e prática regular de exercícios físicos. Entretanto, muitos relataram limitações estruturais para mudanças mais profundas. Além disso, 75% apontam que o tempo gasto no trânsito afeta diretamente a produtividade e o desempenho profissional e acadêmico, especialmente por gerar cansaço, desmotivação e dificuldades de concentração. A rotina de acordar cedo e enfrentar jornadas desgastantes impacta negativamente a autoestima e o rendimento nas atividades diárias.

Questões de segurança pública também foram abordadas: 35,29% dos especialistas relataram impactos emocionais e psicológicos relacionados à insegurança, enquanto outros 35,29% mencionaram prejuízos na produtividade, e 23,53% apontaram danos à vida social e familiar. Essas percepções reforçam a ideia de que o ambiente urbano inseguro amplia os efeitos negativos do deslocamento prolongado sobre a saúde (Figura 2).

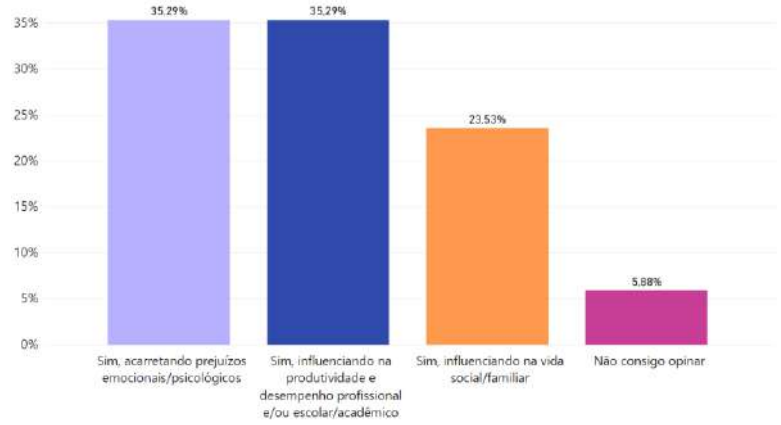


Figura 2: Os problemas de segurança pública encontrados no trânsito/transporte podem influenciar a qualidade de vida dos pacientes? Fonte: Elaboração própria.

3.2. Parecer dos Especialistas nas Áreas de Saúde Física

A pesquisa com profissionais de saúde das áreas de Medicina, Enfermagem e Fisioterapia buscou compreender como longos deslocamentos impactam a saúde física e a qualidade de vida dos pacientes. Os resultados revelam um consenso importante: 92,31% dos especialistas reconhecem que períodos prolongados no trânsito contribuem para o surgimento de condições como dores musculares, lombalgias e outros problemas físicos recorrentes (Figura 3).

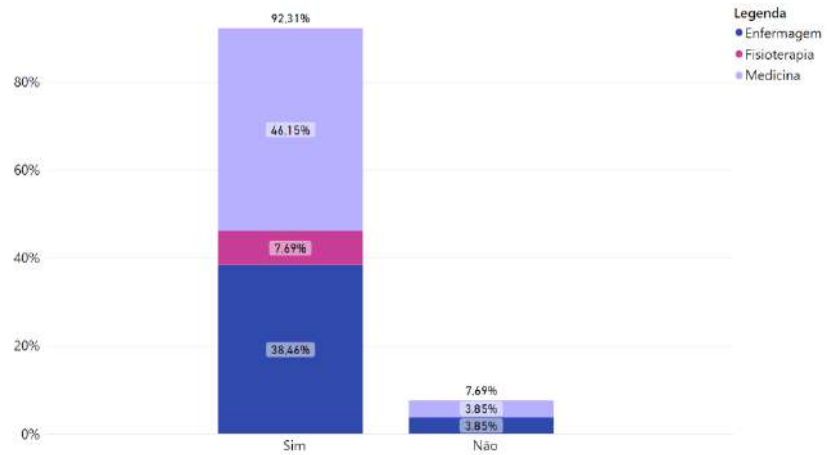


Figura 3: Observação de longos períodos no trânsito/ transporte como fator contribuinte para dores musculares, lombalgias ou outras condições de saúde nos pacientes. Fonte: Elaboração própria.

Entre os prejuízos relatados, destacam-se dores nas pernas, costas e articulações, cefaleias tensionais, tensões musculares, fadiga ocular e cansaço generalizado. No aspecto emocional, prevalecem estresse crônico, ansiedade, cansaço mental e desgaste psicológico, todos agravados pela fadiga acumulada e pela redução do tempo disponível para atividades físicas e autocuidado.

Quando questionados sobre a relação entre o trânsito e a capacidade de manter um estilo de vida fisicamente ativo, 92,31% dos especialistas afirmaram que longos deslocamentos comprometem diretamente essa prática, conforme mostra a Figura 4.

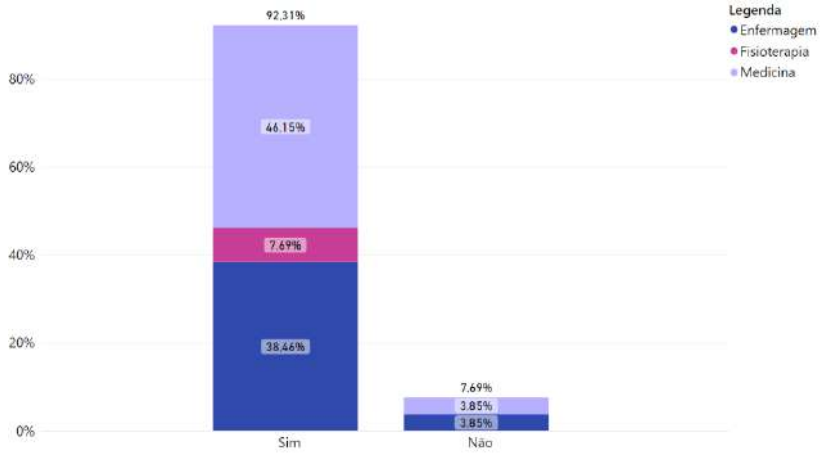


Figura 4: Longos períodos no trânsito/ transporte público impactam na capacidade dos pacientes de manter um estilo de vida fisicamente ativo? Fonte: Elaboração própria.

Entre os fatores mencionados, estão a exaustão física e mental, a falta de tempo para frequentar academias ou preparar refeições saudáveis e a dificuldade de conciliar rotinas intensas com práticas regulares de exercício. Questões de segurança nos horários disponíveis para atividades ao ar livre também foram apontadas como impeditivos relevantes. Apesar desses impactos, 69,23% dos profissionais afirmaram nunca ter discutido o tema com seus pacientes, o que indica uma lacuna relevante na prática clínica. Médicos representaram a maior parte dos que não abordam a questão (34,62%), seguidos por enfermeiros (26,92%) e fisioterapeutas (7,69%). Esse dado revela a necessidade de sensibilização e capacitação para incorporar o tema nas consultas, promovendo a conscientização sobre os riscos do sedentarismo relacionado à mobilidade urbana.

A respeito de possíveis mudanças nos hábitos de transporte, 38,46% dos especialistas recomendaram alguma alteração, como caminhar curtas distâncias, adotar roupas confortáveis, ouvir música durante o trajeto, ou optar por bicicleta em distâncias viáveis. Contudo, a adesão dos pacientes a essas sugestões é limitada, especialmente em regiões com infraestrutura precária e insegurança, o que reforça a importância de políticas públicas integradas.

Sobre a relação entre deslocamentos prolongados e outros problemas de saúde, 61,54% dos especialistas apontaram impactos como ganho de peso, hipertensão, dores crônicas, gastrite, cistite, infecções respiratórias, estresse, taquicardia e depressão. Também foram mencionadas complicações como síndrome metabólica e dificuldade de concentração, associadas a riscos de acidentes e baixo rendimento nas atividades cotidianas.

Por fim, os especialistas foram questionados sobre os efeitos do desgaste emocional provocado pelo trânsito no desempenho acadêmico e profissional: 92,31% concordam que há influência direta, principalmente entre médicos (42,31%) e enfermeiros (42,31%). Os principais fatores identificados incluem cansaço, sonolência, falta de foco, queda no humor, maior irritabilidade e dificuldades em manter rotinas saudáveis. O tempo consumido pelo deslocamento reduz o tempo disponível para lazer, estudos e autocuidado, criando um ciclo de exaustão que compromete a produtividade e o bem-estar.

Esses achados reforçam a necessidade de um olhar mais atento por parte dos profissionais de saúde e de políticas urbanas que considerem o tempo de deslocamento como fator determinante para a saúde física e mental da população.

3.3. Parecer Geral dos Especialistas sobre o Tempo de Deslocamento

Foi perguntado aos especialistas qual seria o tempo máximo de deslocamento considerado aceitável, na opinião deles (Figura 5). Cerca de 52,94% afirmaram que as viagens deveriam durar de 15 a 30 minutos, seguidos por 23,53% que consideram um trajeto de 30 a 45 minutos como adequado. Além disso, 11,76% acreditam que o

tempo máximo de deslocamento deveria ser entre 45 minutos e uma hora. Um percentual menor sugeriu que o ideal seria até 15 minutos, enquanto outros não souberam opinar.

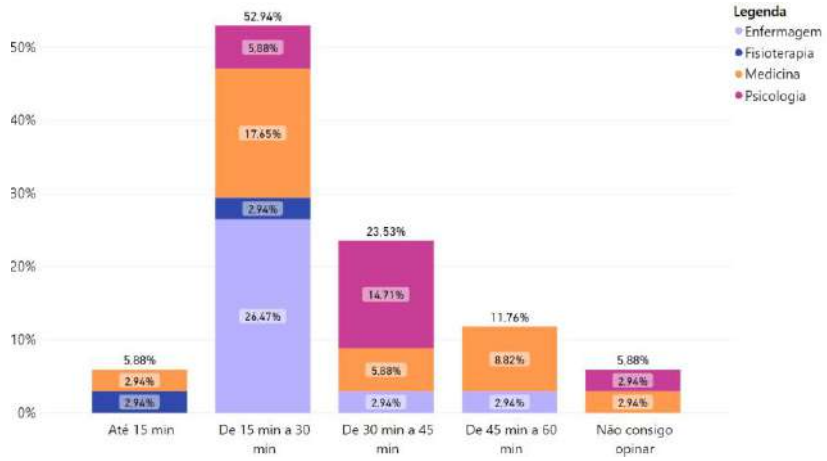


Figura 5: Tempo de deslocamento máximo considerado aceitável. Fonte: Elaboração própria.

Os dados reforçam a importância de políticas públicas que integrem transporte e saúde, priorizando deslocamentos mais rápidos, com prioridade para transporte público, para melhorar o bem-estar da população.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa evidenciam que os longos tempos de deslocamento no trânsito/transporte, associados sobretudo, à inúmeros congestionamentos, exercem impactos significativos sobre a saúde física, mental e a qualidade de vida da população da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. A partir da percepção de especialistas da área da saúde, foi possível identificar uma série de sintomas associados ao tempo excessivo no trânsito, como dores musculares, estresse crônico, fadiga, ansiedade e dificuldades de concentração. Esses efeitos não apenas comprometem o bem-estar dos indivíduos, mas também afetam diretamente seu desempenho acadêmico e profissional.

Apesar da gravidade dos impactos relatados, a maioria dos especialistas aponta a ausência de estratégias por parte das instituições de saúde para lidar com esses efeitos. A baixa inserção do tema nas práticas clínicas, somada à limitada adesão dos pacientes a mudanças nos hábitos de deslocamento, revela uma lacuna importante entre o reconhecimento do problema e a implementação de ações concretas. Os dados reforçam a necessidade de sensibilizar os profissionais da saúde para o papel do tempo de deslocamento como um fator de risco à saúde, bem como de fomentar o diálogo intersetorial entre as áreas de mobilidade urbana, saúde pública e planejamento territorial.

Diante disso, este estudo contribui para o fortalecimento da agenda de políticas públicas que integrem mobilidade e saúde, com foco na redução dos tempos de deslocamento, na melhoria da infraestrutura do transporte coletivo, como implantação de faixa preferenciais de ônibus e qualificação dos pontos de parada, ademais de valorização de estratégias como a flexibilização de horários e a promoção de estilos de vida mais ativos. Ao evidenciar a relação direta entre transporte e saúde, os achados aqui apresentados reforçam a importância de construir cidades mais sustentáveis, acessíveis e centradas no cuidado com as pessoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Nacional de Transportes Públicos – ANTP (2020). Sistema de informações da mobilidade urbana da Associação Nacional de Transportes Público (Simob/ANTP): relatório geral 2018. Disponível em: https://files.antp.org.br/simob/sistema-de-informacoes-da-mobilidade- simob--2018.pdf. Acesso em: 10 jan. 2021.Abreu Jr., A. e B. Botelho Neto (2016) *Título do livro* (2ª. ed.). Cidade: Nome da Editora.

Confederação Nacional do Transporte – CNT (2024). Pesquisa CNT de Mobilidade da População Urbana. Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), Brasília.

Federação das Empresas de Mobilidade do Estado do Rio de Janeiro – Semove (2024). Setor em números. Disponível em: https://transparencia.semove.org.br/transparencia/setor-em-numeros/. Acesso em: 08 de nov. de 2024.

PLANOS DE MOBILIDADE URBANA NO BRASIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTEMATIZADA DA LITERATURA

Edson Rodrigues da Silva Júnior, Cleber Veras Pacheco da Silva, Lyneker Souza de Moura
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
A mobilidade urbana tem se consolidado como um dos principais desafios enfrentados pelas cidades brasileiras, especialmente diante do crescimento territorial desordenado e da priorização do transporte individual. Este artigo analisa os efeitos da implementação dos Planos de Mobilidade Urbana (PMUs) sobre as políticas públicas de transporte no Brasil, com base em uma revisão sistemática da literatura associada à análise bibliométrica. Busca-se compreender como a produção científica tem abordado os PMUs, bem como identificar os avanços, limitações e desafios desses instrumentos no planejamento e gestão da mobilidade urbana. Foram analisadas 15 referências extraídas das bases *Scopus* e *Web of Science*. Os resultados indicam que, embora os PMUs apresentem potencial transformador, sua efetividade é comprometida por limitações institucionais, técnicas e políticas. Dessa forma, sua consolidação requer articulação intersetorial, capacitação técnica e continuidade na implementação das políticas públicas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, a mobilidade urbana tornou-se um dos principais desafios das cidades brasileiras. Silva e Teles (2020) afirmam que o Brasil passou por um desenvolvimento territorial intenso e acelerado, impactando diretamente na qualidade da infraestrutura viária e no sistema de transporte, causando um crescimento desordenado, em que houve uma priorização do transporte individual e um aumento das desigualdades de acesso. Dessa forma, surgiu a necessidade de articular políticas públicas na área de transportes, promovendo a integração entre os níveis de governo, setores, modos de transporte e medidas propostas, a fim de enfrentar esses desafios (Machado e Piccinini, 2018).

Diante desse contexto, pode-se destacar a instituição da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), por meio da Lei Federal nº. 12.587/2012, como um marco na tentativa de transformar esse cenário (Brasil, 2012). A PNMU, portanto, surge como um instrumento técnico e político que propõe diretrizes para promover a mobilidade sustentável, integração entre os modos de transporte e acesso equitativo à cidade, sendo obrigatório nos municípios com mais de 20 mil habitantes, integrantes de regiões metropolitanas ou de áreas de interesse turístico. Logo, conforme Magalhães *et al.* (2022) indicam, os planos de mobilidade urbana têm o potencial de transformar tanto o pensamento quanto a prática de políticas públicas no setor de transportes, sobretudo ao internalizar tendências e boas práticas em mobilidade ativa e sustentável.

Entretanto, apesar do reconhecido avanço trazido pela PNMU, a aplicação prática dos instrumentos ainda enfrenta uma série de limitações, visto que muitos são desenvolvidos de forma isolada, sem articulação entre os atores, gerando um descompasso entre o que a política propõe e o que os municípios conseguem colocar em prática, devido à falta de diretrizes claras para a elaboração desses planos (Coelho e Abreu, 2019). Aliado a esses fatores, Cruz e Paulino (2019) ressaltam que a precariedade da infraestrutura, a falta de coordenação entre o uso do solo e o transporte, e as políticas de incentivo que favorecem o transporte individual limitam ainda mais a efetividade dos planos de mobilidade. Logo, torna-se necessário verificar até que ponto os planos de mobilidade têm induzido mudanças significativas na forma como o transporte é planejado e gerido nas cidades brasileiras, apontando seus avanços, mas também suas limitações e contradições.

Portanto, este artigo tem como objetivo analisar as transformações nas políticas públicas de transporte no Brasil a partir da implementação dos Planos de Mobilidade Urbana, por meio de uma revisão sistemática da literatura com uma abordagem bibliométrica, com a finalidade de identificar as principais produções científicas que discutem os efeitos desses planos sobre o planejamento e a gestão da mobilidade urbana no país. Contribuindo para a compreensão do papel desses instrumentos na reestruturação das políticas públicas do setor, observando como a literatura acadêmica aborda esses planos.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste artigo consiste na realização de uma revisão sistemática da literatura, associada a uma análise bibliométrica, com o objetivo de identificar, mapear e analisar a produção científica que discute os impactos, os desafios e os avanços dos Planos de Mobilidade Urbana (PMU) na formulação e na

gestão das políticas públicas de transporte no Brasil. A revisão sistemática busca uma análise abrangente, possibilitando a consolidação do estado da arte sobre o tema e a compreensão das principais contribuições e lacunas existentes na literatura acadêmica. Complementarmente, a análise bibliométrica permite quantificar a produção científica, identificar os principais autores, instituições, redes de colaboração e os temas recorrentes e emergentes relacionados à mobilidade urbana no contexto brasileiro.

As buscas foram realizadas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, escolhidas por sua ampla cobertura de periódicos científicos de relevância nacional e internacional. A estratégia de busca contemplou termos centrais relacionados ao tema, como "*Brazil*", "Plano de Mobilidade Urbana", "*Urban Mobility Plan*", "Política de Mobilidade Urbana", "*Urban Mobility Policy"* e variações como "*Urban Policy*" e "*Urban Planning*", em inglês e português. A inclusão de termos em inglês visou ampliar o alcance à literatura internacional, enquanto os termos em português asseguraram a representatividade da produção nacional, essencial ao se tratar de uma política pública aplicada ao contexto brasileiro. As consultas foram realizadas em 19 de junho de 2025, resultando na identificação inicial de 165 referências. Após a deduplicação com auxílio do *software RStudio* e do pacote *Bibliometrix*, 12 registros duplicados foram eliminados, totalizando 153 documentos únicos para a etapa de seleção.

Na sequência, realizou-se uma triagem a partir da leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, com a aplicação de critérios de elegibilidade bem definidos. Foram considerados para inclusão os estudos que abordam diretamente os Planos de Mobilidade Urbana no Brasil, suas repercussões nas políticas públicas, bem como os desafios, impactos e resultados no planejamento e na gestão do transporte urbano. Por outro lado, foram excluídas as referências que não tratavam especificamente dos PMUs, ou que tinham foco em temáticas muito distantes do escopo da pesquisa, como estudos com ênfase puramente em soluções tecnológicas específicas, análises de engenharia de tráfego desconectadas das discussões sobre políticas públicas, ou investigações restritas a contextos internacionais sem interface com a realidade brasileira.

Esse conjunto de estudos permitiu compreender como a literatura acadêmica tem abordado os PMUs, seus avanços, desafios e limitações, bem como refletir sobre o papel desses instrumentos na transformação das políticas públicas de transporte no Brasil. A seguir, a Tabela 1 apresenta a relação dos artigos selecionados pela revisão sistemática a partir dos filtros aplicados.

Tabela 1: Artigos selecionados pela revisão sistemática

Autores	**Título do artigo**
Azevedo *et al.* (2021)	Sustainable urban mobility analysis for elderly and disabled people in São Paulo.
Baesse (2019)	Elaboração do plano de mobilidade urbana em Natal/RN.
Baldraia (2018)	Um passo atrás para poder dar dois passos adiante? Considerações sobre as políticas de mobilidade urbana no município de São Paulo cinco anos após a vigência da Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável (PNMU).
Costa *et al.* (2020)	Análise da mobilidade cotidiana em Florianópolis.
Fontoura *et al.* (2022)	*Brazilian Megacities: quantifying the impacts of the Brazilian urban mobility policy.*
Freiberg *et al.* (2024)	*Are mass transit projects and public transport planning overlooking uneven distributional effects? Empirical evidence from São Paulo, Brazil.*
Grangeia e Santos (2023)	*Uncertainties About the Transport Planning in Brazil in the Context of Climate Change: Tradition (Biofuels) or Innovation (Electric Mobility)?.*
Kneib e Mendonça Neto (2020)	Diagnóstico da mobilidade: método e aplicação no plano de desenvolvimento integrado da Região Metropolitana de Goiânia (Brasil)
Luft (2020)	Planejamento e financiamento da mobilidade urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.
Machado e Piccinini (2018)	*Challenges for the effectiveness of the implementation of urban mobility plans: a systematic review.*
Magalhães *et al.* (2022)	*Active transport planning and policy: Internalisation of new trends and best practices in Brazilian urban mobility plans.*
Schvambach e Suski (2023)	Efeito da implantação do plano de mobilidade urbana do município de Brusque/SC na emissão de gases de efeito estufa.
Silva *et al.* (2008)	*Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil.*
Siqueira e Souza (2020)	Desafios e políticas de desenvolvimento da circulação e da mobilidade urbana e rural.
Valença e Santos (2020)	A relação entre o conceito de ruas completas e a Política Nacional de Mobilidade Urbana: aplicação a um projeto viário em Natal-RN, Brasil.

Ao término do processo de triagem, 138 referências foram excluídas por não atenderem aos critérios estabelecidos para a pesquisa. Dentre essas, 75 abordavam temáticas paralelas, como saúde, meio ambiente,

educação e energia, sem relação direta com os Planos de Mobilidade Urbana (PMUs) no contexto brasileiro. Outras 21 se referiam a tecnologias, metodologias ou abordagens conceituais específicas, sem articulação com políticas públicas de transporte. Adicionalmente, 15 estudos apresentavam escopo internacional ou regional, com baixa aplicabilidade ao cenário nacional, enquanto 27 focavam em aspectos teóricos, conceituais ou setoriais dissociados da formulação, implementação ou gestão dos PMUs. Como resultado foram selecionadas 15 referências diretamente vinculadas ao planejamento e à formulação de políticas públicas de mobilidade urbana por meio dos PMUs, as quais embasaram as análises bibliométrica e qualitativa desenvolvidas neste estudo.

3. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

A Figura 1 ilustra a frequência das palavras-chave mais recorrentes nos artigos provenientes das duas bases de dados analisadas. Para essa etapa, os dados foram integrados e tratados no ambiente RStudio, sendo posteriormente analisados por meio do pacote *Bibliometrix*, que possibilitou a geração de visualizações bibliométricas. As representações gráficas produzidas revelam redes de concorrência entre termos, permitindo a identificação de áreas temáticas consolidadas e emergentes, facilitando a localização de estudos com alta correlação temática, o que contribui para aprofundar e direcionar futuras investigações.



Figura 1: Frequência das palavras-chave

Com base na Figura 1, pode-se notar as palavras-chave de maior destaque retiradas das bases de dados da *Scopus* e *Web of Science*: "*brazil*", "*urban mobility*", "*urban transport*", "*transport policy*" e "*urban mobility plan*", que estão em conformidade com o presente estudo.

4. RESULTADOS SISTEMÁTICOS

A literatura sobre mobilidade urbana tem destacado os planos de mobilidade como ferramentas fundamentais para repensar as diretrizes do transporte público e sustentável. Nesse contexto, para se alcançar uma mobilidade eficiente é preciso estabelecer uma integração na análise entre transporte coletivo, modos não motorizados e o uso do solo, a fim de estabelecer uma mudança na forma de pensar o planejamento urbano e as políticas de transporte (Magalhães *et al.*, 2022; Kneib e Mendonça Neto, 2020). Entretanto, conforme dito por Baesse (2019), a elaboração do plano, por si só, não é suficiente para assegurar essas mudanças, há necessidade de um comprometimento institucional com sua implementação e atualização, para que de fato se transforme em uma política pública e não apenas um documento de governo.

Logo, trata-se de um processo que requer um esforço político, por parte dos gestores para enfrentar barreiras externas, como as pressões que são exercidas pela especulação imobiliária e pelos interesses econômicos, de modo que permita apresentar ações para materializar os objetivos e as metas, e solucionar os problemas e garantir o direito à cidade (Machado e Piccinini, 2018). Assegurando o potencial transformador que um plano de mobilidade urbana pode exercer nas políticas públicas de transporte, visto que Schvambach e Suski (2023) indicam que as propostas dos planos impactam positivamente na qualidade de vida da população e no equilíbrio entre desenvolvimento urbano e sustentabilidade ambiental.

Entretanto, a realidade ainda está distante do cenário ideal, a cidade de São Paulo, por exemplo, embora tenha tido avanços a partir de políticas públicas de mobilidade, como ciclovias, faixas exclusivas de ônibus e política de pedestrianização, ainda enfrenta diversos obstáculos, como o domínio do automóvel sobre os outros modos de transporte, desigualdades socioespaciais e a falta de acessibilidade (Azevedo *et al.*, 2021; Baldraia, 2018; Freiberg *et al.*, 2024). Da mesma forma ocorre na cidade do Rio de Janeiro e Florianópolis, ainda que seja nítido que houve uma evolução nas políticas voltadas ao transporte e mobilidade na última década, há um reconhecimento da falta de integração territorial e social e da mobilidade sustentável como um desafio (Costa *et al.*, 2020; Luft, 2020).

Percebe-se, então, que são problemas que se refletem por todas as regiões do país, visto que Valença e Santos (2020) mostram que até julho de 2019, menos de 10% dos municípios haviam cumprido a obrigação da PNMU segundo o Ministério das Cidades (2019); além da dependência de recursos externos para elaboração desses planos. Portanto, no Brasil, o grande desafio não está apenas na formulação dos planos, mas na execução prática, continuidade e integração com a política urbana. A efetividade dos planos de mobilidade urbana ainda depende da capacidade de implementação local e da superação de barreiras estruturais e institucionais (Fontoura *et al.*, 2022; Grangeia e Santos, 2023).

Logo, conforme mostrado por Silva *et al.* (2008), é preciso uma mudança na abordagem desses planos, levando em conta o contexto de cada local, adaptá-los de acordo com cada realidade, para garantir uma transição do modelo centrado no carro para modos coletivos e não motorizados, sempre levando em conta a capacidade técnica dos profissionais e o compromisso institucional de dar continuidade a essas políticas. Uma vez que, no momento atual, a mobilidade deve ser uma prioridade para os gestores políticos, pois surgiu uma disputa intensa pelo espaço urbano, revelando a necessidade urgente da reorganização territorial e priorização de transportes mais sustentáveis (Siqueira e Souza, 2020).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada evidencia que os PMUs se configuram como instrumentos estratégicos para a reestruturação das políticas públicas de transporte no Brasil, especialmente após a promulgação da PNMU, que estabeleceu um marco legal voltado à promoção de uma mobilidade mais sustentável, integrada e equitativa. Apesar desse avanço normativo, os resultados da revisão sistemática da literatura e da análise bibliométrica indicam a persistência de desafios na implementação prática desses planos. Embora possuam um potencial transformador, sobretudo quando articulados com políticas de uso do solo, integração e incentivo à mobilidade ativa, sua efetividade depende de um comprometimento institucional robusto e de uma governança articulada entre os diversos atores. A superação de barreiras estruturais e institucionais, como escassez de recursos, fragmentação de políticas, descontinuidade administrativa, influência de interesses privados e baixa capacidade técnica de muitos municípios, ainda é um obstáculo importante, refletindo na limitada abrangência e qualidade desigual da mobilidade urbana no país.

A análise bibliométrica revelou uma concentração temática em torno de conceitos como “Transport Policy”, “Urban Mobility” e “Urban Mobility Plan”, indicando que a produção científica tem enfatizado a necessidade de uma abordagem sistêmica e integrada no campo da mobilidade urbana. Contudo, persistem lacunas na avaliação dos PMUs, na mensuração de resultados e na definição de indicadores que comprovem sua contribuição para a mobilidade e o acesso urbano.

Dessa forma, considera-se que os objetivos deste trabalho foram plenamente alcançados, ao analisar as transformações nas políticas públicas de transporte no Brasil a partir da implementação dos PMUs, identificar as principais produções científicas que discutem seus efeitos sobre o planejamento e a gestão da mobilidade urbana, e compreender como a literatura acadêmica tem abordado esses instrumentos. A pesquisa contribui, assim, para o aprofundamento do debate sobre o papel dos PMUs na reestruturação das políticas de mobilidade no país.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se o aprofundamento de estudos empíricos que avaliem a implementação concreta dos PMUs em diferentes contextos municipais, considerando variáveis como porte populacional, capacidade institucional e indicadores de mobilidade urbana. Também é recomendável o desenvolvimento de metodologias para aferição de impacto dos planos, com foco em indicadores de equidade, acessibilidade e sustentabilidade. Além disso, seria pertinente explorar a articulação dos PMUs com instrumentos de planejamento urbano e políticas ambientais, ampliando a compreensão de sua eficácia como ferramenta de gestão integrada das cidades brasileiras.

Agradecimentos
O presente artigo contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

Azevedo, G. A.; R. R. Sampaio; A. S. Nascimento Filho; M. A. Moret; T. B. Murari (2021) *Sustainable urban mobility analysis for elderly and disabled people in* São Paulo. *Scientific Reports*, v. 11, Article 791, 15 p. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-80906-w.

Baesse, G. (2019) Elaboração do plano de mobilidade urbana em Natal/RN, Brasil. *Revista Transporte y Territorio*, v. 20, p. 268–287. DOI: doi.org/10.34096/rtt.i20.6392.

Baldraia, A. S. (2018) Um passo atrás para poder dar dois passos adiante? Considerações sobre as políticas de mobilidade urbana no município de São Paulo cinco anos após a vigência da Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável (PNMU). *Revista Transporte y Territorio*, v. 20, p. 190–213. DOI: https://doi.org/10.34096/rtt.i20.6389.

Brasil (2012) Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. *Diário Oficial da União,* Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm (acesso em 15/06/2025).

Coelho, P. F. C. e M. C. S. de Abreu (2019) *Socio-technical transitions to sustainable urban mobility in Brazil*. *Revista de Administração da UFSM*, v. 12, n. 6, p. 1227–1241. DOI: 10.5902/1983465936254.

Costa, E. S.; E. R. Bosco; Z. I. Farias; E. S. Mello; M. B. A. Simões; J. Rebollo-Squera; I. O. Rocha (2020) Análise da mobilidade cotidiana em Florianópolis. *Geo UERJ*, n. 37, e39525. DOI: doi.org/10.12957/geouerj.2020.39525.

Cruz, S. S. e S. R. Paulino (2019) Desafios da mobilidade ativa na perspectiva dos serviços públicos: experiências na cidade de São Paulo. *Urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana*, v. 11, e20190026. DOI: 10.1590/2175-3369.011.e20190026.

Fontoura, W.; G. M. Ribeiro; G. L. D. Chaves (2022) *Brazilian Megacities: quantifying the impacts of the Brazilian urban mobility policy*. *Municipal Engineer*, v. 175, n. 3, p. 162–174. DOI: doi.org/10.1680/jmuen.22.00007.

Freiberg, G.; M. A. Giannotti; T. A. Bittencourt (2024) *Are mass transit projects and public transport planning overlooking uneven distributional effects? Empirical evidence from* São Paulo, *Brazil*. *Journal of Transport Geography*, v. 116, Article 103825, 15 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103825

Grangeia, C. e L. Santos (2023) *Uncertainties About the Transport Planning in Brazil in the Context of Climate Change: Tradition (Biofuels) or Innovation (Electric Mobility)?*. *Energy Transitions in Latin America*. Cham: Springer, p. 251–263. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-37476-0_15.

Kneib, E. C. e W. L. Mendonça Neto (2020) Diagnóstico da mobilidade: método e aplicação no plano de desenvolvimento integrado da Região Metropolitana de Goiânia (Brasil). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, v. 29, n. 2, p. 373–391. DOI: 10.15446/rcdg.v29n2.81280.

Luft, R. M. (2020) Planejamento e financiamento da mobilidade urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Geo UERJ*, n. 36, e48415. DOI: https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.48415.

Machado, L. e L. S. Piccinini Piccinini (2018) *Challenges for the effectiveness of the implementation of urban mobility plans: a systematic review*. *Urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana*, v. 10, n. 1, p. 72–94. DOI: 10.1590/2175-3369.010.001.AO06.

Magalhães, I.; L. Rabay; L. H. Meira e E. Santos (2022) *Active transport planning and policy: Internalisation of new trends and best practices in Brazilian urban mobility plans*. *Case Studies on Transport Policy*, v. 10, n. 1, p. 208–217. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.10.014.

Ministério das Cidades (2019) *Levantamento sobre a situação dos Planos de Mobilidade Urbana nos municípios brasileiros*. Disponível em: www.cidades.gov.br/component/content/article?id=4398 (acesso em 18/06/2025).

Schvambach, A. e C. A. Suski (2023) Efeito da implantação do plano de mobilidade urbana do município de Brusque/SC na emissão de gases de efeito estufa. *Geociências*, v. 42, n. 1, p. 45–57. DOI: https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i01.17053.

Silva, A. N. R. e T. Teles (2020) *Pathways to sustainable urban mobility planning: A case study applied in São Luís, Brazil. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 6, p. 100102. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100102.

Silva, A. N. R.; M. S. Costa e M. H. Macedo (2008) *Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil*. *Transport Policy*, v. 15, n. 6, p. 350–360. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.12.003.

Siqueira, A. C. C. e E. B. C. Souza (2021) Desafios e políticas de desenvolvimento da circulação e da mobilidade urbana e rural. *Formação (Online)*, v. 27, n. 52. DOI: https://doi.org/10.33081/formacao.v27i52.7145.

Valença, G. e E. M. Santos (2020) A relação entre o conceito de ruas completas e a Política Nacional de Mobilidade Urbana: aplicação a um projeto viário em Natal-RN, Brasil. *EURE – Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, v. 46, p. 73–89. DOI: http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612020000300073.

Edson Rodrigues da Silva Júnior (edson.junior@ufpe.br)
Cleber Veras Pacheco da Silva (cleber.pacheco@ufpe.br)
Lyneker Souza de Moura (lyneker.moura@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Avenida Professor Moraes Rego, s/n - Iputinga - Recife, PE, 50670-901.

PROGRAMA NACIONAL DE APOIO AO TRANSPORTE DO ESCOLAR (PNATE): ANÁLISE DO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE RECURSOS

Matheus Henrique Morato de Moraes [1], **Lara Batista Ferreira de Lima**[1], **Willer Luciano de Carvalho**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este artigo analisa a metodologia de cálculo do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE), com destaque para a proposta elaborada pela UFG em parceria com o FNDE. A nova formulação busca maior equidade na distribuição de recursos, incorporando variáveis operacionais, geográficas, socioeconômicas e educacionais. Utilizando análise fatorial e ranqueamento, constrói-se um índice de necessidade municipal que orienta o valor per capita repassado. O modelo considera fatores como área territorial, número de alunos transportados, percentual de transporte aquaviário, taxas de abandono e distorção idade-série. Os municípios são classificados conforme seu índice e recebem recursos proporcionais à sua posição no ranking, com ajustes redistributivos para munícipios mais vulneráveis. A proposta representa um avanço frente ao modelo anterior ao refletir melhor as reais necessidades logísticas e socioeducacionais, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, contribuindo para a promoção da equidade no acesso à educação básica pública.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O acesso à educação básica para estudantes residentes em áreas rurais e regiões remotas do Brasil permanece como um dos principais desafios para a consolidação de uma educação pública de qualidade, equitativa e universal. A precariedade das vias de acesso, a escassez de transporte adequado e as longas distâncias a serem percorridas por crianças e adolescentes dificultam a frequência regular às aulas e comprometem a permanência e o rendimento escolar (Carvalho *et al.*, 2016). Nesse contexto, o transporte escolar tem um papel estratégico como meio de assegurar o direito à educação básica. O transporte escolar como política de apoio escolar tem sido amplamente discutido em pela comunidade acadêmica, buscando a combater as desigualdades de acesso e em promover a equidade educacional (Carvalho *et al.*, 2024). Iniciativas como o programa "Caminho da Escola" e o Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE) foram criadas com o objetivo de assegurar que alunos da zona rural tenham acesso digno e seguro às escolas, fortalecendo o compromisso do Estado com a universalização da educação (Medrano e Carvalho, 2021; Medrano *et al.*, 2021).

O PNATE, instituído em 2004, destaca-se por sua abrangência e impacto positivo, especialmente em municípios com baixos indicadores socioeconômicos e de infraestrutura. Seu modelo de financiamento é baseado em critérios técnicos e dados censitários, buscando contemplar as diferentes realidades regionais do país (Carvalho *et al.*, 2024; Silva e Yamashita, 2010). De acordo com as análises mais recentes, o programa tem contribuído significativamente para o aumento das taxas de matrícula e redução da evasão, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste, onde os desafios geográficos e logísticos são mais intensos (Carvalho *et al.*, 2024; Medrano *et al.*, 2021; UFG e FNDE, 2019). O impacto do transporte escolar em indicadores educacionais é amplamente documentado (UFG e FNDE, 2019). A implementação de políticas públicas de apoio a transporte escolar tal como o PNATE em tem sido associada à diminuição da evasão escolar, taxa de reprovação, distorção idade-série e ao aumento da frequência regular e taxa de matrícula, resultando em melhora para os alunos e à melhoria das condições de acesso à educação básica, principalmente em regiões marcadas por vulnerabilidade social (UFG e FNDE, 2019). A presença de transporte escolar gratuito influencia diretamente a continuidade dos estudos especialmente entre os alunos de zona rural.

Neste contexto, o presente artigo tem intuito apresentar e analisar o modelo de cálculo adotado no PNATE para o ranqueamento dos municípios e para a distribuição de recurso, mostrando os critérios estabelecidos para sua metodologia de cálculo. Com o objetivo de entender o processo e verificar como esses parâmetros contribuem para a efetividade da política pública e para o fortalecimento do acesso à educação básica, respeitando as diversidades regionais e promovendo a equidade educacional.

2. O TRANSPORTE ESCOLAR COMO POLÍTICA PÚBLICA

O transporte escolar configura-se como uma política pública essencial para assegurar o direito à educação básica, principalmente para estudantes que residem em áreas rurais, remotas ou de difícil acesso. Essa prerrogativa está formalmente prevista no artigo 208, inciso VII, da Constituição Federal de 1988, ao estabelecer que o dever do Estado com a educação básica compreende o "atendimento ao educando, por meio

de programas suplementares, de material didático-escolar, transporte, alimentação e assistência à saúde" (Brasil, 1988). Apesar da previsão legal, a efetivação dessa política encontra obstáculos relevantes. Fatores como a precariedade da malha viária, a baixa densidade populacional em áreas rurais, a escassez de recursos técnicos e financeiros e a complexidade logística do serviço comprometem sua universalização e qualidade (UFG e FNDE, 2020a). Nesse contexto, é fundamental compreender o transporte escolar como um componente estratégico da política educacional, que demanda investimentos, planejamento territorial e articulação federativa. Sua efetividade depende da capacidade dos entes públicos de garantir um serviço contínuo, seguro e adaptado às realidades locais, respeitando os princípios da equidade e da justiça social.

2.1. O PNATE e seu histórico

O PNATE foi instituído pela Lei nº 10.880/2004, tem como objetivo principal assegurar o acesso e a permanência de estudantes da zona rural nas escolas públicas de educação básica, por meio de transferências automáticas de recursos financeiros, em caráter suplementar com base nos dados do Censo Escolar do ano anterior (Brasil, 2004). Desde sua criação em 2004, o modelo passou por diversas evoluções inicialmente o recurso tinha um valor per capita fixo e igual para todos os municípios. Em 2006, foi incorporado o Fator de Necessidade de Recursos dos Municípios (FNR-M), considerando variáveis como população rural, área territorial e percentual da população abaixo da linha da pobreza (Brasil, 2006). Ainda assim, o modelo mostrava limitações, pois não refletia a diversidade operacional e as particularidades de cada localidade.

Posteriormente, foram implementados ajustes, como a introdução da média móvel, por meio da Fator de Correção de Desigualdades Regionais (FCDR) em 2007 (Brasil, 2007). E a partir de 2008 a inclusão do Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB) na fórmula de cálculo do FNR-M (Brasil, 2008). No entanto, mesmo com esses aprimoramentos, persistiram dificuldades atreladas à insuficiência do modelo em captar aspectos que relacionem as diferenças regionais. Diante dessas fragilidades, uma nova proposta metodológica foi elaborada em parceria com a Universidade Federal de Goiás (UFG), por meio do Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar (CECATE). A proposta visa incorporar variáveis educacionais, socioeconômicas, geográficas e operacionais, com destaque para indicadores como a distorção idade-série, taxa de abandono, extensão territorial, número de alunos transportados e tipo de transporte utilizado (rodoviário ou aquaviário), entre outros (UFG e FNDE, 2020a). A proposta metodológica utiliza técnicas estatísticas como análise fatorial e ranqueamento, permitindo o cálculo de um índice de necessidade que orienta o valor per capita a ser transferido. O objetivo central é promover maior equidade na distribuição dos recursos, ao contemplar fatores que impactam diretamente o custo e a complexidade do transporte escolar em cada localidade.

3. METODOLOGIA ATUAL DO REPASSE DE RECURSO DO PNATE

A metodologia atual para o repasse de recursos do PNATE foi reformulada com o objetivo de promover maior equidade na distribuição dos recursos públicos entre os municípios brasileiros. Essa nova abordagem foi desenvolvida no âmbito do projeto conduzido pela UFG, por meio do CECATE, em parceria com o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), e está detalhada no Volume II do relatório técnico de Proposta de Nova Formulação para o Repasse dos Recursos do Programa Transporte Nacional de Apoio ao Transporte do PNATE Volume II (UFG e FNDE, 2020b). A reformulação parte do reconhecimento de que o modelo anterior, baseado em estimativas per capita fixas e critérios operacionais simplificados, era insuficiente para captar as múltiplas realidades territoriais, educacionais, socioeconômicas e geográficas do país. Para superar essas limitações, o novo modelo adota uma abordagem estatística robusta, centrada na construção de um índice de necessidade municipal, por meio de análise fatorial multivariada (UFG e FNDE, 2020b, p. 41–55).

A metodologia é dividida em etapas. Primeiramente, é realizada a coleta e organização dos dados provenientes de bases públicas como o Censo Escolar, IBGE, INEP e outras fontes oficiais. Nessa fase, são considerados dados como o número total de alunos transportados, percentual de alunos atendidos por transporte aquaviário, área territorial do município, taxas de distorção idade-série e abandono escolar, além de indicadores de gestão como o Índice de Gestão Escolar (IGE) e o Índice Firjan de Gestão Fiscal (IFGF) (UFG e FNDE, 2020b, p. 50–54). Em seguida, realiza-se a seleção e categorização das variáveis, que são classificadas em dois grandes grupos: equitativas, que representam aspectos operacionais e estruturais do transporte escolar; e meritocráticas, que refletem o desempenho educacional dos municípios (UFG e FNDE, 2020b, p. 42). Sendo as variáveis de equidade: Área total do município; Número de alunos transportados; Porcentagem de alunos transportados no

modo aquaviário; Número de alunos transportados no modo rodoviário; Número de alunos transportados no modo aquaviário; Índice Firjan de Gestão Fiscal.

No uso das variáveis de equidade foram testadas duas formulações com as variáveis selecionadas, sendo a primeira formulação três variáveis selecionadas dentre elas a área total do município, número de alunos transportados e percentagem de alunos transportados no modo aquaviário. Para a segunda formulação foram consideradas a área total do município, número de alunos transportados no modo rodoviário e número de alunos transportados no modo aquaviário. A escolha da formulação mais adequada, a partir das variáveis selecionadas, é feita com base na análise dos fatores extraídos e nas respectivas cargas fatoriais associadas a cada um deles. Após essa classificação, aplica-se a análise fatorial multivariada, uma técnica estatística que permite reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar os fatores latentes que mais influenciam os custos e a complexidade do transporte escolar. A análise fatorial é composta por cinco subetapas: (1) seleção das variáveis a serem incluídas no modelo; (2) extração dos fatores principais utilizando o método dos componentes principais; (3) avaliação dos fatores extraídos com base em critérios estatísticos como a variância explicada; (4) cálculo dos escores fatoriais por meio da padronização dos dados (z-score); e (5) construção do índice de necessidade para cada município, baseado na ponderação dos escores pelas respectivas cargas fatoriais (p. 49) (UFG e FNDE, 2020b, p. 42–49).

Para ranquear os municípios de acordo com suas necessidades logísticas e socioeducacionais, calcula-se o Índice de Prioridade ($IP_{(i)}$) por munícipio i, obtido pela ponderação padronizada das cinco variáveis consideradas mais representativas (área territorial, número de alunos transportados nos modais aquaviário e rodoviário, distorção idade-série e taxa de abandono escolar). A Equação 1 apresenta essa formulação, adaptada de UFG e FNDE (2020b).

$$IP_{(i)} = \underbrace{\frac{A_{(i)} - \bar{A}}{\sigma_A} \cdot CF_A}_{Área} + \underbrace{\frac{A_{q_{(i)}} - \overline{Aq}}{\sigma_{Aq}} \cdot CF_{Aq}}_{Aluno\ aquaviário} + \underbrace{\frac{R_{(i)} - \bar{R}}{\sigma_R} \cdot CF_R}_{Alunos\ rodoviário} + \underbrace{\frac{D_{(i)} - \bar{D}}{\sigma_D} \cdot CF_D}_{Distorção\ idade-serie} + \underbrace{\frac{Ab_{(i)} - \overline{Ab}}{\sigma_{Ab}} \cdot CF_{Ab}}_{Taxa\ de\ abandono} \quad (1)$$

Onde, $A_{(i)}$ é a área territorial; $\bar{A}$ e σ_A são, respectivamente, a média e o desvio-padrão dessa variável em nível nacional; CF_Aé a carga fatorial associada à área; $Aq_{(i)}$ e $R_{(i)}$ representam, respectivamente, o número de alunos atendidos pelos modais aquaviário e rodoviário; $\overline{Aq}$, σ_{Aq}, $\bar{R}$ e σ_R são as suas médias e desvios-padrão; CF_{Aq} e CF_R são as cargas fatoriais correspondentes; $D_{(i)}$ é a distorção idade-série e $A_{b_{(i)}}$ a taxa de abandono, $\bar{D}$, $\overline{Ab}$, σ_D e σ_{Ab} são as suas médias e desvios-padrão; CF_De CF_{Ab} são as cargas fatoriais correspondentes

Com o índice de prioridade calculado, os municípios são ordenados por meio de um ranqueamento, que permite identificar aqueles com maiores demandas por recursos. A partir desse ranqueamento, calcula-se o valor per capita inicial a ser repassado a cada município. Esse valor pode ser determinado com base em fórmulas que relacionam o posicionamento do município no ranking, o maior e o menor valor per capita do ano anterior e o percentual de reajuste definido pelo FNDE. O índice de necessidade é obtido pela ponderação dos escores fatoriais, de acordo com suas cargas. A partir desse índice, calcula-se o valor per capita inicial a ser repassado a cada município. Em seguida, são aplicados ajustes redistributivos, baseados em critérios como o percentual de municípios com maior vulnerabilidade (por exemplo, os 25% mais necessitados) e o montante reservado para redistribuição mais equitativa (UFG; FNDE, 2020, p. 62–66). Para calcular o novo valor per capita de cada município ($NP_{(i)}$), é indispensável conhecer o montante referente ao ano imediatamente anterior e determinar o percentual de reajuste que será aplicado de um exercício para o outro, como na Equação 2.

$$NP_{(i)} = \frac{\left\{\left(max_{perc} \cdot (1+R) - \left(min_{perc} \cdot (1+R)\right)\right)\right\} \cdot \left(PR_{(i)} - N_{mun}\right)}{N_{mun} - 1} + \left(min_{perc} \cdot (1+R)\right) \quad (2)$$

Onde, min_{perc} ´é o menor valor per capta recebido por um município no ano anterior ao da simulação, max_{perc} é o maior valor per capta recebido por um município no ano anterior ao da simulação, R é o percentual de reajuste dos valores do per capta, $PR_{(i)}$ é a posição no ranking em que se encontra o município, N_{mun} é o número de municípios considerados no estudo e i é o município de análise.

Um dos princípios adotados pelo FNDE para definir o valor per capita repassado a cada município no âmbito

do PNATE é assegurar que nenhuma localidade receba, em determinado exercício, quantia inferior à destinada no ano imediatamente anterior. Para garantir esse critério, procede-se a um ajuste desses valores, seguindo a regra apresentada na Equação 3.

$$Se\ NP_{(i)} < PERC_{(i)} \quad Então\ NPa_{(i)} = PERC_{(i)} \quad Se\ não\ NPa_{(i)} = NP_{(i)} \tag{3}$$

Onde, $NPa_{(i)}$é o novo valor *per capta* ajustado e $PERC_{(i)}$ é o valor *per capta* recebido no último ano.

Uma alternativa para determinar o valor per capita e o montante global destinado a cada município começa pela fixação do volume de recursos que o FNDE disponibiliza para distribuição via PNATE. Esse total é inserido no modelo, que calcula os respectivos valores per capita. Uma vez definido o total de recursos a serem distribuídos, determina-se o valor per capita correspondente a esse montante. A Equação 4 traz a expressão que permite calcular esse valor per capita tomando como base o volume de recursos previamente fixado.

$$PercaptaD_{(i)} = \left(\frac{RecursoDist}{\sum_{i=1}^{n} \frac{NP_{(i)}}{Max_{NP}} \cdot TAl_{(i)}} \right) \tag{4}$$

Onde, $PercaptaD_{(i)}$ é o valor per capta da distribuição a partir de um montante de recursos pré-definido, $TAl_{(i)}$ é o total de alunos transportados, Max_{NP} é o maior valor per capta que um município recebe, $RecursoDist$ é o total de recursos disponível para a distribuição, i é o município de análise e n é o número de municípios da análise.

Uma vez fixado o valor per capita para cada município, estima-se o montante de recursos a ser destinado a cada localidade multiplicando-se esse valor pelo número total de alunos atendidos pelo transporte escolar, conforme ilustram as equações 5, 6 e 7, para os valores totais sem reajuste, com reajuste e definido a partir de uma do montante de recursos, respectivamente.

$$Total_{(i)} = NP_{(i)} \cdot TAl_{(i)} \tag{5}$$

$$TotalA_{(i)} = NPa_{(i)} \cdot TAl_{(i)} \tag{6}$$

$$TotalM_{(i)} = PercaptaD_{(i)} \cdot TAl_{(i)} \tag{7}$$

Onde, $Total_{(i)}$ é o total de recursos a ser aportado no município, $TotalA_{(i)}$ é o total de recursos a ser aportado no município a partir do per capta ajustado e $TotalA_{(i)}$ é total de recursos a ser aportado no município a partir de um montante pré-definido.

Além disso, a metodologia prevê ajustes redistributivos com foco na equidade, destinando um percentual dos recursos para municípios em situação de maior vulnerabilidade, por exemplo, os 25% com menor índice socioeducacional. Essa etapa envolve a definição do montante a ser redistribuído, o cálculo do novo valor per capita redistributivo e o valor final a ser transferido por município (UFG e FNDE, 2020b, p. 66). A metodologia contempla ainda a atualização anual das variáveis utilizadas, a revisão periódica das cargas fatoriais, a inclusão de municípios recém-criados ou alterados em seus indicadores, e a possibilidade de recalibragem das ponderações entre critérios de mérito e de necessidade (UFG e FNDE, 2020b, p. 68).

A adoção do novo modelo de cálculo do valor per capita do PNATE trouxe implicações práticas relevantes para a política de transporte escolar. Ao incorporar variáveis operacionais e educacionais, o modelo permitiu uma redistribuição mais justa dos recursos, contemplando municípios que enfrentam maiores dificuldades logísticas e educacionais, especialmente nas regiões Norte e Nordeste (UFG e FNDE, 2020b, p. 69–71).

4. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo principal analisar a de cálculo adotada pelo PNATE para a definição dos repasses financeiros aos municípios, com foco no modelo proposto UFG em parceria com o FNDE. Buscou-se compreender como os critérios técnicos e indicadores utilizados contribuem para a efetividade da política pública, especialmente no que se refere ao fortalecimento do acesso à educação básica em contextos de maior vulnerabilidade. Cabe destacar que, a busca por equidade do PNATE está em consonância com o debate global em relação ao desenvolvimento sustentável, tendo em vista que se alinha diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) da Agenda 2030, segundo a ONU (Organização das

Nações Unidas) (NUB, 2025). Nesse contexto, a metodologia apresentada dialoga explicitamente com o ODS 4 (Educação de Qualidade), ao garantir o acesso à escola e com o ODS 10 (Redução das Desigualdades), ao focar em uma distribuição de recursos mais justa.

A análise do novo modelo demonstrou avanços importantes ao incorporar variáveis operacionais e educacionais, organizadas segundo os princípios de equidade e meritocracia. Na prática, o ranqueamento dos municípios passou a refletir com maior precisão as reais necessidades logísticas e socioeducacionais, favorecendo uma distribuição mais justa dos recursos e incentivando melhorias na gestão educacional. Essa abordagem contribui para corrigir distorções históricas do modelo anterior e fortalece o caráter redistributivo do PNATE. Reafirma-se, por fim, que o PNATE cumpre um papel essencial na garantia do direito à educação básica e que seu aprimoramento contínuo é fundamental para assegurar a equidade no acesso escolar, contribuindo para a superação das desigualdades territoriais e sociais no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil. **CF 1998.** Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. , Pub. L. No. CF (1988).

Brasil. **Lei nº 10.880, de 9 de junho de 2004.** Institui o Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar - PNATE e o Programa de Apoio aos Sistemas de Ensino para Atendimento à Educação de Jovens e Adultos [...]. , Brasília - DF (2004).

Brasil. **Resolução/CD/FNDE nº 12, de 5 de abril de 2006.** Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). , Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo, Brasília - DF (2006).

Brasil. **Resolução/CD/FNDE nº 10, de 24 de abril de 2007.** Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). , Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo, Brasília - DF (2007).

Brasil. **Resolução/CD/FNDE nº 10, de 07 de abril de 2008.** Estabelece os critérios e as formas de transferência de recursos financeiros do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar (PNATE). , Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação; Conselho Deliberativo, Brasília - DF (2008).

Carvalho, W. L., De Sousa Leite, P., e Pereira Nascimento, H. (2016) O PROCESSO EVOLUTIVO DO TRANSPORTE ESCOLAR RURAL BRASILEIRO NO MODO RODOVIÁRIO. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, *13*(1). doi:10.5216/reec.v13i1.42400

Carvalho, W. L., Monteiro, W. D. F., Araújo, P. H. C., Medrano, R. M. A., Leite, P. D. S., e Yamashita, Y. (2024) Impacto do programa Caminhos da Escola na evasão escolar. *Caderno Pedagógico*, *21*(13), e11963. doi:10.54033/cadpedv21n13-201

Medrano, R. M. A., e Carvalho, W. L. (2021) Factors that influence the evaluation of the "Caminho da Escola" Program: An analysis based on the perception of managers, school principals and members of the social monitoring and control council. *Case Studies on Transport Policy*, *9*(4), 1677–1687. doi:10.1016/j.cstp.2021.09.002

Medrano, R. M. A., Carvalho, W. L., Yamashita, Y., e Cirino, P. H. (2021) A resource allocation model of national school transportation program for municipalities. *Case Studies on Transport Policy*, *9*(4), 1660–1671. doi:10.1016/j.cstp.2021.08.011

Nações Unidas Brasil - NUB. (2025) Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Obtido de https://brasil.un.org/pt-br/sdgs

Silva, A. R. da, e Yamashita, Y. (2010) Modelo de distribuição de recursos para o transporte escolar rural a partir dos princípios da igualdade e da equidade. *Transportes*, *18*(3). doi:10.14295/transportes.v18i3.455

UFG e FNDE. (2019) *Avaliação Nacional do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – PNATE: Avaliação de Impacto. Volume III*. Universidade Federal de Goiás (UFG) Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE).

UFG e FNDE. (2020a) *Proposta de Nova Formulação para o Repasse dos Recursos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – PNATE - Volume I*. Universidade Federal de Goiás (UFG) Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE).

UFG e FNDE. (2020b) *Proposta de Nova Formulação para o Repasse dos Recursos do Programa Nacional de Apoio ao Transporte do Escolar – PNATE - Volume II*. Universidade Federal de Goiás (UFG) Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE).

Matheus Henrique Morato de Moraes (morato@ufg.br); Lara Batista Ferreira de Lima (lara.batista@ufg.br); e Willer Luciano de Carvalho (willer_carvalho@ufg.br)

Universidade Federal de Goiás - UFG, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes, Estrada Municipal – Qd. e Área Lt. 04 - Bairro Faz. Santo Antônio. CEP: 74971-451 – Ap. de Goiânia - Goiás - Brasil

QUALIDADE DE SERVIÇO NO BRT NORTE–SUL DE GOIÂNIA: UMA ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DO USUÁRIO

João Victor Pereira Carneiro
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este artigo investiga a qualidade de serviço percebida no sistema BRT Norte–Sul de Goiânia, com foco na experiência do usuário. A partir da avaliação de múltiplos atributos, o estudo busca identificar os níveis de satisfação do usuário e verificar quais aspectos apresentam o maior desalinhamento entre a importância atribuída e o desempenho percebido, de modo a orientar a definição de prioridades no planejamento da mobilidade urbana. A metodologia adotada combina a percepção dos usuários com uma matriz analítica que cruza importância e descontentamento, gerando zonas de intervenção. Os resultados revelam um descompasso entre o que é mais valorizado e o que é efetivamente entregue pelo sistema, especialmente em atributos ligados ao tempo de viagem, lotação e conforto. Por outro lado, aspectos como acessibilidade e sociabilidade foram avaliados de forma mais positiva. A análise evidencia a necessidade de ações direcionadas que aproximem a infraestrutura instalada das expectativas cotidianas dos usuários, oferecendo suporte técnico à formulação de políticas públicas mais sensíveis à vivência urbana.

1. INTRODUÇÃO

A expansão dos sistemas BRT (*Bus Rapid Transit*) no Brasil tem sido apresentada como um avanço em mobilidade urbana, sobretudo por combinar faixas exclusivas, embarque em nível e racionalização de linhas. Ainda assim, a literatura e a experiência recente mostram que a implantação por si só não assegura a satisfação dos usuários, que seguem relatando superlotação, desconforto térmico e baixa confiabilidade (TRB, 2003). Em Goiânia, o corredor Norte–Sul, implantado em 2024 no âmbito da reestruturação da RMTC, buscou qualificar os deslocamentos entre regiões centrais e periféricas, elevando a eficiência operacional e o conforto do serviço.

Apesar dessas iniciativas, persiste um descompasso entre o desempenho técnico usualmente monitorado (velocidade comercial, *headway*, oferta de lugares) e a experiência cotidiana do passageiro. A literatura de Qualidade de Serviço (QS) indica que decisões de gestão mais efetivas emergem quando se integram parâmetros operacionais com percepções dos usuários, distinguindo o que é importante do que efetivamente satisfaz. É nessa direção que se posiciona este estudo: adota-se uma abordagem centrada no usuário para avaliar a QS do BRT Norte–Sul, tomando como foco os atributos rapidez, confiabilidade, conforto térmico, capacidade/lotação, segurança, informação, acessibilidade e sociabilidade.

Metodologicamente, emprega-se o método em seis etapas proposto por STRADLING *et al*. (2007), que mensura, para cada atributo, a importância atribuída pelo usuário e o nível de insatisfação, permitindo construir uma matriz importância × descontentamento para priorização de intervenções. Assim, o estudo contribui (i) medindo a QS a partir das percepções dos usuários em um corredor recém-implantado; (ii) identificando os atributos que combinam alto valor para o passageiro e maior déficit percebido e (iii) oferecendo um insumo prático para a gestão pública e a regulação do serviço. O objetivo é verificar se o BRT tem promovido mobilidade mais equitativa ou se reproduz desigualdades, indicando caminhos de melhoria com base em evidências.

2. MÉTODO

A pesquisa adotou amostragem não probabilística por interceptação, com cotas por ponto e por período (terminais Recanto do Bosque e Isidória; estações Av. Goiás Norte, Região Central e Setor Bueno; pico 06h–08h30, entrepico 09h–16h30 e pico 17h–19h30). O cálculo $n \geq 385$ (95% de confiança, erro de 5 p.p., $p = q = 0{,}5$) foi utilizado como referência de precisão, tendo sido realizadas $n = 400$ entrevistas válidas distribuídas conforme as cotas definidas. Não foram aplicados pesos por fluxo.

Foram avaliados oito atributos (Acessibilidade, Rapidez, Confiabilidade, Conforto térmico, Capacidade/lotação, Segurança, Informação e Sociabilidade), cada um mensurado por um item em duas dimensões: Importância e Satisfação. As respostas foram registradas em escala Likert de 5 pontos (1 = discordo totalmente; 2 = discordo; 3 = nem discordo nem concordo; 4 = concordo; 5 = concordo totalmente). Definições

operacionais: importância alta = notas 4–5; satisfação alta = notas 4–5; insatisfação = notas 1–3. A Tabela 1 apresenta as descrições de cada atributo.

Tabela 1: Atributos avaliados na qualidade de serviço

Atributo	Descrição
Acessibilidade	distância até a estação; barreiras físicas
Rapidez	tempo total da viagem; velocidade percebida
Confiabilidade	regularidade; aderência à tabela horária
Conforto térmico	ventilação; temperatura interna
Capacidade/lotação	espaço para sentar ou permanecer em pé
Segurança	pessoal e viária (iluminação; monitoramento)
Informação	sinalização; atualização em tempo real
Sociabilidade	ambiência e interação no veículo/estação

Para cada atributo a, o Índice de Descontentamento é definido como $D_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 1\,[Importância_{ia} \geq 4 \wedge Satisfação_{ia} \leq 3]$, correspondente à proporção de usuários que atribuem alta importância ao atributo e, simultaneamente, não estão satisfeitos com seu desempenho. Para apresentação gráfica, o índice é expresso em percentual ($D_a \times 100$).

Para fins de priorização, construímos a matriz importância × descontentamento (Figura 1), que classifica os oito atributos em quatro quadrantes a partir de cortes nas médias globais de Importância alta (%) e de Descontentamento (%). Adotam-se $\bar{I} = 75{,}5\%$ (Importância alta) e $\bar{D} = 47{,}0\%$ (Descontentamento) como limiares, definindo: Zona 1 (alta importância/alto descontentamento, ação imediata), Zona 2 (baixa importância/alto descontentamento, atenção estratégica), Zona 3 (alta importância/baixo descontentamento, manter) e Zona 4 (baixa importância/baixo descontentamento, baixa prioridade). Os limiares utilizados na Figura 1 não são arbitrários, correspondem às médias amostrais calculadas a partir dos oito atributos.

Entre as limitações do estudo, destacam-se o possível viés de auto seleção dos respondentes e a ausência de dados em situações atípicas, como eventos extremos ou chuvas intensas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cada participante avaliou oito atributos da Qualidade de Serviço: Acessibilidade, Rapidez, Confiabilidade, Conforto térmico, Capacidade/lotação, Segurança, Informação e Sociabilidade, registrando Importância e Satisfação em escala Likert de 5 pontos (1 = discordo totalmente; 5 = concordo totalmente). Para cada atributo a, definimos I_a como a proporção de respostas com Importância alta (notas 4–5) e S_a como a proporção com Satisfação alta (notas 4–5). O Descontentamento é $D_a = P(Importância \geq 4 \wedge Satisfação \leq 3)$ e é apresentado em percentual.

Tabela 2: Importância, satisfação e descontentamento por atributo de qualidade no BRT Norte–Sul

Atributo	Importância alta (%)	Satisfação alta (%)	Descontentamento (%)	Zona*
Rapidez	88	35	60	1
Confiabilidade	84	40	52	1
Conforto térmico	80	30	63	1
Capacidade/lotação	90	25	72	1
Informação	60	20	67	2
Segurança	85	50	41	3
Acessibilidade	72	65	10	4
Sociabilidade	45	40	11	4

*Zona 1 = alta importância/alto descontentamento; Zona 2 = baixa importância/alto descontentamento; Zona 3 = alta importância/baixo descontentamento; Zona 4 = baixa importância/baixo descontentamento.

A Tabela 2 apresenta, para cada atributo, as proporções de Importância alta (4–5) e de Satisfação alta (4–5), bem como o Índice de Descontentamento (D). Para cada atributo a, o descontentamento é $D_a = P(Importância \geq 4 \wedge Satisfação \leq 3)$ é apresentado em percentual $(D_a \times 100)$. Quando apenas percentuais marginais estão disponíveis, utilizamos a aproximação $\widehat{D}_a \approx I_a \cdot (1 - S_a)$, reconhecendo tratar-se de estimativa.

	Descontentamento Alto (≥ 47.0%)	Descontentamento Baixo (< 47.0%)
Importância Alta (≥ 75.5%)	**Zona 1 [Ação imediata]** Rapidez Confiabilidade Conforto térmico Capacidade / lotação	**Zona 3 [Manter]** Segurança
Importância Baixa (< 75.5%)	**Zona 2 [Atenção estratégica]** Informação	**Zona 4 [Baixa prioridade]** Acessibilidade Sociabilidade

Figura 1: Atributos por zona na matriz Importância × Descontentamento.
Cortes: $\bar{I} = 75{,}5\%$; $\bar{D} = 47{,}0\%$

Os atributos da Zona 1 apresentam elevada importância e elevado descontentamento, configurando os pontos mais críticos do sistema e exigindo ações urgentes. Intervenções como reforço de frota, reorganização da oferta, climatização dos veículos e aumento da regularidade devem ser priorizadas, ainda que condicionadas por restrições operacionais e financeiras. Os problemas dessa zona estão associados a custos elevados, o que ajuda a explicar o hiato entre expectativa e desempenho. A solução para superlotação e baixa frequência, por exemplo, implicaria ampliar frota e contratar motoristas, impactando diretamente dois dos maiores componentes de custo: aquisição de veículos e despesas com pessoal (ANTP, 2017).

No caso do Conforto Térmico, essencial em um clima como o de Goiânia, a instalação de ar-condicionado eleva significativamente o consumo de combustível. Estudos indicam que ônibus convencionais climatizados consomem cerca de 25% a mais que os não climatizados e, no caso de articulados, o gasto pode quase dobrar (COPPE/UFRJ, 2016). Já os atributos de Rapidez e Confiabilidade dependem de infraestrutura segregada, manutenção preventiva e sistemas inteligentes, todos de alto custo e muitas vezes inviáveis sem subsídio público. A literatura demonstra que os custos do transporte coletivo são fortemente determinados por insumos como frota, combustível e mão de obra, pressionando diretamente o valor da tarifa (ANTP, 2017). Além disso, a tarifa pública, concebida para garantir modicidade, frequentemente não cobre os custos reais, obrigando o poder público a aportar subsídios para manter a sustentabilidade do serviço (TCE-SC, 2013).

Assim, o descompasso identificado não se resume à diferença entre operadores e usuários, mas reflete a tensão estrutural do transporte público urbano, que deve equilibrar qualidade e sustentabilidade financeira em um contexto de custos crescentes e receitas limitadas.

No quadrante de atenção estratégica (Zona 2), destaca-se o atributo Informação, que combina baixa importância relativa com descontentamento elevado (≈ 67%). Essa configuração sugere que, embora os usuários não atribuam a Informação o mesmo peso de atributos críticos, falhas em sinalização, previsibilidade de horários e comunicação de incidentes amplificam a frustração no dia a dia. São recomendáveis intervenções de baixo custo e rápida implementação, por exemplo, atualização de painéis em tempo real, padronização de mensagens sonoras/visuais, integração com aplicativo e protocolos claros para comunicação de atrasos, capazes de reduzir o descontentamento sem competir por recursos com as prioridades da Zona 1.

No quadrante de manutenção (Zona 3), encontra-se Segurança, com alta importância e descontentamento

moderado (41%). Ainda que não demande ação estrutural imediata como os itens da Zona 1, a Segurança é um pilar de confiança. Deteriorações tendem a repercutir rapidamente na percepção do serviço. Recomenda-se preservar o patamar atual com medidas consistentes, como: melhoria de iluminação, vigilância por câmeras, presença de agentes em pontos e horários críticos e protocolos de resposta visível a ocorrências. Complementarmente, vale monitorar indicadores de sensação de segurança e ocorrências registradas, para evitar migração do atributo a uma zona mais crítica.

Por fim, a Zona 4 (baixa prioridade) reúne Acessibilidade e Sociabilidade, ambas com baixa importância e baixo descontentamento. Aqui a diretriz é manutenção preventiva: rotinas de conservação, pequenos reparos e checagens periódicas impedem que problemas pontuais escalem. Mesmo sendo itens de menor prioridade no agregado, convém observar subgrupos específicos (ex.: pessoas idosas, com mobilidade reduzida) e promover micro intervenções de alto impacto para esses públicos, mantendo o equilíbrio entre custo e benefício.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao incorporar variáveis relacionais e contextuais à análise, foi possível ultrapassar os parâmetros operacionais tradicionais e aproximar a leitura da experiência cotidiana do passageiro. Os resultados evidenciam uma contradição estrutural: os atributos mais valorizados (rapidez, confiabilidade, conforto térmico e capacidade/lotação), são precisamente aqueles onde se concentram os maiores focos de descontentamento (Zona 1). Esse descompasso não decorre apenas de diferenças de percepção entre operadores e usuários, mas espelha restrições financeiras e operacionais que limitam, no curto prazo, melhorias em aspectos críticos como ampliação de frota, climatização e regularidade/confiabilidade do serviço. Trata-se do dilema central do transporte coletivo brasileiro: conciliar qualidade e sustentabilidade econômica em um contexto de custos ascendentes e receitas comprimidas.

A classificação por zonas, baseada nos cortes amostrais $\bar{I} = 75{,}5\%$ (Importância alta) e $\bar{D} = 47{,}0\%$ (Descontentamento), demonstrou o potencial do método como ferramenta diagnóstica e estratégica para priorização. Na Zona 1 (ação imediata), concentram-se os atributos que entregam maior retorno social por unidade de esforço investido. Na Zona 2 (atenção estratégica), como é o caso de Informação, intervenções ágeis e de baixo custo (sinalização, previsibilidade e comunicação em tempo real) podem reduzir rapidamente o atrito percebido sem competir com investimentos estruturais. Na Zona 3 (manter), Segurança requer preservação do patamar atual e monitoramento atento e, na Zona 4 (baixa prioridade), Acessibilidade e Sociabilidade pedem manutenção preventiva e micro ajustes focalizados em grupos específicos (idosos, pessoas com mobilidade reduzida), evitando retrocessos.

Sob essa ótica, a Qualidade de Serviço (QS) opera como indicador de justiça espacial, afinal, permite avaliar se o sistema reproduz desigualdades (ao concentrar déficits nos atributos mais valiosos para a população usuária) ou se contribui para mitigá-las ao orientar investimentos para onde geram maior bem-estar. A matriz importância × descontentamento, portanto, não é apenas um retrato descritivo: ela explicita trade-offs, hierarquiza prioridades e subsidiará decisões regulatórias (metas de desempenho, incentivos, fiscalização por indicadores). É importante reconhecer limitações: (i) desenho transversal (não capta dinâmicas ao longo do tempo); (ii) amostragem por interceptação (potencial viés de auto seleção) e (iii) em cenários sem microdados, o uso da aproximação $\widehat{D}_a \approx I \cdot (1 - S)$ para descontentamento. Essas restrições, contudo, são mitigáveis. Recomenda-se instituir ondas trimestrais de monitoramento, aplicar cortes-robustos (medianas) como checagem de sensibilidade, testar ponderações por fluxo/linha para cortes $\bar{I}_\omega$ e $\bar{D}_\omega$ e segmentar leituras por ponto/horário e perfil de usuário.

Em síntese, embora o BRT represente avanço frente ao modelo convencional, sua efetividade permanece condicionada à capacidade de alinhar investimentos às percepções dos usuários, incorporar tecnologias de informação e assegurar sustentabilidade financeira. A adoção sistemática da matriz importância × descontentamento, com metas pactuadas por zona e painéis públicos de indicadores (I, S, D), oferece um caminho pragmático para consolidar uma mobilidade urbana pública, equitativa e orientada à qualidade de vida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). **Custos dos serviços de transporte público por ônibus: método de cálculo**. Coord. Antonio Luiz Mourão Santana; Coord. técnica Maria Olívia Guerra Aroucha. São Paulo: ANTP, 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). **Custos dos serviços de transporte público por ônibus elétrico: metodologia de cálculo e parâmetros**. Coord. técnica Fernando Fleury Filho; Rodrigo Eduardo Dias Verroni. São Paulo: ANTP, 2023.

CALDEIRA, T. P. R. **Cidade de muros: crime, segregação e cidadania em São Paulo**. São Paulo: Editora 34, 2000.

CUNHA, D. F.; ZECHIN, P. D. A. V.; MELO, D. C. P. **Estrutura espacial, mobilidade e transporte público: o caso do BRT Norte-Sul da Grande Goiânia**. *Revista de Direito da Cidade*, v. 14, n. 3, p. 1798–1823, 2022. DOI: https://doi.org/10.12957/rdc.2022.59193.

FALAVIGNA, D. G.; SILVA, A. O.; OLIVEIRA, C. S. **Análise da percepção dos usuários sobre a qualidade do transporte coletivo urbano: uma revisão sistemática**. *Revista Transporte & Desenvolvimento*, v. 2, n. 1, p. 1–18, 2020.

GONÇALVES, D. N. S.; QUEIROZ, R. C.; D'AGOSTO, M. A. (Coord.). **Comparativo de consumo de combustível entre ônibus equipados com aparelhos de ar condicionado e ônibus convencionais**. Relatório final. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2016.

HARVEY, D. **Cidades rebeldes: do direito à cidade à revolução urbana**. São Paulo: Martins Fontes, 2014.

ITDP – INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY. **Ferramenta de avaliação de potencial de DOT – Desenvolvimento Orientado ao Transporte**. São Paulo: ITDP Brasil, 2016. Disponível em: https://itdp.org/wp-content/uploads/2017/06/2016_itdpBR_TOD-potential-assessment-tool_ferramenta-dots_Portuguese.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

MARICATO, E. **O impasse da política urbana no Brasil**. Petrópolis: Vozes, 2011.

MARTENS, K. **Transport justice: designing fair transportation systems**. New York: Routledge, 2016.

NEVES, J. L. A.; PEREIRA, S. R.; PORTUGAL, L. N. **Proposição de um modelo conceitual para avaliação da qualidade de serviço do transporte coletivo urbano**. *Revista Transportes*, v. 25, n. 1, p. 104–117, 2017. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v25i1.1182.

OLIVEIRA, C. S.; SILVA, A. O.; CARVALHO, M. G. **Métodos para avaliação da qualidade do transporte coletivo urbano sob a perspectiva dos usuários: uma revisão bibliográfica**. *Revista Transporte & Desenvolvimento*, v. 1, n. 1, p. 1–18, 2019.

RMTC – REDE METROPOLITANA DE TRANSPORTE COLETIVO. **Sistema BRT Norte-Sul: informações operacionais**. Goiânia: RMTC, 2024. Disponível em: https://sistemabrt.rmtcgoiania.com.br. Acesso em: 13 jun. 2025.

ROLNIK, R. **Guerra dos lugares: a colonização da terra e da moradia na era das finanças**. São Paulo: Boitempo, 2015.

STAUB, E. D. **Regulação do serviço público de transporte coletivo urbano: análise da metodologia GEIPOT**. 2013. Monografia (Especialização em Controle Externo nas Concessões de Serviços Públicos) – Fundação Escola de Governo ENA, Tribunal de Contas do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

STRADLING, S. G. *et al*. **Public attitudes to transport: interpreting the evidence**. Edinburgh: Scottish Executive Social Research, 2007.

TRB – TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Transit Capacity and Quality of Service Manual**. 2. ed. Washington, D.C.: TRB, 2003.

VASCONCELLOS, E. A. **Mobilidade urbana e justiça social**. São Paulo: Annablume, 2021.

WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Guia para inclusão do Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável no planejamento urbano**. São Paulo: WRI Brasil, 2018.

João Victor Pereira Carneiro (jo.carneiro@yahoo.com)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências Sociais, Rua Jacarandá – Chácaras Califórnia, Goiânia – GO, Brasil

SETE E A TRANSFORMAÇÃO INSTITUCIONAL: MODERNIZAÇÃO, PARTICIPAÇÃO SOCIAL E DESAFIOS NA GESTÃO DO TRANSPORTE ESCOLAR

Willer Luciano Carvalho[1], **Marcos Paulino Roriz Junior**[1], **Yaeko Yamashita**[2]
[1]Universidade Federal de Goiás [2]CECATE-CO

RESUMO
O artigo analisa a implementação do Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE) como ferramenta gratuita e modular para modernizar a gestão pública municipal. O SETE facilita o planejamento, monitoramento e controle do transporte escolar, promovendo transparência, eficiência, padronização de dados e participação social. Identificam-se benefícios como otimização de rotas e redução de custos, mas também desafios em capacitação, integração e infraestrutura. Conclui-se que o SETE representa uma transformação institucional, alinhada à e-governança e à garantia do direito à educação

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Garantir a entrada e a permanência dos alunos nas escolas públicas brasileiras, especialmente nas áreas rurais e de fronteira, é altamente condicionado pela adequação, segurança e inclusão do transporte escolar. A Constituição Federal de 1988 e a Lei de Diretrizes e Bases da Educação (Lei nº 9.394/96) estabeleceram o direito ao transporte escolar como uma condição fundamental para a democratização da educação no país e enfatizaram a responsabilidade de estados e municípios na gestão desse serviço elementar (Brasil, 1988; Brasil, 1996).

No entanto, a organização do transporte escolar é uma tarefa difícil devido a importantes problemas estruturais: falta de padronização, restrições econômicas, dificuldades operacionais e a necessidade de articulação entre os diversos setores e agentes governamentais, que acabam por ameaçar a qualidade e regularidade do serviço diário para os alunos. Nessa situação, a atualização dos sistemas de gestão é uma necessidade. Surge então como solução o Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE), desenvolvido pelo Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar da Universidade Federal de Goiás (Cecate/UFG) em parceria com o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). O objetivo foi organizar o sistema, criar transparência e eficiência administrativa e gerenciar frotas, rotas, motoristas e alunos. Também facilita a prestação de contas e o controle social do desempenho dos recursos alocados publicamente, por meio da articulação da Lei 10.500, culminando no Sistema de Gerenciamento do Transporte Escolar (SETE).

O fato de ter sido adotado pelos municípios no Brasil indica que está avançando na aplicação do governo eletrônico para facilitar a entrada de dados, criar relatórios automatizados e melhorar a participação social dos atores no processo de tomada de decisões sobre o transporte (Cecate/UFG, 2023; FNDE, 2023). O objetivo deste artigo é examinar os mecanismos de participação e controle social postos em prática pela SETE, enfatizando sua contribuição para a promoção da governança eletrônica e o aumento da responsabilidade na administração municipal do transporte escolar.

Em termos teóricos, a discussão sobre governança eletrônica diz respeito a como ela permite ao estado ser mais transparente, prestar serviços eficientes e garantir a participação das pessoas no governo, contrário à sua lógica atual de disponibilização de serviços e, ao fazê-lo, aproximar o estado, ou pelo menos seu núcleo institucional, da sociedade civil (Heeks, 2006; Dawes, 2008). De uma forma mais ampla, a governança colaborativa foca na construção conjunta de soluções políticas para problemas públicos complexos, o que exige projetos institucionais que reúnam diversos atores do governo e da sociedade na cooperação e colaboração em torno das decisões públicas (Ansell & Gash, 2008).

Conforme estipulado na Constituição Federal, a participação social emerge em uma série de locais institucionais, entre os quais estão conselhos de educação e fóruns locais que não são apenas instrumentos de controle social nas políticas públicas, particularmente no monitoramento da alocação de recursos e na avaliação da qualidade dos serviços prestados (Souza, 2015; Avritzer, 2009).

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

O estudo desenvolveu uma pesquisa exploratória e qualitativa focada na compreensão da metodologia de

adoção e uso do SETE (Gestão Eletrônica do Transporte Escolar) nos municípios brasileiros, que tem a tela de entrada no sistema operacional *Microsoft Windows* na Figura 1. O universo do estudo incluiu 31 municípios pertencentes a diferente regiões do país, com um mínimo de quatro em cada região, permitindo a obtenção de diversos ambientes administrativos, sociais e de infraestrutura, promovendo, assim, a solidez e generalização dos dados.

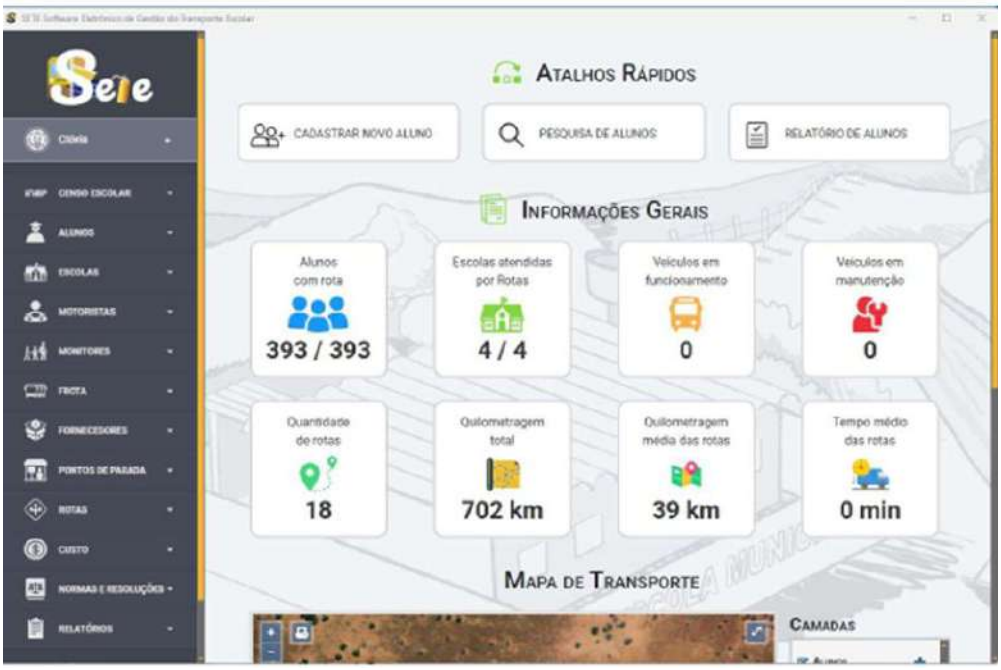


Figura 1: Tela principal do SETE

A análise se baseou em três grandes fontes de dados. Foram distribuídos formulários aos gestores municipais responsáveis pelo transporte escolar para descrever o uso, os problemas operacionais e as oportunidades de melhorias no sistema. Em segundo lugar, utilizou-se relatórios da instituição, seus regulamentos e documentos do SETE para apoiar e validar os dados coletados com os gestores. Por fim, foi empregado a triangulação de dados e a análise dos dados dos formulários, documentos e observações dos pesquisadores; este processo pode aumentar a confiabilidade das descobertas, pois pode ajudar a detectar convergências e divergências entre fontes contextuais.

A análise foi complementada por quatro eixos gerais: funções técnicas e operacionais da SETE, capacidade do sistema em produzir informações para a tomada de decisão, mecanismos de transparência e controle social disponíveis, e o alinhamento do SETE com os princípios da governança eletrônica. Em relação a cada um dos eixos, o objetivo foi verificar como o SETE era de fato utilizado, que tipo de dados produzia, de que forma o sistema favorecia a transparência e a participação social, e se o uso da ferramenta era mais do que informatização ou se a ferramenta havia realmente favorecido a inovação, inclusão digital e transformação institucional na administração pública.

A análise dos dados qualitativos foi consolidada a fim de permitir a comparação entre eixos analíticos, entre municípios, integração e validação cruzada em padrões de relacionamento, tendências e desafios dos municípios no momento da adoção do SETE.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE A MODERNIZAÇÃO DO TRANSPORTE ESCOLAR

A operacionalização do SETE nos municípios estudados (Figura 2) apresentou mecanismos avançados de transparência e participação social, bem como desafios persistentes que devem ser endereçados pelos gestores públicos. O acesso da comunidade e a responsabilização do SETE foram facilitados pela divulgação de informações de um banco de dados sobre rota, frota, alunos e custos de transporte escolar, que, por sua vez, informaram o controle social (FNDE, 2024). Essa concentração de informações em um único sistema

proporcionou aos gestores, e à sociedade como um todo, um acesso mais fácil a dados que antes eram dispersos ou de difícil acesso, conforme indicado nas diretrizes de e-gov (HEEKS, 2006; MEIJER; CURTIN; HILLEBRANDT, 2012). Os relatórios para os municípios participantes (PMs) indicam que os dados foram usados como parte do sistema de supervisão interna (no governo) e externa (responsabilização), aprimorando, assim, a responsabilização e o controle social.

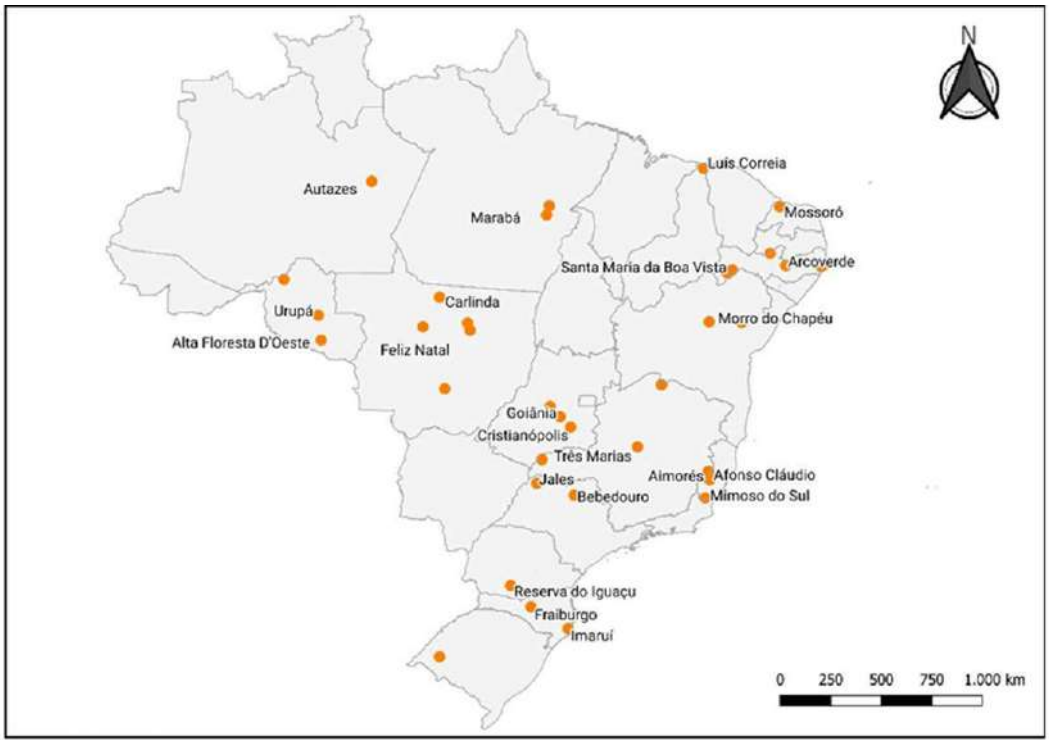


Figura 2: Municípios Piloto do SETE

A inclusão de canais para sugestões, críticas e monitoramento de serviço ajudou que pais, estudantes e administradores estiveram mais envolvidos na gestão do transporte escolar, aprimorando a participação comunitária e a inclusão digital (FNDE, 2024). O SETE favoreceu a participação social fornecendo um sistema com interface amigável e de fácil operação, promovendo a participação na melhoria do serviço, um princípio de governança colaborativa (SOUZA, 2002; HEEKS, 2006).

Mas existem obstáculos assim como vantagens. Deficiências nos recurso tecnológicos, como falta de conectividade e equipamentos obsoletos, foram fatores que dificultaram a plena implementação do sistema por alguns municípios. O treinamento de gestores também apresentou um aspecto crítico: a redução de pessoal e a rotatividade de pessoal dificultaram a atualização e manutenção da qualidade dos dados de registro (FNDE, 2024). Problemas com interoperabilidade, interface com outros sistemas estaduais e municipais, e com dados de terceiros foram comuns, afetando a completude, precisão e confiabilidade dos dados. Há também resistência à participação comunitária em um grande número de municípios, especialmente onde a cultura de participação é incipiente (SOUZA, 2002).

Entre as vantagens da adoção do SETE, os aspectos reforçados são a responsabilização, que se torna mais transparente e responsável, e o apoio ao processo de tomada de decisão baseado em dados reais e atualizados (FNDE, 2024; HEEKS, 2006). Os gestores declararam níveis elevados de confiança pública nos serviços públicos, à medida que o acompanhamento de ações e custos se tornou mais transparente. O sistema também teve o efeito de otimização de rotas e economia de custos de alocação de recursos, o que melhorou os benefícios dos alunos e de suas famílias.

Os municípios que avançaram na participação social após o SETE, apresentaram impactos significativos. Um exemplo é um município do Nordeste que, após capacitar gestores e promover extensivamente os canais de comunicação do sistema, viu um importante aumento na quantidade de sugestões e reclamações da

comunidade. Isso possibilitou ajustes rápidos de rotas e serviços. Proporcionando um nível mais alto de satisfação do usuário. Outro exemplo foi nos municípios do Sul, onde a relação estabelecida entre a SETE e o conselho escolar contribuiu para as consolidações do controle social e para a legitimação das decisões produzidas. Essas experiências demonstram que, quando articulado com estratégias de engajamento e qualificação, o SETE pode funcionar como uma força motriz para transformar a gestão de públicos municipais (FNDE, 2024; SOUZA, 2002).

As conclusões da pesquisa validam o papel do SETE como uma ferramenta de governança eletrônica que aprimora a transparência, a participação social e a eficiência na gestão do transporte escolar. No entanto, o sucesso do sistema depende do enfrentamento de desafios estruturais e da adoção de planos mais amplos de participação comunitária e treinamento de gestores (FNDE, 2024; HEEKS, 2006).

4. ASPECTOS CONCLUSIVOS

O Sistema Eletrônico para a Gestão do Transporte Escolar (SETE) vem se tornando um marco na modernização da gestão pública municipal no Brasil, com mais transparência, eficiência e participação social em uma área essencial como o transporte escolar. O SETE é um software gratuito e modular que atende a diferentes realidades administrativas, sendo capaz de realizar desde a digitalização básica de mapas até o planejamento de rotas georreferenciadas, otimização de rotas e redução de custos operacionais, aumentando a padronização dos dados, a expansão do controle social e a colaboração com o Governo Eletrônico (BRASIL, 1988; FNDE, 2024; HEEKS, 2006).

Apesar de terem ocorrido evoluções detalhadas, persistem barreiras importantes, incluindo: a necessidade de capacitação dos gestores; a integração com outros sistemas; atualização do cadastro e limitações de infraestrutura tecnológica. Superar essas barreiras serão essenciais para que o SETE atinja seu potencial e contribua para a melhoria da qualidade, segurança e acesso universal ao transporte escolar em todo o país (ARRETCHE, 2002; COSTA; CASTRO, 2018; FNDE, 2024).

Sugere-se, também, o investimento permanente na capacitação de gestores, o aumento do número de canais de participação social e a melhoria da interoperabilidade do SETE com outras plataformas, reforçando a cultura de transparência e a colaboração na administração pública. Considerando a modularidade e flexibilidade do sistema, o SETE surge como uma política estratégica na transformação das instituições e para garantir o direito à educação, caso haja investimentos na capacitação, infraestrutura e mobilização social (ABRUCIO, 2010; SOUZA, 2002; FNDE, 2024).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) pelo apoio institucional e essenciais à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRUCIO, Fernando Luiz. A coordenação intergovernamental e o papel das burocracias estaduais na educação. Educação & Sociedade, v. 31, n. 113, p. 15–39, 2010.

ARRETCHE, Marta. Federalismo e políticas sociais no Brasil: problemas de coordenação e autonomia. São Paulo em Perspectiva, v. 16, n. 2, p. 12–22, 2002.

AVRITZER, L. Democracia e participação: desafios e perspectivas. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Diário Oficial da União, Brasília, 23 dez. 1996.

CECATE/UFG. Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE): manual do usuário. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2023.

COSTA, Marlucy Paranhos da; CASTRO, Jorge Abrahão de. Políticas educacionais e desigualdades regionais no Brasil: uma análise do Fundeb. Revista Brasileira de Estudos de População, v. 35, n. 1, p. 1–22, 2018.

DAWES, S. S. Governance in the digital age: a research and action framework for an uncertain future. Government Information Quarterly, v. 25, n. 4, p. 481-494, 2008.

FNDE. Relatório anual de gestão do transporte escolar. Brasília: Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, 2023.

FNDE. Relatório final do Piloto do SETE – Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar. 2024.

HEEKS, Richard. Implementing and Managing eGovernment: An International Text. London: SAGE Publications, 2006.
MEIJER, Albert; CURTIN, Deirdre; HILLEBRANDT, Maarten. Open Government: Connecting Vision and Voice. International Review of Administrative Sciences, v. 78, n. 1, p. 10–29, 2012.
SOUZA, Celina. Governos e sociedades locais em contextos de pobreza: uma análise da descentralização da política de educação no Brasil. Revista de Administração Pública, v. 36, n. 2, p. 211–239, 2002.
SOUZA, C. Participação social e controle social na política pública brasileira. Revista Brasileira de Ciências Sociais, v. 30, n. 88, p. 1-20, 2015.

Willer Luciano Carvalho (willer_carvalho@ufg.br), Marcos Paulino Roriz Junior (marcosroriz@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes, Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio CEP: 74971-451, Aparecida de Goiânia - GO, Brasil.
Yaeko Yamashita (yaeko@gmail.com)
Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil)

Políticas Públicas de Transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

O IMPACTO DO SUBISÍDIO PÚBLICO NA TARIFA DO TRANSPORTE COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS EM RIO VERDE-GO

Fernanda Geovanna Alves da Silva Martins[1], Gustavo Henrique Almeida Quirino[1], Rafael Pomar Schmidt[1], Philippe Barbosa Silva[1], Magaly Natalia Pazzian Vasconcellos Romão[2]
[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano; [2]Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

RESUMO
O presente trabalho analisa o impacto do subsídio municipal na precificação da tarifa do transporte público urbano de Rio Verde-Goiás. A análise fundamenta-se na aplicação do método NEC(Núcleo de Estudo das Cidades) (Ferraz et al., 2024), aplicada sobre os dados públicos do Processo Licitatório nº 011/2022, com os índices de custo atualizados para o período de janeiro a abril de 2025. Os resultados demonstram que o subsídio é o componente majoritário no custeio da operação, representando, em média, 79,22% do Custo Mensal Total do sistema e atingindo um pico de 80,54%. Evidenciou-se que o aporte municipal é o fator determinante que viabiliza a manutenção da tarifa pública em R$ 2,00, valor significativamente inferior à tarifa técnica calculada, que flutua mensalmente. Conclui-se que o subsídio transcende sua função de mero equilíbrio financeiro, consolidando-se como um instrumento estratégico e vital de política pública de mobilidade urbana. Portanto, o estudo afirma que o subsídio é um investimento essencial que garante a modicidade tarifária, amplia o acesso da população e fomenta um ciclo virtuoso de valorização do transporte coletivo, assegurando a sustentabilidade econômico-financeira do sistema.

1. OBJETIVO

O objetivo central do trabalho é analisar o impacto do subsídio concedido pelo Município de Rio Verde-Goiás na precificação da tarifa de transporte público urbano, mediante a utilização do método NEC, proposto por Ferraz et al. (2024), e a partir do estudo e atualização dos índices variáveis presente no Processo Licitatório nº 011/2022 (PMRV, 2025) para os meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2025.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho, configurado como um estudo de caso, investigou a estrutura de custos e a formação do preço da tarifa do transporte coletivo urbano em Rio Verde-Goiás. Localizada no sudoeste goiano, Rio Verde é a quarta maior cidade do estado, com uma população estimada, em 2024, de 238 mil habitantes, também como uma potência do agronegócio, cujo dinamismo econômico se refletia em uma renda per capita de R$ 65.948,14 em 2021 (IBGE, 2025).

A metodologia utiliza o método NEC, desenvolvido e aprimorado pela EESC-USP, para calcular custos e tarifas do transporte coletivo urbano. Diferente de métodos anteriores, como o GEIPOT, incorpora despesas de administração, equipamentos e cartões de transporte, oferecendo uma análise mais atualizada (Ferraz et al., 2024). Em Rio Verde, essa ferramenta subsidia o cálculo do repasse municipal à empresa operadora, sendo essencial para o equilíbrio econômico-financeiro do sistema. O estudo aplica o método com base nos índices variáveis de custo do Processo Licitatório nº 011/2022 e nos parâmetros fixos definidos pela empresa vencedora, considerando o primeiro quadrimestre de 2025.

Quanto aos dados utilizados no método NEC, os valores relativos ao preço médio mensal do combustível, Diesel S-10, foram obtidos através da Síntese Semanal do Comportamento dos Preços dos Combustíveis, boletim publicado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP,2025). Os dados de salários e benefícios pagos aos motoristas e fiscais/despachantes, bem como os preços relativos ao pneu utilizado pela frota de micro-ônibus (modelo 215/75R17) e o custo relacionado à reforma dele, foram levantados juntos à empresa concessionária, operante da concessão no município.

A quilometragem mensal percorrida pela frota, o número de micro-ônibus que compõem a frota do serviço municipal de transporte público e quantos desses são utilizados no horário de pico, dados necessários ao método, foram obtidos a partir das informações disponibilizadas pela Secretaria de Desenvolvimento e Mobilidade Urbana da Prefeitura Municipal de Rio Verde-Goiás. Vale ressaltar que, a quilometragem mensal percorrida pela operação varia de acordo com a programação e é impulsionada pela quantidade de dias úteis durante o mês. Além disso, desde o processo licitatório foram acrescidos sete micro-ônibus na frota em operação, passando de 25 para 32 micro-ônibus em atividade nos meses levantados.

Em síntese, a aplicação da planilha NEC, alimentada com os custos fixos do processo licitatório e os custos variáveis atualizados, permitiu calcular o custo operacional total do sistema para os meses de referência. A partir desse valor, deduziu-se a receita gerada pelos passageiros pagantes, determinando-se assim o montante do subsídio arcado pelo Poder Público Municipal. Este procedimento é fundamental para a etapa final da análise: a quantificação do impacto real desse subsídio sobre a tarifa técnica e, por extensão, sobre o valor final efetivamente pago pelo cidadão usuário do serviço de transporte coletivo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível observar na Tabela 1, as composições de custos (fixos e variáveis) e os índices utilizados para o cálculo do custo mensal total do serviço de transporte público urbano para cada um dos meses levantados, a partir da utilização da planilha NEC.

Tabela 1: Composições e índices utilizados na pesquisa

Categoria	Insumo/Índice	Licitação	Janeiro/2025	Fevereiro/2025	Março/2025	Abril/2025
Combustível	Consumo de combustível	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
	Preço do Combustível	R$ 5,78	R$ 6,18	R$ 6,46	R$ 6,38	R$ 6,26
	Quilometragem mensal percorrida pela frota	181650	197451	179261	197292	196130
Lubrificantes	Fator lubrificantes	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Rodagem	Preço do pneu	R$ 750	R$ 1.099,21	R$ 1.099,21	R$ 1.099,21	R$ 1.099,21
	Preço da reforma	R$ 350	R$ 445	R$ 445	R$ 445	R$ 445
	Número de reformas	2	2	2	2	2
	Número de pneus	6	6	6	6	6
	Duração total de pneus	85000	85000	85000	85000	85000
Peças e acessórios	Fator peça e acessórios	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Capital	Valor do ônibus novo	R$ 250.000	R$ 250.000	R$ 250.000	R$ 250.000	R$ 250.000
	Tipo de ônibus	2	2	2	2	2
	Idade do ônibus	0	1	1	1	1
	Taxa de remuneração	15	15	15	15	15
	Número de ônibus na frota	25	32	32	32	32
	Valor do ônibus novo básico	R$ 250.000	R$ 250.000	R$ 250.000	R$ 250.000	R$ 250.000
Pessoal	Salário mensal dos motoristas	R$ 1.993	R$ 2.000	R$ 2.000	R$ 2.000	R$ 2.000
	Índice de motoristas por ônibus	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	Salário mensal dos colaboradores	0	0	0	0	0
	Índice de cobradores por ônibus	0	0	0	0	0
	Salário mensal dos fiscais/despachantes por ônibus	R$ 1.448	R$ 1.700	R$ 1.700	R$ 1.700	R$ 1.700
	Índice de fiscais/despachantes por ônibus	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Encargos sociais	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55
	Fator pessoal de manutenção	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Fator pessoal de administração	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Número de ônibus em operação no pico	20	30	30	30	30
	Valor total mensal dos benefícios	R$ 58.500	R$ 142.100	R$ 147.000	R$ 147.000	R$ 147.000
Administração	Fator despesas administrativas	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Tributos	Taxa de tributos	5%	5%	5%	5%	5%

Na Tabela 2 é apresentado o quantitativo ponderado da quantidade total de passageiros do sistema mediante aos tipos de usuários, sendo eles pagantes, estudantes (50% da tarifa) e idosos, pessoas com deficiência e cartões sociais (gratuidade). Além disso, é possível observar o número de passageiros equivalentes — que é a proporção de passageiros que devem pagar a tarifa para amortizar o valor pagos pelos demais tipos de usuários — obtidos através do método NEC.

Tabela 2: Dados sobre passageiros

Categoria	Descrição	Licitação	Janeiro/2025	Fevereiro/2025	Março/2025	Abril/2025
Passageiros	Número mensal total de passageiros	120000	186291	214848	218862	224334
	% de passageiros que pagam a tarifa A integral	100	54,41	46,63	49,43	48,4
	% de passageiros que pagam 50% da tarifa	0	8,32	11,96	14,13	13,82
	% de passageiros que pagam 0% da tarifa	0	37,27	41,41	36,43	37,77
	Número mensal de passageiros equivalentes	120000	109111	113032	123646	124079

Por fim, mediante a Tabela 3 pode se observar os valores relativos aos custos mensais total (CMU) — custo geral da operação — e para os passageiros (CMP) — custo arrecadado junto aos passageiros que utilizaram o sistema de transporte no mês. Da diferença entre o CMU e do CMP tem-se o valor mensal do subsídio a ser arcado pela Prefeitura Municipal.

Tabela 3: Valores relativos aos custos mensais e tarifas praticadas

Custos	Licitação	Janeiro/2025	Fevereiro/2025	Março/2025	Abril/2025
Custo mensal total	R$ 839.811,04	R$ 1.121.306,75	R$ 1.113.234,56	R$ 1.149.459,52	R$ 1.139.895,22
Número mensal de passageiros equivalentes	120000	109111	113032	123646	124079
Índice de passageiros por quilômetro total	0,66	0,94	1,2	1,11	1,14
Índice de passageiros por quilômetro equivalente	0,66	0,55	0,63	0,63	0,63
Custo mensal para os passageiros	R$ 339.811,04	R$ 218.181,75	R$ 226.434,56	R$ 247.259,52	R$ 248.645,22
Subsídio pago pelo Poder Público	R$ 500.000	R$ 903.125	R$ 886.800	R$ 902.200	R$ 891.250
Tarifa pública	R$ 2,83	R$ 2,00	R$ 2,00	R$ 2,00	R$ 2,00
Tarifa técnica	R$ 7,00	R$ 10,28	R$ 9,85	R$ 9,30	R$ 9,19
Subsídio unitário	R$ 4,17	8,28	R$ 7,85	R$ 7,30	R$ 7,18

A tarifa pública praticada no transporte público municipal é de R$ 2,00 para pagantes em geral e R$ 1,00 para estudantes, contrastando com o valor da tarifa técnica – que é aquela correspondente ao valor que seria pago pelo usuário caso não houvesse repasse pelo ente público do subsídio para o transporte coletivo – apresentado na Figura 1. Nota-se também, os diferentes valores dessa tarifa nos meses observados pelo estudo, o que deve. Aos distintos preços de operação nos meses do quadrimestre, sobretudo ligados ao preço do combustível e quilometragem total rodada mensalmente.

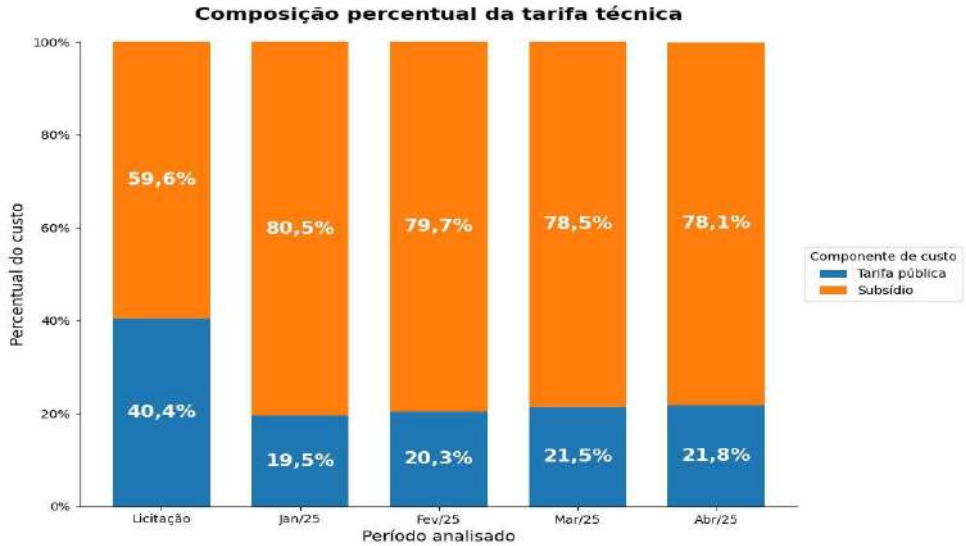


Figura 1: Composição percentual da tarifa técnica

Com base na proposta metodológica aqui apresentada, nota-se que o subsídio total mensal representa a maior parcela do montante sobre o custo total de operação nos meses analisados. A média dessa relação é de 79,22%,

chegando a 80,54% do custo mensal total (CMU) para o mês de janeiro de 2025. Observa-se também que os valores observados do subsídio para o quadrimestre estudado superam — em média 79,16% — o valor daquele inicialmente pensado no processo licitatório para a concessão do transporte público municipal. Os resultados demonstram o impacto do subsídio que a Prefeitura Municipal de Rio Verde deve custear para a manutenção do serviço de transporte público, em níveis de serviço adequados, bem como a manutenção da modicidade tarifária, garantindo tarifas acessíveis e a ampliação do acesso da população ao sistema.

Logo, o estudo desenvolvido permitiu através da metodologia aplicada verificar que os recursos oriundos do repasse feito pela Prefeitura de Rio Verde representam investimento direto na política pública municipal de transporte e mobilidade, com cenário resultante na manutenção da tarifa pública em R$ 2,00, no aumento da qualidade do serviço, renovação da frota e inovação tecnológica, com foco na melhoria do atendimento aos usuários, resultando na elevação de passageiros utilizando o transporte coletivo e gerando impacto social relevante.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante a análise desenvolvida, a partir do método NEC, foi possível verificar o real impacto do subsídio concedido pelo Município de Rio Verde na precificação e viabilidade do serviço de transporte público urbano. Os resultados demonstram que o subsídio constitui a parcela majoritária do custo de operação do sistema, representando, em média, 79,22% do Custo Mensal Total (CMU), com picos de até 80,54%. A principal conclusão deste estudo é que o subsídio transcende sua função de mero equilíbrio financeiro, consolidando-se como um instrumento vital e estratégico de política pública de mobilidade urbana em Rio Verde. Foi evidenciado que o aporte municipal é o fator que viabiliza a manutenção da tarifa pública em R$ 2,00 (e R$ 1,00 para estudantes), um valor consideravelmente inferior à tarifa técnica calculada, que flutua mensalmente de acordo com os custos operacionais. Dessa forma, o subsídio garante a modicidade tarifária e, consequentemente, a ampliação do acesso da população ao sistema. Portanto, o estudo permite concluir que os recursos públicos aplicados no transporte nas cidades são um investimento essencial com retorno social e urbano mensurável. Este investimento resulta não apenas na manutenção de uma tarifa acessível, mas também fomenta a melhoria contínua do serviço e eleva o número de passageiros, gerando um ciclo virtuoso de valorização do transporte coletivo e garantia do equilíbrio econômico-financeiro do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP (2025). Síntese Semanal do Comportamento dos Preços dos Combustíveis. Ed. 05, 09, 14, 17. Brasília: ANP, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/sintese-semanal-do-comportamento-dos-precos-dos-combustiveis (acesso em 20/06/2025).

Ferraz, A. C. P., Hirosue, F. H., Romão, M. N. P. V., Zanella, C. e Alves, H. V. *Método NEC para cálculo dos custos e da tarifa do transporte coletivo urbano por ônibus* (1ª. ed.) São Carlos: RiMa Editora, 2024.

IBGE (2025) *Cidades e Estados*. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/go/rio-verde.html (acesso em 20/06/2025).

PMRV (2025) Processo Licitatório. Concorrência nº 011, de 25 de novembro de 2022. Rio Verde, Goiás: Portal do Cidadão, 2022. Disponível em: https://acessoainformacao.rioverde.go.gov.br/informacao/licitacao/id=11482. (acesso em 26/05/ 2025).

Fernanda Geovanna Alves da Silva Martins (fernandageovanna@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano); Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Gustavo Henrique Almeida Quirino (gustavo.quirino@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano); Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Rafael Pomar Schmidt (rafaelpseng@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano); Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Philippe Barbosa Silva (philippe.silva@ifgoiano.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde, Laboratório de Pavimentação e Transportes (LPT/IF Goiano); Rodovia Sul Goiana, km 01, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil
Magaly Natália Pazzian Vasconcellos Romão (magaly.romao.jau@gmail.com)
Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, Campus de Jaú; Rua Frei Galvão, s/n, Jardim Pedro Ometto, Jaú, São Paulo, Brasil.

Políticas Públicas de Transportes

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

GOVERNANÇA DA MOBILIDADE COMO UM SERVIÇO (MAAS): REFLEXÕES SOBRE O CONTEXTO DE SÃO PAULO E A AGENDA 2030

Letícia Pereira Gabriel, Érica Aline Ferreira Silva Yamamoto, Josiane Palma Lima
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

RESUMO
Com o acelerado ritmo das cidades, as formas de transporte são apresentadas de diferentes maneiras e utilizadas conforme a realidade das pessoas. No entanto, o crescimento das áreas urbanas pode levar a problemas como a falta de infraestrutura, favelização e dificuldade de locomoção. O objetivo desta pesquisa é compreender as iniciativas de governança da Mobilidade como um Serviço (MaaS) no contexto de São Paulo à luz da Agenda 2030. Para isso, realizou-se um estudo de caso com o uso de dados secundários. A governança da MaaS visa o aprimoramento de um serviço que proporcione maior igualdade de oportunidades e qualidade de vida aos cidadãos, equilibrando recursos econômicos e sociais.

1. OBJETIVO E MÉTODO DE TRABALHO

O objetivo desta pesquisa é compreender as iniciativas de governança da Mobilidade como um Serviço (MaaS) no contexto de São Paulo à luz da Agenda 2030. A MaaS pode ser entendida a partir da oferta de diferentes serviços de mobilidade integrados em uma única plataforma (Kamargianni e Matyas, 2017). Para isso, realizou-se um estudo de caso (Yin, 2015) no município de São Paulo por ser uma cidade de grande porte mais propensa a ter diretrizes e práticas de MaaS. Pesquisas e publicações foram consultadas, além dos dados documentais disponibilizados em sítios eletrônicos. A pesquisa gerou uma cartilha educativa sobre a MaaS.

2. PRINCIPAIS RESULTADOS

São Paulo, com 11.451.999 pessoas, é a maior cidade da América Latina e se configura como um importante centro financeiro e cultural (IBGE Cidades, 2022). A MaaS na cidade de São Paulo pode representar uma transformação estrutural que envolve planejamento integrado, tecnologias interoperáveis, incentivos a modos sustentáveis e inclusão de populações historicamente marginalizadas. Levando em consideração Agenda 2030, a governança da MaaS foi avaliada com base nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015). A análise sobre uma futura implementação da MaaS abarca diretamente diversos ODS somados à eficiência do sistema de mobilidade. Para fortalecer a governança integrada, a implementação requer uma profunda reestruturação institucional. A cidade de São Paulo apresenta múltiplos órgãos responsáveis pela mobilidade, tais como Sistema Público SPTrans, Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana e Transporte de São Paulo e Secretaria Executiva de Transporte e Mobilidade Urbana.

Do ponto de vista da modernização tecnológica e padronização de plataformas, São Paulo conta com avanços notáveis em inovação aplicada à mobilidade urbana. A cidade foi pioneira na abertura de dados de transporte público e na implementação de tecnologias como o Automatic Vehicle Location (AVL) e o aplicativo Olho Vivo (FGV Cidades, 2022). Esses recursos demonstram uma maturidade tecnológica considerável. Contudo, para que a MaaS seja viável em larga escala, é necessário adotar padrões que permitam a integração dos diversos sistemas e operadoras. A ideia é buscar melhorias no transporte público para complementar os outros serviços já existentes, em vez de criar uma competição (Biderman e Marinho, 2024). A proposta de um modelo inspirado no *open banking* para a bilhetagem é um passo importante (FGV Cidades, 2022), relacionando-se ao ODS 9 por estimular infraestrutura inteligente e inovação tecnológica (ONU, 2015).

Como forma de incentivar a integração modal e sustentável, a mudança de comportamento dos usuários é parte da transição para um modelo MaaS. Para isso, é preciso estruturar incentivos positivos, como o "preço público invertido", que recompensa deslocamentos ativos como caminhar e pedalar, ao invés de unicamente penalizar o uso do automóvel (FGV Cidades, 2022). Essas ações promovem benefícios à saúde pública (ODS 3), à sustentabilidade urbana e ambiental (ODS 11) e ao meio ambiente (ODS 13). A introdução de serviços sob demanda surge como alternativa eficaz para cobrir essas deficiências e oferecer mais flexibilidade operacional. É por isso que a proposta revela, também, a necessidade de uma integração harmônica da MaaS ao transporte público, reformulando tanto a gestão da mobilidade, quanto a regulamentação (Biderman e Marinho, 2024). Essas medidas contribuem diretamente para os ODS 1, ODS 5 e ODS 10, ao garantir o acesso à mobilidade – um direito fundamental (ONU, 2015). Para estimular os diálogos multisetoriais, a abordagem holística da MaaS envolverá redução das desigualdades, diminuição de emissões e doenças, progressividade tarifária e aumento da segurança viária (ODS 3, ODS 10 e ODS 11), reforçando a importância de transparência e

participação social no monitoramento de políticas públicas contempladas no ODS 16 (ONU, 2015).

Nos últimos anos, a Prefeitura de São Paulo promoveu diversos diálogos sociais por meio da cocriação de políticas públicas, como a realização de oficinas participativas sobre mobilidade ativa, audiências públicas e ações voltadas para a proteção e o acolhimento de grupos vulneráveis no transporte público. Com isso, formou-se o grupo de trabalho contra o abuso sexual no transporte público municipal, resultando na campanha "Ponto Final ao Abuso Sexual" e inauguração do Posto de Apoio à Mulher no Terminal Sacomã, além da campanha "Ponto Final ao Racismo" e ações de cidadania, como a atuação da Unidade Móvel LGBTI nos terminais de ônibus (Prefeitura de São Paulo, 2024). A Figura 1 representa a materialização da governança compartilhada.



Figura 1: A governança da Mobilidade como um Serviço no contexto de São Paulo.

3. CONCLUSÕES

O incentivo ao uso de modos integrados de transporte está alinhado às iniciativas que buscam promover a sustentabilidade e a inclusão na mobilidade urbana. A cidade de São Paulo se configura como um importante centro financeiro e cultural do país, acompanhado dos desafios demográficos, econômicos, sociais, estruturais e ambientais. Neste contexto, trata-se de uma transformação estrutural que conecta problemas diários com soluções práticas. Para começar, tem-se um razoável consenso: diminuir a participação de veículos motorizados individuais e aumentar os modos ativos e coletivos (Biderman, 2024). A MaaS leva a uma perspectiva conectada de mobilidade, utilizando dados das cidades e suas formas de transporte para integrar e permitir meios de se chegar ao destino. No entanto, apenas a tecnologia não consegue transformar uma cidade inteligente sozinha. Por isso, a transformação estrutural envolve planejamento integrado, tecnologias interoperáveis, incentivos a modos sustentáveis e inclusão para fortalecer a participação social nas decisões.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES pelo apoio financeiro concedido aos projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biderman, C. (2024) Nova governança para a mobilidade urbana. *GV EXECUTIVO*, v. 23, n. 3.

Biderman, C. e Marinho, S. M. M. (2024) Cultural-cognitive institutions and the uncertain promise of mobility as a service in Brazil. *Research Policy*, v. 16, p. 1-20.

FGV Cidades (2022) *Improving the governance of mobility including the specific case study of São Paulo's metropolitan region:* Task E – Sumário Executivo. UK Government, Banco Mundial, Cidade de São Paulo.

IBGE (2022) *Cidades e Estados do Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Kamargianni, M. e Matyas, M. (2017) The Business Ecosystem of Mobility as a Service. *Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting*, p. 8-12.

Morozov, E. e Bria, F. (2019) *A Cidade Inteligente: tecnologias urbanas e democracia*. São Paulo: Ubu Editora, 192p.

ONU (2015) *Transformando Nosso Mundo:* a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova York: Organização das Nações Unidas.

Prefeitura de São Paulo (2024) *Diálogos sociais.* São Paulo: Secretaria de Governo Municipal.

Yin, R. K (2015) *Estudo de Caso: planejamento e métodos*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda.

Letícia Pereira Gabriel (d2022002417@unifei.edu.br)
Josiane Palma Lima (jplima@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Avenida BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil

Políticas Públicas de Transportes

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DA TARIFA NA DINÂMICA URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Maria Victoria Gennari, Mateus Humberto
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Esta dissertação busca fazer uma avaliação dos comportamentos de mobilidade urbana frente a mudanças tarifárias e investigar seus impactos em diferentes grupos minoritários e marginalizados. Pretende-se investigar o impacto do aumento da tarifa nas dinâmicas urbanas da Região Metropolitana de São Paulo de modo a definir padrões existentes e o impacto dessa mudança por meio da comparação temporal entre padrões de fluxo. Será realizada uma revisão de literatura para confirmação da lacuna de pesquisa e, posteriormente, aplicação das ferramentas de inferência causal para identificação das alterações de comportamento. Esta pesquisa busca realizar uma avaliação do impacto das mudanças tarifárias e identificar grupos mais e menos sensíveis a este fenômeno, como forma de tornar o planejamento de transportes um caminho para cidades mais equitativas e acessíveis.

1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A mobilidade urbana em São Paulo expõe a falta de acessibilidade dos espaços públicos em um sistema que prioriza o transporte individual motorizado e é no transporte coletivo que se tem o exercício da cidadania. O acesso ao transporte coletivo eficiente e de qualidade tem um papel fundamental na promoção da inclusão social, no desenvolvimento sustentável e no exercício do direito à cidade (Vasconcellos, 2021). O conceito de equidade no transporte urbano tem ganhado força nos debates de planejamento urbano. Dessa forma, para consolidar a definição de uma tarifa equitativa, é necessário identificar primeiramente os critérios de equidade envolvidos.

Com relação aos *critérios demográficos*, homens e mulheres apresentam padrões distintos de comportamento de viagem no transporte coletivo, evidenciados por variáveis como horário de partida, tempo de viagem e proporção de tempo de condução. Por exemplo, mulheres tendem a ter maior flexibilidade nos horários de partida em viagens do tipo "Home-to-Home" que indicam saída de casa e retorno para casa em menos de três horas – estas viagens geralmente associadas a tarefas relacionadas ao âmbito doméstico e familiar como idas a mercados, escola dos filhos e atividades sociais (Zhu, 2017). Portanto, é possível observar a influência do gênero nos padrões de mobilidade e destacam como as escolhas de viagem podem variar de acordo com as características sociodemográficas. Em 2023, a pesquisa bianual promovida pela SPTrans mostrou que 53% das pessoas que utilizam ônibus para viagens diárias são do gênero feminino (Prefeitura de São Paulo, 2023).

Na revisão integrativa realizada por Costa (2023), em que a autora faz uma análise de 22 artigos publicados por autores latino-americanos que relacionam gênero e mobilidade, foi identificada uma predominância de estudos relacionados às Ciências Sociais, Arquitetura, Geografia e Psicologia – sendo que destes, apenas quatro (18,2%) discutem diretamente avaliações de políticas públicas. A autora ainda aponta que os estudos avaliados indicam relevância de recortes de classe social, gênero e raça para entender a relação da população urbana e a mobilidade urbana. No *âmbito econômico*, a Pesquisa de Origem e Destino promovida pelo Metrô de São Paulo em 2023, mostra que para rendas familiares de até R$ 5.280, cerca de 61% das viagens são realizadas por modos coletivos (Metrô, 2023). Então, além das diferenças na dimensão do gênero dos usuários, as decisões acerca da mobilidade também são atravessadas pela dimensão do custo do transporte no orçamento familiar das populações de menores rendas – que também são as mais dependentes do transporte coletivo.

A definição de tarifas influencia diretamente as escolhas de viagem dos usuários, podendo alterar significativamente o padrão de demanda. Isso significa que a tarifa não deve ser apenas um mecanismo de recuperação de custos, mas também uma alavanca para atingir diferentes objetivos, como a maximização do bem-estar social ou a promoção da equidade no acesso ao sistema (Borndörfer et al, 2012). A tarifa configura-se, portanto, não apenas como um parâmetro econômico, mas também como uma variável de planejamento, com implicações diretas na operação do transporte público de curta e longa duração (Tomanek, 2017).

2. OBJETIVOS E MÉTODOS

Identificou-se uma oportunidade a respeito de estudos na engenharia de transporte focando em políticas tarifárias e os impactos nas dinâmicas urbanas com enfoque na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Este trabalho busca examinar os impactos de variações tarifárias nas dinâmicas de mobilidade na RMSP, visando propor recomendações com enfoque nos grupos sociodemográficos mais sensíveis aos reajustes das tarifas, cujos bancos de dados e abordagens metodológicas são abordados mais adiante.

Esta pesquisa adotará a revisão de literatura como etapa inicial para compreensão dos estudos voltados ao planejamento de transportes e às políticas tarifárias. A partir da análise de artigos científicos relevantes, busca-se compreender como essas temáticas vêm sendo tratadas nos últimos 10 anos, com atenção às abordagens teóricas mais recorrentes, aos métodos de investigação utilizados e aos diferentes contextos nos quais as políticas de tarifação foram implementadas. O levantamento permitirá ainda avaliar os impactos sociais, econômicos e operacionais atribuídos a essas políticas. Com base nos resultados, será possível identificar lacunas e controvérsias existentes na produção científica, além de mapear tendências recentes que dialogam com o objeto de estudo. A revisão fornecerá subsídios para a construção de um arcabouço teórico, que orientará a análise da pesquisa de forma crítica e contextualizada, considerando tanto contribuições nacionais quanto internacionais.

A segunda etapa será uma análise quantitativa em que serão avaliados dados de bilhetagem frente a variações tarifárias. Para obtenção destes dados, a pesquisa participará dos trabalhos e entorno do termo de cooperação técnico-operacional firmado em setembro de 2024 entre a Secretaria dos Transportes Metropolitanos do Estado de São Paulo (STM) e a Escola Politécnica, que tem por objeto "a colaboração mútua na estruturação de atividades de pesquisa e ensino destinadas à avaliação de políticas públicas de transporte a partir das bases de dados da STM, que serão utilizadas para a aplicação de técnicas de modelagem da demanda e da oferta de transporte em projetos de ensino e pesquisa, bem como para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas na área de Engenharia de Transportes" (STM, 2024). Espera-se o recebimento de dados detalhados sobre o sistema de bilhetagem nos sistemas de transporte coletivo na Região Metropolitana de São Paulo (Bilhete Único e Cartão TOP), o histórico tarifário do transporte público, valores relacionados às políticas de transferências, integrações possíveis entre sistemas de transporte/municípios participantes da Região Metropolitana e informações para caracterização das viagens (como horários de partida e chegada, integrações realizadas, grupo de gratuidade e caracterização sociodemográfica, por exemplo). Outras bases de dados independentes deste acordo técnico-operacional, que abrangem a RMSP e que podem ser fontes para este estudo são: as pesquisas de Origem-Destino (OD) promovidas entre 1977 e 2023 pelo Metrô de São Paulo como base para caracterização das viagens e a São Paulo Transporte S/A (SPTrans), por meio de pedidos realizados com base na Lei de Acesso à Informação (Lei nº 12.527/2011). O mecanismo da LAI torna possível solicitar dados operacionais do sistema de ônibus de São Paulo, como histórico de tarifas, volume de passageiros transportados, itinerários, frequências e dados da bilhetagem eletrônica. A partir dessas bases de dados, será possível identificar padrões de deslocamento relevantes para a pesquisa, como fluxos intermunicipais, polos de atração de viagens e combinações modais mais recorrentes. Além disso, os dados permitirão avaliar os impactos de diferentes políticas tarifárias sobre os deslocamentos da população.

3. RESULTADOS ESPERADOS

O principal resultado deste estudo será compreender a relação da tarifa com as dinâmicas de mobilidade na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com enfoque nos modos de transporte coletivo (sobretudo ônibus, metrô e trem). Dessa forma, busca-se investigar a diferença desta relação entre diferentes grupos sociodemográficos, incluindo a estratificação por renda, idade e gênero ao longo do período analisado.

O principal eixo investigativo será a caracterização do impacto da tarifa nos padrões de mobilidade, isto é, se é possível quantificar o peso da mudança tarifária nos diferentes grupos minoritários e marginalizados. Por meio das bases de dados e da parceria de cooperação acadêmica com a STM, será avaliado o comportamento destes grupos frente às atualizações da política tarifária de forma a comparar as mudanças de padrões de mobilidade entre si.

Outro resultado esperado acerca das políticas tarifárias será composto pela estratificação das integrações possíveis entre modos de transporte dentro da RMSP (ônibus-ônibus, ônibus-trem, metrô-trem etc.). O estudo também busca abranger a análise comparativa entre diferentes modalidades tarifárias, como descontos parciais e totais para estudantes e idosos, por exemplo, e a resposta nos padrões de mobilidade após a implementação da Tarifa Zero nos ônibus aos domingos no município de São Paulo, bem como de forma universal em outros

municípios da RMSP (por ex. São Caetano do Sul). De forma geral, a literatura sugere que os modelos tarifários que facilitam a integração e oferecem maior previsibilidade de custo tendem a beneficiar usuários com padrões de deslocamento mais complexos, como os realizados por mulheres, cuidadores e trabalhadores informais.

Compreender as maneiras pelas quais as estruturas tarifárias influenciam o comportamento de viagem é uma questão central no planejamento e na otimização dos sistemas de transporte público. Este levantamento busca evidenciar a importância de compreender como variáveis como renda, idade e gênero influenciam na formação de padrões de mobilidade na RMSP e como diferentes arranjos tarifários podem ampliar ou restringir o direito à cidade. Assim, as políticas tarifárias podem se tornar ferramentas relevantes na jornada por equidade nas cidades brasileiras e ao acesso a serviços essenciais como educação, saúde e cultura, especialmente para grupos marginalizados.

REFERÊNCIAS

Borndorfer, R.; Karbstein, M e Pfetsch, M. (2021) *Models for fare planning in public transport*

Companhia do Metropolitano de São Paulo (2023) Pesquisa de Origem e Destino 2023

Costa, M. G. S. G.; Alves Filho, A; Leite, J.F. e Oliveira, A. L (2023) Gênero e mobilidade urbana na América Latina: uma revisão integrativa. *Revista Latino-Americana de Geografia e Gênero,* v. 14, n. 1. DOI: https://doi.org/10.5212/Rlagg.v.14.i1.0002

Prefeitura de São Paulo (2023). Pesquisa aponta que os trabalhadores são maioria dos passageiros de ônibus em São Paulo. Disponível em: https://capital.sp.gov.br/w/noticia/pesquisa-aponta-que-trabalhadores-sao-maioria-dos-passageiros-de-onibus-em-sao-paulo (acesso em: 20/05/2025).

STM [Secretaria dos Transportes Metropolitanos. (2024) Extrato do termo de cooperação técnico-operacional, nº 01/2024, de 13 de setembro de 2024. Processo: STM-SEI-026.00000611/2024-08. Diário Oficial do Estado de São Paulo. Edição de 16 de Setembro de 2024. Disponível em: https://www.doe.sp.gov.br/executivo/secretaria-dos-transportes-metropolitanos/secretaria-dos-transportes-metropolitanos-extrato-de-termos-n-01-2024-de-13-de-setembro-de-2024-20240913113812245881 50 (acesso em: 20/05/2025).

Tomanek, R. (2017) *Free-fare public transport in the concept of sustainable urban mobility*. Transport Problems, v. 12, p. 95-105. DOI:10.20858/tp.2017.12.se.8

Vasconcellos, E. A. (2021) Mobilidade urbana: espaço-tempo, desigualdades e políticas públicas (3ª ed.) Rio de Janeiro: Relume Dumará.

Zhu, L.; Gonder, J. e Lin, L.(2017) Prediction of individual social-demographic role based on travel behavior variability using long-term GPS data. *Journal of Advanced Transportation.* DOI:10.1155/2017/7290248

Maria Victoria Gennari (maria.gennari@usp.br)
Mateus Humberto (mateushumberto@usp.br)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av Professor Almeida Prado, Travessa do Biênio, 83 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-070

Avaliação Socioeconômica de Transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

A FAIXA AZUL SOB A ÓTICA DE MOTOCICLISTAS ENTREGADORES: SEGURANÇA, COMPORTAMENTO E INFRAESTRUTURA URBANA

Beatriz Hadler[1], Jefferson da Silva[2], Renan Martelli[3], Mateus Humberto[4]
[1]Escola de Comunicações e Artes da USP, [2]Universidade Municipal de São Caetano do Sul, [3]Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP, [4]Escola Politécnica da USP

RESUMO
Este artigo analisa a percepção de motociclistas entregadores sobre a Faixa Azul, política de sinalização viária destinada exclusivamente à circulação de motocicletas no município de São Paulo. Por meio de 57 entrevistas semiestruturadas, buscou-se compreender como essa intervenção influencia a percepção de segurança viária, o comportamento de condução e as condições de trabalho desses profissionais. A análise qualitativa, baseada em metodologia de análise temática, identificou quatro eixos centrais: visibilidade física, sensação de pertencimento, condutas no trânsito e condições laborais. Os resultados indicam que a Faixa Azul altera tanto a percepção de segurança quanto os padrões de risco no trânsito. Ao focar nos motociclistas entregadores, o estudo oferece subsídios relevantes sobre os principais usuários da infraestrutura. Contribui, assim, para o debate sobre os efeitos da política e propõe que evidências qualitativas possam subsidiar avaliações quantitativas e orientar o aperfeiçoamento da infraestrutura urbana voltada a motocicletas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A cada ano, 1,19 milhão de pessoas morrem em sinistros de trânsito no mundo. Aproximadamente 50 milhões sofrem algum tipo de lesão, muitas com sequelas físicas permanentes, mentais e/ou psicológicas que impedem uma vida normal (WHO, 2021). No Brasil, 33.813 pessoas morreram em razão dos sinistros de trânsito em 2021; aproximadamente 15,8 vítimas fatais por 100 mil habitantes, taxa maior que a média registrada considerando os demais países da América Latina. Nesse mesmo ano, estima-se que houve mais de 1 milhão de sinistros e mais de 500 mil feridos, milhares deles com sequelas graves e permanentes (Brasil, 2023). Em 2023, foi observado um aumento significativo no número de mortes no trânsito da cidade de São Paulo, cerca de 8% maior que o observado em 2022, em que os motociclistas e os pedestres figuram como as principais vítimas, com 43% e 36% do total de óbitos, respectivamente (Pescarini, 2024).

Como uma contramedida ao aumento das mortes no trânsito por motociclistas, a Secretaria Municipal de Mobilidade e Trânsito do Município de São Paulo, por meio do Plano de Metas 21/24, avançou com a ampliação das frentes seguras, intervenção que apontou a redução de 20,5% do número de feridos graves e benefícios da ordem de 25 vezes maiores do que os custos, a partir da separação entre motos e automóveis em interseções semaforizadas (Instituto Cordial, 2021). Outras iniciativas voltadas para motociclistas incluem a proibição de circulação de motos em trechos das pistas expressas das marginais Pinheiros e Tietê, cursos gratuitos dedicados a motociclistas e motofretistas, além da implantação da Faixa Azul, que consiste em "sinalização experimental destinada ao uso de motocicletas" (CET, 2021).

A Faixa Azul conta, em julho de 2025, com cerca de 215 km de faixas de circulação dedicadas para motocicletas, com previsão de ampliação para 400 km até 2028 (CET-SP, 2025; São Paulo, 2025). Entretanto, há uma lacuna de estudos sobre a eficácia de faixas dedicadas para motocicletas, bem como sobre o impacto delas na segurança de motociclistas e outros usuários das vias. Além disso, parece haver uma apropriação da Faixa Azul como instrumento político-partidário, o que pode dificultar o aprofundamento de debates de ordem técnica ou científica. Nesse contexto, o presente estudo busca compreender as percepções de motociclistas entregadores sobre a Faixa Azul como subsídio inicial para uma avaliação exploratória de métodos mistos (quali-quanti), visando orientar a formulação de hipóteses e o desenvolvimento de instrumentos para a avaliação de sinalizações viárias experimentais. O recorte específico dos entregadores foi adotado em razão de sua relevância na dinâmica de uso cotidiano da infraestrutura.

1.1. Condições dos motociclistas entregadores

O conhecimento acerca dos riscos da profissão de motociclistas entregadores não é recente e antecede a chegada dos aplicativos, apesar destes terem modificado as formas de trabalho da categoria. Estudos mostram que as condições laborais dos motofretistas historicamente incentivam comportamentos de risco. Os curtos prazos das entregas, as baixas remunerações e as pressões das empresas para maior produtividade (DINIZ et al., 2005) levam à maior velocidade de pilotagem destes trabalhadores que, para minimizar o tempo de deslocamento, acabam se colocando em risco para conseguirem um rendimento condizente com as suas

necessidades de subsistência. Grisci et al. (2007) expõe bem essa condição em um estudo que entrevista motofretistas sobre seus modos de trabalho:

> A velocidade na condução das motocicletas ressalta como os motoboys são incitados interna e externamente com o objetivo de atender à pressão por produtividade que lhes é imposta. Desse modo, passam a reger a própria vida a partir da premissa de que *"o motoboy que corre mais, que arrisca mais, ganha mais"* (GRISCI et al., 2007, p. 458)

Na década passada, o advento das empresas de entrega por aplicativo, ou empresas-aplicativo, mudou as relações de trabalho dos motofretistas (Abilio, 2017). O que antes era comumente uma contratação dos profissionais por empresas terceirizadas, agora passou a ser um novo modo de trabalho em que o motociclista se conecta a um aplicativo e realiza uma atividade remunerada, sem vínculos formais com a empresa que disponibiliza o serviço e, consequentemente, sem seguridades sociais (Diniz et al., 2005). Abilio (2019) chama esse novo regime de "autogerenciamento subordinado", pois o trabalhador, teoricamente, cria suas escalas, define seus horários e possui uma suposta liberdade em relação ao seu trabalho, porém, concretamente, está subordinado à gestão do algoritmo da plataforma, que decide o manejamento de entregas, estipula prazos e cria um *score* que será a referência para aquele entregador receber mais chamadas para entregas no aplicativo. Este *score* aumenta de acordo com algumas variáveis, como o tempo online na plataforma, o cumprimento de metas e a rapidez das entregas (Oliveira e Junges, 2023).

Supõe-se que o ritmo de trabalho agitado e perigoso, já existente na categoria dos motofretistas, foi amplificado por essa nova relação de informalidade das empresas-aplicativo, levando estes profissionais a comportamentos de maior risco, como maior velocidade de condução e aumento das infrações de trânsito. Acredita-se que o entendimento da relação do motociclista com o espaço urbano ajuda a entender os riscos da profissão e os pormenores necessários ao estudo na área de segurança viária. Questões de trabalho, riscos no trânsito e percepções dos motociclistas sobre si são temas que contribuíram para a construção do questionário e do desenho da pesquisa e serviram como uma base na elaboração de uma compreensão mais minuciosa sobre os impactos da Faixa Azul.

O objetivo primário desta pesquisa é avaliar o impacto da implantação de faixas dedicadas para motocicleta em vias do Município de São Paulo (Faixa Azul) no comportamento auto-percebido de condução e segurança viária, por meio de entrevistas semiestruturadas junto a motociclistas. Para alcançar esse objetivo estipulado, duas hipóteses de pesquisa são colocadas: 1) A implantação de faixas dedicadas para motocicleta influencia a segurança dos motociclistas e de outros usuários da via; e 2) A implantação de faixas dedicadas para motocicleta induz comportamentos de excesso de velocidade de motociclistas e de outros veículos. Dessa forma, o estudo busca compreender como entregadores percebem a Faixa Azul, os efeitos dessa infraestrutura sobre seu trabalho e condução, além de integrar perspectivas da sociologia à avaliação da política.

2. MÉTODOS E DESENHO DA PESQUISA

O desenho metodológico da pesquisa teve como base a realização de entrevistas semiestruturadas com motociclistas entregadores, categoria fortemente presente nas regiões de interesse e usuária recorrente da Faixa Azul. Considerando a predominância dos entregadores por aplicativo entre os condutores de motocicletas na cidade, foram definidos cinco locais estratégicos para a coleta de dados: três em novembro e dezembro de 2024 (Shopping Eldorado, Shopping Iguatemi e Shopping Metrô Itaquera) e dois em fevereiro de 2025 (Rappi Hub Santa Cecília e Mogi Shopping), abrangendo áreas próximas e afastadas das faixas dedicadas. Estes locais foram escolhidos por serem grandes pontos de concentração de entregadores, o que facilita a coleta das entrevistas e a diversidade de respostas.

O roteiro de entrevistas, com cerca de 37 questões, abrangeu temas como perfil sociodemográfico, práticas de condução, percepções sobre a Faixa Azul, experiência com entregas, sinistros de trânsito e rotinas de deslocamento. As entrevistas foram transcritas com o auxílio do software Pinpoint, que converte fala em texto e sugere palavras-chave, embora exigindo revisão manual em trechos com ruído.

Após a transcrição, os conteúdos foram codificados por entrevistador e por trecho, resultando em um banco com 77 variáveis temáticas. A etapa de análise exploratória detalhada das 57 entrevistas foi realizada de forma

a assegurar que cada pesquisador analisasse tanto entrevistas conduzidas por si quanto por outros integrantes da equipe. Essa estratégia permitiu padronizar e organizar os dados qualitativos de forma colaborativa, facilitando análises subsequentes e a representação gráfica das percepções captadas ao longo do trabalho de campo.

3. RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados da análise temática desenvolvida com base nas entrevistas realizadas com motociclistas entregadores. A seleção permitiu explorar em profundidade os sentidos atribuídos à Faixa Azul, em articulação com as práticas de condução, a segurança viária e as condições de trabalho. A releitura sistemática dos relatos possibilitou identificar padrões recorrentes e construir categorias interpretativas, apoiadas na elaboração de diagramas que sintetizam visualmente as conexões entre os eixos temáticos. Foram desenvolvidas 12 versões de diagramas, discutidas quanto às suas convergências, tensões e relevância analítica. A Figura 1 apresenta a versão final, estruturada a partir do tema central "Percepção de Segurança dos Motociclistas", desdobrado em quatro eixos: "Visibilidade Física", "Sensação de Pertencimento", "Condutas no Trânsito" e "Condições Laborais". Esses elementos evidenciam como a infraestrutura viária é percebida e apropriada no cotidiano dos entregadores.



Figura 1: Versão consolidada de diagrama sobre a percepção de segurança de motociclistas entregadores. [Elaboração própria]

Embora o presente artigo se concentre na dimensão qualitativa, os achados aqui descritos integram um desenho de métodos mistos do tipo exploratório (qualitativo–quantitativo) e poderão subsidiar etapas posteriores do estudo, orientando a formulação de hipóteses, a construção de variáveis e a interpretação de dados em análises quantitativas. A seguir, cada um dos quatro eixos temáticos é detalhado com base nos relatos dos participantes, ilustrados por trechos selecionados das entrevistas, buscando aprofundar a compreensão das dimensões subjetivas e contextuais associadas à Faixa Azul.

3.1. Visibilidade física

Este tema reflete a interpretação da Faixa Azul como uma intervenção física que permite uma melhor organização do fluxo de veículos dentro do espaço das vias. Tal segregação proporciona uma percepção maior de segurança aos motociclistas entrevistados por estabelecer certa previsibilidade no trânsito, com os demais motoristas prestando maior atenção e tendo mais respeito ao espaço entre os veículos, por onde transitam as motocicletas. Além disso, as entrevistas apontam para dois fatores relevantes da percepção dos motociclistas em relação à Faixa Azul. As condições do asfalto não são necessariamente melhoradas após a implementação das faixas dedicadas, o que expõe os condutores a situações de maior vulnerabilidade no trânsito, e o material utilizado para a pintura das faixas se torna escorregadio diante de condições climáticas adversas, propiciando a ocorrência de sinistros.

> "Fica bem, um espaço bem, bem tranquilo mesmo para você circular de boa. E os carros, até agora os carros quando vão mudar de faixa, sinaliza tudo certinho" - Homem negro, 22 anos

3.2. Sensação de pertencimento

Esse eixo temático contempla o diálogo estabelecido entre a narrativa construída pelo poder público ao redor da implementação da Faixa Azul e sua relação com os motociclistas, o que parece contribuir de forma direta na percepção de segurança dos motociclistas entregadores. Segundo as entrevistas, as faixas dedicadas aos motociclistas proporcionam um sentimento de pertencimento dentro do trânsito, por conta do respeito dos demais veículos,a visibilidade da motocicleta como modo de transporte dentro da sociedade, e como uma política pública que contempla as necessidades laborais dos entregadores.

> "Cresceu e facilitou demais, todo lugar agora aqui faixa azul, mano. O bagulho é mó adianto, não sofre, não tem buzina direito. Raridade você ouvir até barulho de buzina, entendeu? Com certeza muito essa Faixa Azul aí veio para revolucionar. Vou falar para você, não tenho nada para reclamar, só tenho a agradecer mesmo" - Homem pardo, 37 anos

3.3. Condutas no trânsito

A partir das falas dos entrevistados, foi possível identificar como a implementação da Faixa Azul propicia mudanças no comportamento dos condutores, principalmente em relação à indução de comportamentos de risco, que criam maiores chances para a ocorrência de sinistros de maior gravidade. Por conta das condições trabalhistas, como o cumprimento de metas e a realização de entregas no menor tempo possível, os motociclistas entregadores percebem que um dos benefícios das faixas dedicadas à circulação de motocicletas é criar um "corredor livre" para ser percorrido com altas velocidades, comprovando uma das hipóteses de pesquisa iniciais. Na mesma lógica de aceleração, a formação de filas de motocicletas dentro do espaço delimitado pela faixa faz com que alguns motociclistas optem por realizar ultrapassagens arriscadas. Tais comportamentos de risco parecem ser fomentados pela ausência de fiscalização efetiva das vias com Faixa Azul.

> "Tem cara que acelera mais. Tem cara que anda no limite. Isso daí vai da pessoa. (...) Uma vai atrás da outra. Aí, quando o cara tá devagar demais, ele quer ultrapassar, o cara abre o caminho, ele ultrapassa. É assim" - Homem negro, 22 anos

3.4. Condições laborais

O contexto de trabalho e o padrão de deslocamento relatados pelos motociclistas entregadores parecem indicar a influência das condições de trabalho nas mudanças de comportamento e nas percepções sobre a Faixa Azul. A partir do questionário utilizado nas entrevistas semiestruturadas, foi possível traçar um perfil simplificado das condições laborais dos participantes, com destaque para a remuneração obtida por meio da alta carga de trabalho, composta por longas jornadas e muitos dias na semana. Somado a isso, o assédio moral praticado pelos clientes, a atenção constante exigida e a exposição a condições climáticas adversas, provocam grande desgaste psicológico aos motociclistas entregadores.

> "Você nunca sabe o que você vai carregar. Às vezes é coisa pesada… (...) E psicológica é por você enfrentar tanta coisa. Quase morre, é chuva, sol, tudo isso. E às vezes, sei lá, chega no cliente, o cliente é bruto com você, você é destratado em algum estabelecimento. Esse tipo de coisa. Aí o psicológico fica meio..." - Homem pardo, 32 anos

4. CONCLUSÕES

Compreende-se que os temas identificados por meio das entrevistas semiestruturadas permitem traçar um panorama inicial sobre a percepção dos motociclistas entregadores a respeito da Faixa Azul e suas implicações na segurança viária e nas condições de trabalho. Esse estudo qualitativo evidencia como a infraestrutura urbana impacta diretamente a experiência cotidiana desses trabalhadores, tanto no que se refere à sensação de proteção quanto à intensificação de comportamentos de risco. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a implantação da Faixa Azul produz efeitos ambivalentes: ao mesmo tempo em que amplia a percepção de segurança dos motociclistas, também favorece um aumento na velocidade e a adoção de condutas arriscadas, como ultrapassagens dentro da própria faixa. Esse tipo de resposta paradoxal, em que uma maior sensação de

proteção leva à intensificação de comportamentos de risco, tem sido observado em diferentes contextos de intervenção viária e reforça a importância de se articular percepções subjetivas e práticas de condução nas análises sobre segurança no trânsito. Cabe mencionar que o foco exclusivo em motociclistas entregadores e a ausência de outras perspectivas, como as de pedestres e motoristas, representam limitações importantes para uma análise abrangente da política. Ainda assim, conforme a revisão da literatura, metodologias semiestruturadas concentram-se em amostragens de 20-30 participantes (mediana 26), de modo que as 57 entrevistas realizadas reforçam a robustez do estudo. Como próximos passos, está previsto um aprofundamento da codificação das entrevistas realizadas, com o intuito de consolidar um conjunto mais robusto de evidências qualitativas. Espera-se que este material contribua para informar avaliações quantitativas futuras e subsidiar o aperfeiçoamento da política pública, especialmente no que se refere aos riscos, benefícios e limites da expansão da Faixa Azul, sob a perspectiva de um grupo muitas vezes negligenciado na pesquisa em transportes.

Agradecimentos
Esta pesquisa foi financiada com recursos da *Bloomberg Philanthropies* e aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos do Instituto de Psicologia da USP (CAAE 82566224.8.0000.5561) e *Biomedical Research Alliance of New York* (Protocol 24-410-522). Agradecemos a Mariana Novaski (Iniciativa Bloomberg para Segurança Viária Global) e Ismael Ibarra Nava (Vital Strategies) pelas valiosas sugestões e pela generosidade na leitura crítica deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abilio, L. C. (2017) Uberização do trabalho: subsunção real da viração. Blog da Boitempo. Disponível em: https://blogdaboitempo.com.br/2017/02/22/uberizacao-do-trabalho-subsuncao-real-da-viracao (acesso em 08/07/2025).

Abilio, L. C. (2019) Uberização: Do empreendedorismo para o autogerenciamento subordinado. Psicoperspectivas, v. 18, n. 3. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-69242019000300041 (acesso em 08/07/2025).

Brasil. Polícia Rodoviária Federal (2023) Acidentes. Ministério da Justiça e Segurança Pública. Disponível em: https://www.gov.br/prf/pt-br/acesso-a-informacao/dados-abertos/dados-abertos-acidentes (acesso em 08/07/2025).

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego (2021) Campanha Educativa "Faixa Azul". Disponível em: https://www.cetsp.com.br/media/1206265/apresentacao_faixa_azul.pdf (acesso em 08/07/2025).

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego (2025) Perguntas e respostas sobre a Faixa Azul. Disponível em: https://www.cetsp.com.br/consultas/faixa-azul/perguntas-e-respostas.aspx (acesso em 08/07/2025).

Diniz, E. P. H.; A. A. Assunção e F. P. A. Lima (2005) Por que os motociclistas profissionais se acidentam? Riscos de acidentes e estratégias de prevenção. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 30, n. 111, p. 41–50. DOI: https://doi.org/10.1590/S0303-76572005000100006

Grisci, C. L. I.; P. D. Scalco e M. S. Janovik (2007) Modos de trabalhar e de ser de motoboys: a vivência espaço-temporal contemporânea. Psicologia: Ciência e Profissão, v. 27, n. 3, p. 446–461. DOI: https://doi.org/10.1590/S1414-98932007000300007

Instituto Cordial (2021) Avaliação custo-efetividade e custo-benefício de intervenções na cidade de São Paulo: MULV e Frente Segura. Working Paper. Instituto Cordial.

Oliveira, P. T. G. e J. R. Junges (2023) Plataformas digitais de entrega de alimentação: condições de trabalho e riscos para a saúde. Saúde e Sociedade, v. 32, n. 3, p. e220642pt. DOI: https://doi.org/10.1590/S0104-12902023220642pt

Pescarini, F. (2024) Número de mortes no trânsito da cidade de SP é o maior desde 2015. Folha de S. Paulo, 16 jan. 2024. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/01/numero-de-mortes-no-transito-da-cidade-de-sp-e-o-maior-desde-2015.shtml (acesso em 08/07/2025).

São Paulo (2025) Programa de Metas 2025/2028. Disponível em: https://programademetas.prefeitura.sp.gov.br (acesso em 08/07/2025).

World Health Organization – WHO (2021) Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2021–2030. Geneva. Disponível em: https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030 (acesso em 08/07/2025).

Beatriz Hadler (balmeidahadler@usp.br)
Escola de Comunicações e Artes da USP. Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 443. 05508-020 São Paulo - SP
Jefferson da Silva (jeffersonn1998@outlook.com)
Universidade Municipal de São Caetano do Sul R. Santo Antonio, 50. 09521-160 São Caetano do Sul - SP
Renan Martelli (renanmartelli@usp.br)
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP. R. do Lago, 717. 05508-080 São Paulo - SP
Mateus Humberto (mateushumberto@usp.br)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Almeida Prado, 83. 05508-070 São Paulo - SP

A INFLUÊNCIA DAS REDES DE RODOVIAS NA CONECTIVIDADE ESPACIAL E NA ATRATIVIDADE TERRITORIAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Fernanda Catarina Ribeiro da Luz, Rodrigo Juan Martins Cardozo, Ana Letícia Ramos Bezerra, Anísio Brasileiro de Freitas Dourado, Mauricio de Oliveira Andrade
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
As redes de transporte, especialmente as rodoviárias, são instrumentos estratégicos para o desenvolvimento regional e a formulação de políticas territoriais, ao viabilizar a circulação de pessoas, mercadorias e serviços entre áreas urbanas e rurais. Este estudo realiza uma revisão sistemática da literatura sobre a influência dessas redes na conectividade espacial e no potencial de atratividade territorial. A metodologia combinou análise bibliométrica com o protocolo PRISMA, resultando na seleção de 163 artigos publicados entre 2015 e 2025, extraídos das bases *Scopus* e *Web of Science*. A análise revelou crescimento no número de publicações e destacou a emergência de temas inovadores, como redes bayesianas e métricas de centralidade. Ao mesmo tempo, identificou tópicos consolidados, como "*road network*" e "*motor transportation*". A baixa participação do Brasil na produção científica evidencia uma lacuna relevante. Conclui-se que há potencial para ampliar estudos sobre atratividade e conectividade, integrando novas abordagens ao planejamento territorial sustentável.

1. INTRODUÇÃO

As redes de transporte, sua gestão e os modelos logísticos eficientes constituem ferramentas estratégicas para o delineamento de políticas territoriais e o fomento ao desenvolvimento regional em diferentes escalas espaciais (Anton-Burgos, 2013). Entre essas redes, as rodoviárias têm desempenhado historicamente um papel central na articulação entre espaços urbanos e rurais, viabilizando a circulação de pessoas, mercadorias e serviços. Ganguli (2016) destaca que a conectividade é fundamental para o desenvolvimento econômico, pois garante acesso a produtos, mercados e serviços sociais, embora frequentemente enfrente distorções em seu desenvolvimento e limitações de financiamento. A organização das redes rodoviárias reduz os custos de transporte, estimula economias de aglomeração e atrai empresas, gerando empregos, especialmente nos setores ligados à logística e mobilidade. Esses efeitos são particularmente intensos em áreas com acessos viários estrategicamente localizados, promovendo a urbanização e transformações na estrutura econômica local (Percoco, 2016).

As redes rodoviárias, enquanto componentes centrais das redes de transporte, exercem influência direta sobre a conectividade espacial e a atratividade dos territórios (Newman *et al*., 2018). Elas configuram sistemas complexos, compostos por múltiplos elementos interconectados, cujas interações se dão muitas vezes de forma não linear e com diversos ciclos de retroalimentação (Cascetta *et al*., 2007). O estudo dessas redes exige, portanto, uma abordagem multidimensional, que considere não apenas sua infraestrutura física, mas também as dinâmicas socioeconômicas e comportamentais que se articulam por meio delas (Litman, 2005).

A interdependência e a co-localização das redes tornam possível que interrupções em um segmento se propaguem para outros, afetando seu funcionamento de maneira sistêmica (Klinkhamer *et al*., 2019). Por outro lado, uma infraestrutura de transporte bem estruturada pode impulsionar a atividade econômica regional, elevar sua competitividade e funcionar como um fator-chave na atração de investimentos e no estímulo ao empreendedorismo (Prus e Sikora, 2021).

A conectividade espacial refere-se às inter-relações entre diferentes regiões geográficas, mediadas por características compartilhadas, fluxos humanos ou mobilidade de vetores (Lee *et al*., 2022). Já o potencial de atratividade de um território relaciona-se à sua capacidade de atrair e reter segmentos específicos da população e da economia, influenciando diretamente estratégias de desenvolvimento sustentável (Servillo *et al*., 2012).

À luz desses conceitos, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a influência das redes de rodovias na conectividade espacial e/ou no potencial de atratividade territorial, buscando identificar como esses temas vêm sendo abordados, suas tendências e lacunas de pesquisa. Dessa forma, pretende-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de transportes e infraestrutura e fornecer

uma base teórica para estudos futuros.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi estruturada em duas etapas complementares: a primeira consistiu em uma análise bibliométrica, realizada com o auxílio do pacote Bibliometrix, no *software* RStudio; a segunda envolveu uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida com base na metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). O protocolo PRISMA é reconhecido por sua padronização e base empírica, fornecendo orientações detalhadas de todas as fases de uma revisão sistemática ou meta-análise. Seu principal objetivo é assegurar a transparência, a reprodutibilidade e a completude na apresentação dos resultados (Page *et al*., 2021).

Para dar suporte à investigação, foram selecionados artigos nas bases de dados Scopus e Web of Science, abrangendo o período de 2015 a 2025. A busca foi realizada a partir da inserção de palavras-chave diretamente relacionadas ao tema central da pesquisa. Os termos utilizados foram: (*TITLE-ABS-KEY ("Highway networks" OR "Road networks") AND TITLE-ABS-KEY (connectivity OR attractiveness*)). Essa estratégia permitiu identificar os estudos mais relevantes, resultando em um conjunto representativo de publicações sobre a influência das redes rodoviárias na conectividade e atratividade territorial.

O processo de seleção dos artigos seguiu três etapas principais: (i) identificação, (ii) triagem e (iii) inclusão. Na fase de identificação, foram extraídos 1.973 artigos das bases de dados após a aplicação dos critérios de busca. Em seguida, na etapa de triagem, foram considerados apenas os artigos publicados na última década (2015 a 2025), eliminados os registros duplicados e restringida a seleção às publicações em língua inglesa, resultando em 633 artigos. Nesta mesma fase, realizou-se uma análise dos títulos e resumos, com a exclusão daqueles que não se enquadravam no escopo da pesquisa, reduzindo o total para 258. Por fim, após a aplicação dos critérios de elegibilidade, 163 artigos foram selecionados para compor a amostra final da revisão.

3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A partir da aplicação da metodologia PRISMA, foram selecionados artigos científicos posteriormente inseridos no *software* RStudio para análise. As publicações contemplam o período de 2015 a 2025, totalizando 163 artigos provenientes de 121 fontes distintas, produzidos por 562 autores, dos quais 6 publicaram individualmente. A Figura 1 apresenta, em ordem cronológica, a distribuição anual dessas publicações. A análise revela uma tendência geral de crescimento na produção acadêmica ao longo da década, apesar de algumas variações pontuais. Destaca-se um aumento a partir de 2019, sucedendo um período de relativa estabilidade entre 2015 e 2018. O maior número de publicações ocorre em 2024, com 27 registros. Em 2025, observa-se uma leve queda, com 21 artigos contabilizados — número justificado pelo fato de a análise abranger apenas o primeiro semestre do ano.

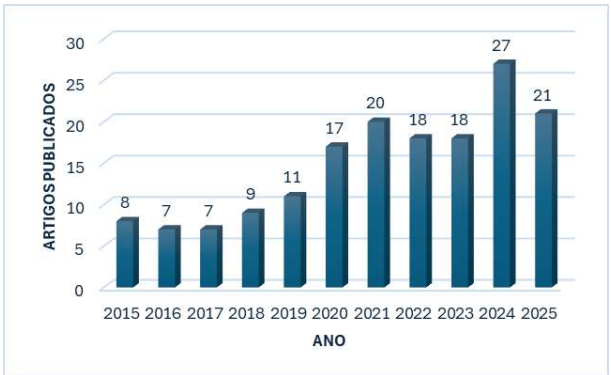


Figura 1: distribuição temporal dos artigos publicados

A análise revela que países como China e Estados Unidos se destacam na produção científica sobre redes rodoviárias, conectividade e atratividade, com 172 e 52 publicações, respectivamente, o que reflete elevado interesse na temática. Por outro lado, nações como Itália (16 publicações), Grécia (8) e Singapura (5), embora apresentem menor volume de produção, alcançam números expressivos de citações — 195, 148 e 154, respectivamente — evidenciando a relevância e a qualidade de suas contribuições. Esses dados confirmam a

importância internacional do tema e reforçam a necessidade de ampliar os estudos no contexto brasileiro, onde os desafios relacionados à conectividade e à integração regional ainda são significativos. O Brasil ocupa a 18ª posição em número de publicações (com quatro artigos) e a 22ª em número de citações (dezesseis), o que demonstra um amplo espaço para o fortalecimento da produção científica nacional nesse campo.

Por fim, a análise bibliométrica evidencia o crescimento do interesse pela temática abordada. A significativa participação de países emergentes como China, Índia, Irã, Turquia e México indica que o tema desperta atenção especial em contextos marcados por intensos projetos de desenvolvimento de infraestrutura e pelas implicações desses investimentos na conectividade e atratividade territorial — seja em dimensões econômicas, sociais ou espaciais. Por outro lado, a presença de países desenvolvidos como Estados Unidos, Japão e diversas nações europeias demonstra que o assunto permanece relevante mesmo em economias com infraestrutura consolidada, especialmente em discussões voltadas à otimização, sustentabilidade e aos impactos socioeconômicos mais complexos.

4. ANÁLISE DA LITERATURA

A análise da literatura foi realizada com base no mapa temático gerado a partir dos dados extraídos da literatura científica, utilizando o pacote Biblioshiny. Esse tipo de gráfico organiza os temas em quatro quadrantes, permitindo visualizar seu grau de desenvolvimento e relevância na área. São eles: (i) Temas Emergentes ou em Declínio, pouco desenvolvidos e com baixa centralidade, podendo indicar tanto novas tendências quanto áreas em desuso; (ii) Temas de Nicho, específicos e bem explorados, porém com pouca conexão com o núcleo da área; (iii) Temas Motores, que são centrais, bem desenvolvidos e no foco das pesquisas; e (iv) Temas Básicos, amplamente utilizados, com pouca inovação. A Figura 2 apresenta o gráfico do mapa temático confeccionado para análise.

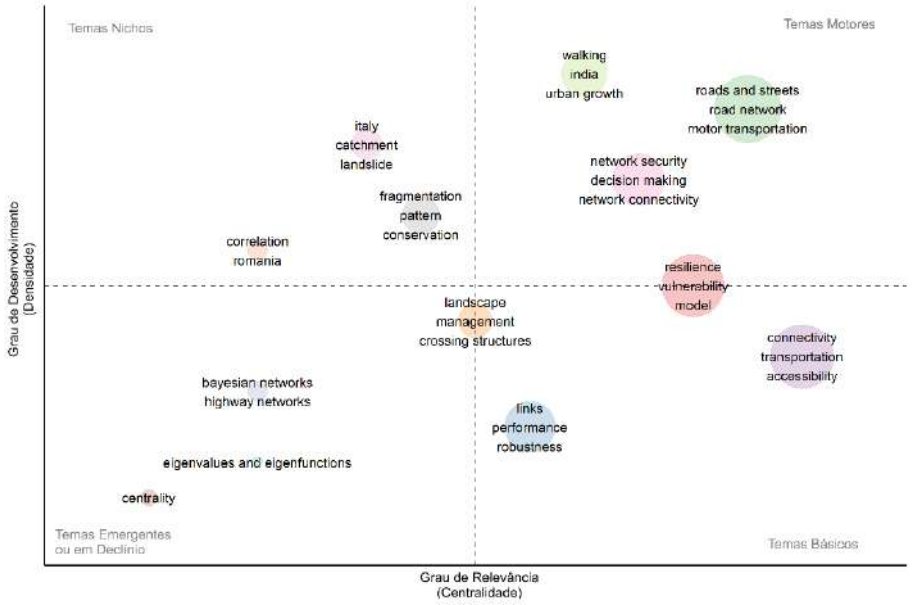


Figura 2: Mapa Temático

Tendo em vista que o objetivo deste artigo é identificar lacunas e temáticas em ascensão na literatura, a análise concentra-se nos quadrantes (i) Temas Emergentes e (iii) Temas Motores. A partir da análise da Figura 2 (mapa temático), destacam-se como temas emergentes tópicos como "*Bayesian networks*" e *"eigenvalues and eigenfunctions*", ainda pouco explorados na literatura, mas com potencial significativo para análises quantitativas e modelagem avançada de redes. Esses temas representam oportunidades para a inovação científica, sobretudo na aplicação de métodos computacionais e estatísticos voltados à infraestrutura e à conectividade rodoviária.

As redes bayesianas, por exemplo, são modelos gráficos probabilísticos que permitem representar e analisar relações de dependência entre variáveis. Jiang e Huang (2022) aplicaram essa abordagem para avaliar a

confiabilidade da conectividade viária em cenários de desastre. Embora não tratem diretamente da atratividade territorial, os autores apresentam metodologias inovadoras para mensurar a robustez e a funcionalidade das redes, contribuindo com novas perspectivas sobre a resiliência da infraestrutura. Tais abordagens ampliam as possibilidades de análise da conectividade espacial e podem ser integradas a futuros estudos sobre planejamento e desenvolvimento territorial.

Entre os avanços metodológicos observados na literatura, destacam-se também as abordagens baseadas em redes complexas para avaliação da conectividade viária. Um exemplo é a aplicação da centralidade do autovetor ponderada pela capacidade, utilizada por Ando *et al*., (2021) para identificar, com baixo custo computacional, os segmentos mais e menos conectados da malha rodoviária. Apesar de não abordarem diretamente a atratividade territorial, essas análises oferecem suporte técnico relevante para a compreensão estrutural da rede. Complementarmente, Wen *et al*, (2023) propuseram um modelo de avaliação de novos trechos viários com base em centralidades e métricas de equilíbrio, como entropia e coeficiente de Gini. Essa abordagem amplia o escopo das análises de viabilidade técnica ao incorporar a distribuição espacial do tráfego e a reorganização da malha viária, conectando-se diretamente aos objetivos desta pesquisa ao considerar os impactos da infraestrutura sobre a estrutura e atratividade do território.

No que se refere aos temas motores — isto é, aqueles bem desenvolvidos e centrais para o campo — o gráfico evidencia a consolidação de tópicos como "*road network*", "*motor transportation*" e "*roads and streets*". Esses temas indicam o amadurecimento teórico e prático da literatura quanto à relevância da infraestrutura rodoviária para a mobilidade e a integração territorial. Além da forte associação das redes rodoviárias ao transporte motorizado, esse quadrante também revela conexões com outros aspectos, como crescimento urbano, mobilidade a pé e segurança viária.

Dentro do quadrante de Temas Motores, encontram-se estudo como a dos pesquisadores Zhang *et al*. (2025), que investigaram a relação entre as características da rede viária e a demanda por deslocamentos (*Vehicle Miles Traveled* – VMT), utilizando 25 métricas de grafos combinadas com análise de componentes principais. O estudo conecta diretamente a estrutura da rede ao comportamento espacial da população, contribuindo para a compreensão da atratividade e da conectividade. Já Sherpa e Hannan (2023) analisaram índices clássicos de conectividade (alfa, beta, gama) e a distribuição espacial da malha viária, revelando contrastes marcantes entre áreas centrais e periféricas. Os autores destacam a evolução da rede rodoviária e sua contribuição para o acesso a áreas rurais, abordando a infraestrutura viária sob a ótica da inclusão territorial. Embora com foco principal na segurança viária, Aguero-Valverde e Vargas-Aguilar (2024) empregaram métricas de peso e importância das conexões viárias para demonstrar como a conectividade entre regiões influencia diretamente as interações espaciais, reforçando a importância da rede viária como mediadora do desenvolvimento territorial.

5. CONCLUSÕES

A análise da literatura, com base na Figura 2 (mapa temático), indica que o termo "*connectivity*" está presente nos quadrantes de Temas Motores e Básicos, enquanto "*attractiveness*" está ausente. Isso evidencia que os estudos sobre redes rodoviárias concentram-se principalmente na conectividade, negligenciando a atratividade geográfica, apontando uma lacuna na produção científica.

Embora haja consenso sobre o papel das rodovias na promoção do desenvolvimento, da acessibilidade e da integração territorial, o conceito de atratividade ainda é pouco abordado como elemento estruturante. Além disso, o Brasil permanece subrepresentado nessas discussões. No entanto, observa-se um avanço em abordagens que buscam não apenas medir a conectividade estrutural, mas também compreender seus impactos na organização do território, convergindo com os objetivos desta pesquisa.

Apesar de existirem estudos que exploram a conectividade espacial e a atratividade territorial de forma isolada

ou em contextos específicos, ainda há uma carência de abordagens integradas que sistematizem a forma como a literatura científica tem tratado a relação entre redes rodoviárias e as duas temáticas. Diante da predominância de estudos voltados à análise de redes rodoviárias e conectividade, mas que negligenciam a dimensão da atratividade geográfica, este artigo sugere que futuras pesquisas aprofundem essa relação, explorando como a presença de infraestrutura viária influencia a atratividade de determinadas regiões. Recomenda-se, ainda, ampliar o recorte temporal da literatura analisada e incorporar novos termos-chave — como "acessibilidade" — para refinar a seleção de artigos e enriquecer a base teórica do tema.

Conclui-se, portanto, que embora exista uma produção científica consolidada sobre a estrutura física das redes viárias, há espaço para expandir o debate sobre conectividade espacial sob uma abordagem mais analítica e integrada. Isso inclui a adoção de novas metodologias e tecnologias que permitam compreender com maior profundidade os fluxos territoriais e seus impactos no desenvolvimento regional.

Agradecimentos
Agradeço à FACEPE pelo apoio concedido à pesquisa. Processo n°: IBPG-0558-3.01/23 e IBPG-1883-3.01/24.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ando, Hiroe et al. Connectivity evaluation of large road network by capacity-weighted eigenvector centrality analysis. Transportmetrica A: Transport Science, v. 17, n. 4, p. 648-674, 2021.

Antón-Burgos, Francisco Javier. Redes de transporte, articulación territorial y desarrollo regional. Revista de estudios andaluces, n. 30, p. 27-47, 2013.

Cascetta, Ennio; PAGLIARA, Francesca; PAPOLA, Andrea. Governance of urban mobility: complex systems and integrated policies. Advances in complex systems, v. 10, n. supp02, p. 339-354, 2007.

Ganguli, Barna. Rural Road Connectivity: The Artery of the Economy. Kurushetra Journal, v. 64, n. 04, 2016.

Jiang, Liguo; HUANG, Shuping. Analyzing connectivity reliability and critical units for highway networks in high-intensity seismic region using Bayesian network. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, v. 1, n. 2, p. 100006, 2022.

Klinkhamer, Christopher et al. Topological convergence of urban infrastructure networks. arXiv preprint arXiv:1902.01266, 2019.

Lee, Sophie A.; ECONOMOU, Theodoros; LOWE, Rachel. A Bayesian modelling framework to quantify multiple sources of spatial variation for disease mapping. Journal of the Royal Society Interface, v. 19, n. 194, p. 20220440, 2022.

Litman, Todd; STEELE, Rowan. Land use impacts on transport. Canada: Victoria Transport Policy Institute, 2017.

Newman, Peter et al. The trackless tram: Is it the transit and city shaping catalyst we have been waiting for?. Journal of Transportation Technologies, v. 9, n. 01, p. 31, 2018.

Page, Matthew J. et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. bmj, v. 372, 2021.

Percoco, Marco. Highways, local economic structure and urban development. Journal of Economic Geography, v. 16, n. 5, p. 1035-1054, 2016.

Prus, Piotr; SIKORA, Marek. The impact of transport infrastructure on the sustainable development of the region—Case study. Agriculture, v. 11, n. 4, p. 279, 2021.

Servillo, Loris; ATKINSON, Rob; RUSSO, Antonio Paolo. Territorial attractiveness in EU urban and spatial policy: A critical review and future research agenda. European urban and regional studies, v. 19, n. 4, p. 349-365, 2012.

Sherpa, Kessang Choden; HANNAN, Abdul. Analysis of rural connectivity and road network development in the Sikkim Himalaya, India. GeoJournal, v. 88, n. 6, p. 5661-5676, 2023.

Wen, Zhiyong; WENG, Xiaoxiong; ZHANG, Pengfei. Evaluating the connectivity and imbalance contribution of new sections towards highway network: a complex network perspective. Journal of Advanced Transportation, v. 2023, n. 1, p. 6616512, 2023.

Zhang, Zihe et al. How Do Graph Properties of Road Networks Influence Vehicle Miles Traveled? A Study of 486 Urban Areas in the United States. Transport Policy, 2025.

Fernanda Catarina Ribeiro da Luz (fernanda.rluz@ufpe.br)
Rodrigo Juan Martins Cardozo (rodrigo.cardozo@ufpe.br)
Ana Leticia Ramos Bezerra (ana.ramosb@ufpe.br)
Anísio Brasileiro de Freitas Dourado (anisio.brasileiro@ufpe.br)
Mauricio Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas. Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA SOCIAL INTEGRADA EM AEROPORTOS CONCEDIDOS: UMA ABORDAGEM EM DOIS ESTÁGIOS COM DEA NETWORK

Hélio da Silva Queiroz Júnior[1], **Viviane Adriano Falcão**[1], **Francisco Gildemir Ferreira da Silva**[2,3]
[1]Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, [2]Universidade Federal do Ceará - UFC, [3]Universidade de Brasília - UnB

RESUMO
Este artigo avalia a eficiência social integrada de aeroportos brasileiros sob diferentes regimes de governança, utilizando a abordagem DEA Network em dois estágios. A metodologia considera a conversão da infraestrutura aeroportuária em oferta de transporte (Estágio 1) e, posteriormente, o atendimento efetivo à demanda de passageiros (Estágio 2), com a inclusão de outputs indesejados como atrasos e cancelamentos. A análise abrange os 30 maiores aeroportos do Brasil entre 2000 e 2024, classificados por rodada de concessão e classe operacional. Os resultados indicam que aeroportos concedidos, especialmente em rodadas recentes, apresentam maiores níveis de eficiência social, demonstrando maior capacidade de transformar investimentos em serviços com qualidade percebida. As evidências reforçam a importância de contratos com metas claras de conectividade e qualidade de serviço, bem como a necessidade de regulação orientada para o valor social da infraestrutura aeroportuária.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor aeroportuário brasileiro passou por uma reestruturação profunda nas últimas décadas, com a adoção de modelos de concessão à iniciativa privada. Essa mudança buscou maior eficiência, qualidade de serviço e sustentabilidade. No entanto, ainda existem lacunas quanto aos efeitos reais dessas mudanças no desempenho dos aeroportos. Este artigo como um recorte específico, analisa como diferentes regimes de governança, pública e privada, influenciam a eficiência aeroportuária, focando na dimensão social.

A eficiência de aeroportos não deve ser medida apenas pela produtividade técnica, mas também pela sua capacidade de gerar valor social. Esta perspectiva ganha relevância em países como o Brasil, que experimentaram uma mudança institucional significativa com a adoção de modelos de concessão à iniciativa privada. A presente pesquisa busca compreender como a governança afeta a eficiência social dos aeroportos, com foco na capacidade de transformar infraestrutura em serviços que atendam efetivamente a demanda, controlando por fatores indesejáveis como atrasos e cancelamentos.

O Brasil se tornou um laboratório empírico privilegiado para esse debate, tendo iniciado em 2011 um amplo processo de concessão de seus principais aeroportos à iniciativa privada. Esse movimento foi motivado por limitações operacionais da operadora estatal INFRAERO e pelo crescimento acelerado da demanda por transporte aéreo. Ao longo de sete rodadas de concessão realizadas até 2024, os aeroportos brasileiros passaram a operar sob diferentes arranjos institucionais e modelos regulatórios. As rodadas mais recentes incorporaram metas explícitas de sustentabilidade, qualidade de serviço e desempenho operacional.

Neste contexto, este artigo aborda uma questão central: como diferentes formas de governança (pública ou concedida), a classe do aeroporto e a rodada de concessão influenciam a eficiência aeroportuária em sua dimensão social? Sustenta-se como hipótese principal (H_0) que a governança privada dos aeroportos contribui para o aumento da eficiência operacional (FALCÃO *et al.*, 2022; DA SILVA, RODRIGUES & FALCÃO, 2019; GALDIANO, FALCÃO & DA SILVA, 2019; FALCÃO *et al.*, 2023). Adicionalmente, assume-se que os efeitos dessa governança não são homogêneos, variando conforme a classe do aeroporto e a rodada de concessão.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área de estudo: Formas de avaliar os aeroportos

Este estudo concentra-se nos 30 aeroportos com maior movimentação de passageiros no Brasil em 2024, considerando a evolução da governança dessas infraestruturas ao longo do período de 2000 a 2024. Esses aeroportos estão distribuídos entre as sete rodadas de concessão realizadas no país, refletindo um processo progressivo de privatização e transferência da gestão aeroportuária da Infraero para operadores privados.

A análise considera esse histórico de mudanças na governança para investigar os impactos das concessões sobre a eficiência social integrada dos aeroportos, utilizando modelos DEA para tanto. A avaliação leva em conta a rodada de concessão à qual cada aeroporto pertence, permitindo comparar aeroportos concedidos em diferentes momentos e aqueles que permaneceram sob gestão pública.

Desde a primeira rodada de concessões em 2011, o Brasil adotou um processo gradual de privatização, distribuído em sete rodadas, cada uma com diferentes formatos contratuais, níveis de exigência regulatória e perfis de aeroportos e concessionárias envolvidos. Essa variedade permite examinar como diferentes arranjos

institucionais e momentos de concessão impactaram nas suas eficiências, indicando se houve uma melhora em seu desempenho. Além da diversidade de modelos, a existência de um período de observação extenso para aeroportos concedidos em momentos distintos possibilita avaliar a evolução da eficiência no tempo.
Outra forma de avaliar as diferentes dimensões da eficiência aeroportuária no Brasil é por meio da classificação dos aeroportos com base na movimentação anual de passageiros. A ANAC classifica os aeroportos de acordo com o volume de passageiros processados anualmente, o que reflete o potencial de geração de demanda e operação de cada aeroporto. Essa categorização é fundamental para compreender como aeroportos de diferentes portes apresentam desempenhos distintos sob os modelos de eficiência adotados neste estudo. Por essa razão, este trabalho emprega os parâmetros de classificação aeroportuária propostos por Domingos et al. (2025), que ampliam os critérios da ANAC e organizam os aeroportos em cinco classes de acordo com sua movimentação anual de passageiros. A combinação desses fatores faz do Brasil um laboratório empírico para investigar a eficiência aeroportuária sob múltiplas perspectivas.

2.2. Modelo de Análise de eficiência social: Dimensão Social Integrada

A abordagem adotada neste estudo baseia-se no modelo DEA Network em dois estágios, conforme proposto por Wanke (2013), adequado para contextos em que a produção ocorre de forma sequencial e interdependente. No Estágio 1, avalia-se a eficiência na conversão de infraestrutura aeroportuária em oferta de transporte, utilizando como outputs desejados o número de voos e destinos atendidos. No Estágio 2, analisa-se a conversão dessa oferta em atendimento efetivo à demanda de passageiros, controlando-se por outputs indesejados como atrasos, cancelamentos e reclamações. O modelo considera retornos variáveis de escala (DEA BCC) e incorpora variáveis ambientais latentes ao processo, tais como a governança (pública ou privada), a rodada de concessão e a classe operacional do aeroporto
A estrutura em dois estágios adotada no Modelo proposto, Figura 1, reflete a lógica de transformação progressiva dos recursos públicos (aeroportos) em resultados operacionais e sociais no ambiente aeroportuário.



Figura 1: Modelo proposto, Dimensão Social Integrada (DEA Network).

Diferentemente dos modelos tradicionais CCR e BCC, que consideram uma estrutura de produção "caixa-preta" com relação direta entre *inputs* e *outputs*, o modelo selecionado para a dimensão social integrada, o DEA Network, desagrega a análise em múltiplos estágios, permitindo mensurar não apenas a eficiência técnica global, mas também a eficiência de cada etapa do processo de produção aeroportuária. Esse tipo de modelagem, conforme proposto por Kao & Hwang (2008) e complementado por Tone & Tsutsui (2009), permite representar a operação aeroportuária de forma encadeada, analisando como os recursos públicos se transformam em capacidade ofertada e, posteriormente, em resultados operacionais e sociais.
O Estágio 1, denominado Eficiência Social, busca mensurar a capacidade do aeroporto em converter sua estrutura pública instalada — representada por variáveis como a área do terminal de passageiros (TPS), o número e desempenho das decolagens (PPD) e o total de pistas — em uma resposta efetiva do setor aéreo. Essa resposta é capturada por meio das saídas intermediárias, como o número de rotas, o total de companhias aéreas atuantes e a oferta de assentos por quilômetro (ASK), que refletem a oferta gerada e conectividade gerada, variáveis atribuídas à operação das companhias aéreas. A ênfase no "social" se justifica pelo fato de que a estrutura aeroportuária é, em grande parte, subsidiada ou regulada pelo poder público, e sua função primária é garantir acesso e integração territorial da população ao transporte aéreo.
Já o Estágio 2, denominado Eficiência Produtiva, avalia a conversão dessa capacidade instalada e conectividade em movimentação real de passageiros e cargas (WLU) e na frequência das operações (número de decolagens), ao mesmo tempo em que penaliza a presença de indicadores negativos de serviço, como atrasos e cancelamentos. Essa etapa representa o desempenho final do aeroporto como agente produtor de valor, considerando eficiência técnica e qualidade do serviço entregue.

A inclusão de *outputs* indesejados no Estágio 2 do Modelo construído — como o percentual de atrasos superiores a 30 e 60 minutos e o percentual de cancelamentos — está alinhada à abordagem socioeconômica proposta por Kao & Hwang (2008), que permite incorporar variáveis de natureza não desejável em modelos DEA Network. Esses *outputs* representam falhas no serviço prestado pelas companhias aéreas, que, embora não sejam diretamente controladas pelos aeroportos, impactam negativamente a percepção de eficiência e qualidade do sistema aeroportuário como um todo. A adoção dessas variáveis no segundo estágio é justificada por sua relevância no processo produtivo final de um aeroporto, que não se limita apenas ao volume transportado, mas também à pontualidade e confiabilidade das operações.

2.3. Análise Cartesiana

O método de análise cartesiana proposto por Wanke (2013) foi adotado neste estudo como uma abordagem complementar à avaliação da eficiência dos aeroportos por meio do modelo DEA *Network* de dois estágios. Tal metodologia se mostra particularmente útil ao permitir uma visualização intuitiva do desempenho das DMUs (aeroportos) a partir da combinação entre as eficiências de cada estágio: o Estágio 1 – Eficiência Social (que avalia a capacidade de transformar estrutura pública disponível em oferta de conectividade aérea) e o Estágio 2 – Eficiência Produtiva do Aeroporto (que analisa o aproveitamento produtivo dessa conectividade para gerar tráfego aéreo com confiabilidade).

A lógica da análise cartesiana, consiste em plotar, em um plano bidimensional, cada aeroporto segundo suas eficiências nos dois estágios, sendo o eixo horizontal (x) referente à eficiência do Estágio 1 e o eixo vertical (y) correspondente à eficiência do Estágio 2. Os eixos são divididos com base na média de eficiência de cada estágio entre todas as DMUs avaliadas. Com isso, forma-se uma matriz composta por quatro quadrantes distintos, que expressam diferentes combinações de desempenho.

Quadrante I – "*Benchmark*": aeroportos que apresentam desempenho acima da média tanto na eficiência social quanto na eficiência produtiva.

Quadrante II – "*Managerial Concern*": aeroportos que obtêm alta eficiência no Estágio 1 (social), mas ficam abaixo da média no Estágio 2 (produtiva).

Quadrante III – "*Underperformer*": aeroportos com desempenho abaixo da média em ambos os estágios.

Quadrante IV – "*Social Concern*": aeroportos que operam de maneira produtiva e confiável (alta eficiência no Estágio 2), mas que apresentam baixa eficiência social.

A adoção deste modelo cartesiano enriquece a análise ao permitir não apenas uma leitura combinada das duas dimensões de eficiência, mas também o mapeamento visual das DMU's segundo suas características institucionais. Assim, é possível avaliar como aeroportos com diferentes modelos de governança (públicos sob gestão da INFRAERO ou concedidos à iniciativa privada), classes de porte (pequeno, médio ou grande) e rodadas de concessão se distribuem nos quadrantes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Panorama Estrutural e Operacional dos Aeroportos analisados

A caracterização inicial dos 30 principais aeroportos brasileiros entre 2000 e 2024 permite observar padrões relevantes nas dimensões estruturais e operacionais, especialmente quando os aeroportos são agrupados por rodada de concessão, Figura 3. A análise descritiva mostra que as rodadas de concessão não apenas marcaram momentos distintos da política de infraestrutura aeroportuária no país, mas também refletiram diferentes estágios de maturidade institucional e exigências contratuais.

De modo geral, a evolução da distribuição entre as classes dos aeroportos revela um movimento consistente de expansão do setor aeroportuário, com deslocamento do perfil dos aeroportos para classes superiores. Esse padrão é compatível com o avanço das rodadas de concessão e com os processos de modernização da infraestrutura aeroportuária, reforçando a importância de considerar a classe operacional como uma variável crítica na avaliação de eficiência e no planejamento de políticas públicas para o setor. Portanto, diante das heterogeneidades de comportamento entre os grupos de concessão, reforça-se a importância de se considerar, na análise de eficiência, não apenas os fatores estruturais e econômicos, mas também as dimensões institucionais, como o modelo de governança, a própria rodada de concessão e a classe operacional do aeroporto.

3.2. Análise das Eficiências Técnicas obtidas pelo DEA Network em Dois Estágios

O estudo utiliza o modelo DEA Network para avaliar a eficiência dos aeroportos brasileiros em dois estágios: eficiência social (Estágio 1) e eficiência produtiva (Estágio 2). A análise, Figura 2, mostra que aeroportos

públicos da Rodada 0, geridos pela Infraero, apesar de apresentarem escores menores que os hubs concedidos, demonstraram resiliência e tendência média positiva na eficiência social. Essa evolução é associada à reorganização da malha aérea regional e à estabilidade institucional (Wanke et al., 2013). Mesmo com flutuações anuais, como a queda acentuada de Santos Dumont após 2019, o comportamento geral indica que a governança pública, quando bem estruturada, pode manter ou melhorar a eficiência relativa (Balliauw et al., 2018).



Figura 2: Distribuição Cartesiana dos Scores de Eficiência dos Estágios 1 (Conectividade Social) e 2 (Eficiência Produtiva) por Rodada de Concessão dos Aeroportos.

A concessão de aeroportos, por sua vez, mostrou efeitos variados dependendo da estrutura adotada e da maturidade do terminal. O caso de SBSG, por exemplo, evidenciou ganhos de desempenho após a adoção de estratégias centradas em rotas de alto tráfego, como sugerem Balliauw et al. (2018). Grandes hubs como SBGR, SBKP e SBGL já operavam com alta eficiência social antes da concessão e apresentaram apenas incrementos marginais após a privatização, confirmando que a infraestrutura pré-existente e a demanda consolidada são elementos-chave para o sucesso da gestão privada (Yoshida & Fujimoto, 2004). Esses casos reforçam que concessões bem estruturadas podem funcionar como catalisadores de eficiência quando há atratividade de mercado e foco estratégico.

Nos aeroportos regionais e de menor porte, notadamente das Rodadas 4 em diante, a análise indica queda na eficiência social (Estágio 1), alinhando-se à tese de que privatizações tendem a reduzir conectividade quando não há subsídios (Choo, Corbo & Wang, 2018). Esses terminais dependem fortemente de políticas públicas e cláusulas contratuais que assegurem rotas regionais, conforme apontado por Carlucci et al. (2018). Ao mesmo tempo, a eficiência produtiva (Estágio 2) nesses aeroportos melhorou, especialmente nos casos das concessões

em bloco da 5ª rodada, como o Bloco Nordeste da AENA, onde a operação integrada com companhias como a Azul e Gol otimizou a rede e promoveu a movimentação (Celestino et al., 2024). Esses dados reforçam a necessidade de regulação inteligente para garantir equilíbrio entre conectividade e produtividade.

O comportamento de eficiência nos grandes aeroportos também revela contradições: investimentos realizados para grandes eventos, como a Copa do Mundo FIFA 2014, criaram capacidade ociosa em terminais como SBGR e SBCF, prejudicando a eficiência produtiva (Toledo et al., 2021). Essa superdimensionamento, somado à má alocação de recursos e baixa autonomia gerencial na gestão pública (Teixeira et al., 2019), afetou o desempenho esperado no pós-concessão. Ainda assim, análises mais complexas, como o modelo cartesiano de Wanke (2013), mostram que aeroportos concedidos tendem a concentrar-se em quadrantes de alta eficiência produtiva, enquanto os da Infraero priorizam a conectividade (eficiência social). Esse padrão reforça a visão de que privatizações, quando acompanhadas de atratividade econômica e infraestrutura adequada, aumentam a eficiência multidimensional dos aeroportos (Adler, Liebert & Yazhemsky, 2013; Barros & Peypoch, 2009).

4. CONCLUSÕES

Os resultados empíricos desta pesquisa evidenciam que a governança, a classe do aeroporto e a rodada de concessão influenciam diretamente a eficiência social do setor aeroportuário brasileiro. A análise realizada com o modelo DEA Network em dois estágios permitiu compreender como a infraestrutura física se converte em oferta de serviços (Estágio 1) e, posteriormente, em atendimento à demanda (Estágio 2). Os aeroportos concedidos, especialmente os de maior porte e das rodadas mais recentes, apresentaram melhor desempenho em ambos os estágios, destacando a eficácia de contratos com exigências regulatórias mais robustas e foco em resultados operacionais.

A análise cartesiana (Wanke, 2013) revelou padrões distintos entre aeroportos concedidos e públicos: os primeiros concentraram-se em quadrantes de alta eficiência produtiva, enquanto os últimos mostraram maior eficiência social, porém com limitações operacionais. Isso sugere que a governança influencia diretamente os resultados, mas que sua efetividade depende do alinhamento entre objetivos públicos e privados, de marcos contratuais bem estruturados e da capacidade de resposta das concessionárias. O modelo aplicado, inovador ao incorporar outputs indesejados, destaca a complexidade das interações no setor aéreo, considerando a articulação entre aeroportos e companhias aéreas como fator-chave na performance sistêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, N.; LIEBERT, V.; YAZHEMSKY, E. Benchmarking airports from a managerial perspective. *Omega,* 2013.

BARROS, Carlos Pestana; PEYPOCH, Nicolas. An evaluation of European airlines' operational performance. *International Journal of Production Economics*, v. 122, n. 2, p. 525–533, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.04.016.

CARLUCCI, F.; CIRA, A.; COCCORESE, P. Measuring and Explaining Airport Efficiency and Sustainability: Evidence from Italy. *Sustainability*, v. 10, n. 2, p. 400, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su10020400.

CELESTINO, M. A.; LIMA, I. M. T. B. da C.; BRAGA, I. Y. de L. G.; BANDEIRA, M. C. G. da S. P.; FALCÃO, V. A. O Impacto da Concessão no Desempenho de Aeroportos Regionais: O Caso de Campina Grande-PB. In: XXI SITRAER 2024 | *Air Transportation Symposium. Fortaleza, Ceará*: ATRS, 2024.

CHOO, Y. Y.; CORBO, L.; WANG, K. Joint impact of airline market structure and airport ownership on airport market power and profit margin. *Transport Policy*, v. 72, p. 67-78, https://www.google.com/search?q=2018.

DOMINGOS, M. C. de F.; GOMES, R. de A.; QUEIROZ JÚNIOR, H. da S.; FALCÃO, V. A. Unlocking efficiency and environmental impact: Analyzing concessioned Brazilian airports. *Journal of Air Transport Management*, v. 124, p. 102754, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102754

KAO, C.; HWANG, S. N. Efficiency measurement for network systems: IT impact on firm performance. *Decision Support Systems*, v. 43, n. 3, p. 1045–1059, 2007.

TEIXEIRA, J. C. et al. Análise da eficiência dos aeroportos brasileiros por meio de uma abordagem DEA Network com três estágios. Transportes, v. 32, n. 1, p. 1-17, https://www.google.com/search?q=2024.

TOLEDO, Fernanda Silva; FALCÃO, Viviane Adriano; CAMIOTO, Flávia de Castro; SILVA, Paulo Afonso Lopes da. A privatização torna os aeroportos brasileiros mais eficientes? *Transportes*, v. 29, n. 2, p. 1–16, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2304.

TONE, K.; TSUTSUI, M. Network DEA: A slacks-based measure approach. *European Journal of Operational Research*, v. 197, n. 1, p. 243–252.

WANKE, P. F. Physical infrastructure and flight consolidation efficiency drivers in Brazilian airports: A two-stage network-DEA approach. *Journal of Air Transport Management*, v. 31, p. 1-5, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.09.001.

Hélio da Silva Queiroz Júnior (helio.junior@ufpe.br). UFPE.Recife - PE, 50670-901.

CUSTOS DE ATENDIMENTO PÙBLICO RODOVIÁRIO EM ACIDENTES NAS RODOVIAS FEDERAIS DO RIO GRANDE DO NORTE EM 2024

Pablo Manoel Santana Vital, Fabiano da Costa Dantas
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA

RESUMO
Diariamente ocorrem centenas de acidentes nas rodovias brasileiras e como os princípios econômicos regem, toda ação humana ocasiona em um custo e com os acidentes de trânsito isso não seria diferente. Dessa forma este trabalho tem como objetivo mensurar os custos de atendimento dos policiais rodoviários federais nos acidentes das rodovias federais no Rio Grande do Norte durante o ano de 2024. Para tanto, utiliza-se uma equação que considera o deslocamento, a classificação do acidente, os custos operacionais e dos agentes na composição dos custos. Assim, dos 1.596 acidentes registrados em 2024 foram gastos R$ 7.721.456,65 em atendimentos. Os valores modificam conforme a classificação dos atendimentos e a distância entre o posto policial e o local do acidente.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme o painel de acidentes rodoviários da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2025), somente em 2024 foram registrados 73.114 acidentes em rodovias federais no Brasil. Destes, foram registrados 84.398 feridos e 6.153 mortes. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada em parceria com o Departamento Nacional de Trânsito (IPEA/DENATRAN, 2006), devido a frequência dos casos, os acidentes de trânsito foram incorporados ao cotidiano da vida das pessoas de maneira silenciosa e assustadora. E uma mudança desse comportamento inicia-se com a criação de subsídios necessários para tomadas de decisões e implementações de ações preventivas baseados em valores reais que apontam os fatos.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2004), foram criados programas de segurança de transito que resultaram metodologias diversas, entre elas a da identificação, com base no índice de acidentes por trecho e classe de rodovia, dos segmentos críticos na malha rodoviária federal, seguida pela análise das causas dos acidentes ocorridos em cada local crítico e a proposição de melhorias corretivas de engenharia para a eliminação desses acidentes, tendo-se gerado, para fins dos estudos então realizados, um banco de dados de acidentes com base no documento de coleta muito utilizado pelo Departamento de Polícia Rodoviária Federal.

De acordo com Carvalho (2020), é dubitável mensurar matematicamente o que representa a perda de uma vida humana ou os danos psíquicos e estresses traumáticos aos quais as vítimas de trânsito e seus familiares são submetidos após eventos dessa natureza. Contudo, há também a formação de custos econômico-financeiros que impactam diretamente as famílias, bem como a sociedade em geral, e que podem ser estimados por meio de metodologias específicas de cálculo.
O custo total de cada acidente é a soma de cada componente de custo calculado associado às variáveis de controle do modelo aditivo – custos associados às pessoas, custos associados aos veículos e outros custos (Carvalho, 2020).

Alguns destes valores estão inseridos os custos de atendimento e administrativos dos serviços públicos envolvidos e as perdas econômicas e previdenciárias ocorridas, ou seja, danos sociais e econômicos que oneram os cofres públicos, indicando a necessidade de intensificar políticas publicas que reduzam a quantidade e a gravidade dos acidentes de trânsito. Nisso inclui o custo do transporte das vítimas de acidentes de trânsito do local da ocorrência até o hospital ou pronto-socorro. Assim como, o custo da utilização de equipamentos especiais e do deslocamento das equipes de resgate, com veículos e profissionais especializados (ambulâncias, médicos, paramédicos).

Dessa forma, este trabalho possui como objetivo a mensuração dos custos de atendimento da instituição policial pública – Polícia Rodovia Federal (PRF) – em acidentes de trânsito nas rodovias federais do Rio Grande do Norte durante o ano de 2024. Como os acidentes de trânsito passam a representar um sério problema de saúde pública e, como tal, devem ser enfrentados de forma responsável e continuada, caso se deseje que nosso país deixe de figurar na lamentável dianteira que ocupa, quando se trata de situá-lo no *ranking* mundial da mortalidade no trânsito (DNIT, 2004).

2. TEORIA DOS CUSTOS ASSOCIADOS AOS ACIDENTES DE TRÂNSITO

De acordo com o World Bank (2005), os custos dos acidentes são muitas vezes considerados como uma combinação de itens, alguns dos quais são custos de recursos incorridos pela sociedade em consequência do acidente (serviços de emergência, assistência médica, danos materiais, etc.), alguns dos quais representam uma parte da contribuição esperada do indivíduo para a produção que deixa de ser possível devido às suas lesões e alguns dos quais representam a perda de bem-estar pessoal do indivíduo (ou "custos humanos"). Estes custos humanos são por vezes caracterizados como "dor, pesar e sofrimento".

Segundo Wijnen et al. (2017), os custos dos acidentes são considerados de uma perspectiva socioeconómica e são tidos em conta os seguintes componentes de custo:
Custos médicos (custos de transporte para o hospital, custos relacionados com o tratamento hospitalar); Custos relacionados com a perda de produção; Custos humanos; Custos relacionados com danos materiais (principalmente veículos); Custos administrativos (polícia, bombeiros, seguros); e outros custos (custos funerários, custos de congestionamento).

2.1. Estrutura básica da função de custos dos acidentes

De acordo com o IPEA/DENATRAN (2006), a função de custos definida para estimativa dos impactos econômicos dos acidentes nas rodovias brasileiras ficou composta de quatro grupos de componentes de custos relativos: i) às pessoas; ii) aos veículos; iii) à via e ao ambiente onde ocorre o acidente; e iv) ao envolvimento de instituições públicas com o acidente, quer seja o seu atendimento direto ou outras atividades decorrentes do acidente como processos judiciais, por exemplo. Assim, a função global dos custos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras ficou definida como segue:
Cacidente = Cpessoas + Cveículos + Cvia/ambiente + Cinstitucionais
Sendo: Cpessoas = Ccuidados em saúde (Cpré-hospitalar + Chospitalar + Cpós-hospitalar) + Cperda de produção + Cremoção/translado;
Cveículos = Cdanos materiais ao veículo + Cperda de carga + Cremoção/guincho ou pátio + Creposição;
Cvia/ambiente = Cdanos à propriedade pública + Cdanos à propriedade privada;
Cinstitucionais = Cjudiciais + Catendimento.

2.1.1 Custos associados às pessoas

Conforme o IPEA/DENATRAN (2006), os custos associados as pessoas constituem - Custo do atendimento pré-hospitalar: atendimento da vítima por unidades dotadas de equipamentos especiais, com veículos e profissionais especializados (ambulâncias, bombeiros, médicos etc.);
Custo do atendimento hospitalar: soma dos custos do atendimento médico hospitalar do paciente não internado e do paciente internado na Unidade de Terapia Intensiva e/ou Enfermaria;
Custo pós-hospitalar: a soma dos custos com reabilitação, para os casos de sequela temporária ou definitiva, com procedimentos, medicamentos, transporte, equipamentos e outros;
Custo da perda de produção: é o custo correspondente às perdas econômicas das vítimas de acidente que, em decorrência da interrupção das suas atividades produtivas, deixam de gerar renda e produção ao sistema econômico;
Custo de remoção/translado: custo de remoção da vítima fatal ao Instituto Médico Legal (IML); e custo de translado — terrestre ou aéreo — da vítima fatal do IML/hospital ao local do funeral;
Gasto previdenciário: é a soma dos custos incorridos: i) à empresa, relativos ao valor da previdência, pago por ela, em um período de até 15 dias de afastamento do trabalho em decorrência de um acidente de trânsito; ii) sobre a previdência social, em virtude do afastamento, temporário ou definitivo, do trabalhador em decorrência de um acidente de trânsito; e iii) sobre as seguradoras — seguro DPVAT (Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre) (IPEA/DENATRAN, 2006).

2.1.2 Custos associados aos veículos

Segundo o IPEA/DENATRAN (2006), os custos associados aos veículos estão organizados da seguinte maneira - Custo dos danos materiais aos veículos: custo de recuperação dos veículos danificados em acidentes de trânsito;
Custo de perda de carga: o custo de avaria da carga que estava no veículo envolvido em acidente;
Custo de remoção/pátio: custo de remoção do veículo e diárias de pátio de armazenamento;

Custo de reposição: despesa incorrida pela substituição do veículo, no período em que ele ficou sem condições de uso.

2.1.3 Custos institucionais

De acordo com o IPEA/DENATRAN (2006), os custos institucionais referem-se aos - Custo de processos judiciais: custo do funcionamento da estrutura judicial em função do atendimento às questões referentes aos acidentes de trânsito;

Custo do atendimento policial: soma dos custos do tempo dos policiais rodoviários, da utilização de veículos para atendimento no local do acidente e do deslocamento para hospital ou delegacia.

2.1.4 Custos associados à via e ao ambiente do local de acidente

Em conformidade com o IPEA/DENATRAN (2006), os custos associados à via e ao ambiente do local de acidente integram - Custo dos danos à propriedade pública: custo de reposição/recuperação de mobiliário ou equipamentos danificados ou destruídos em função de acidentes nas rodovias;

Custo dos danos à propriedade privada: custo de recuperação de propriedades particulares danificadas em função de acidentes de trânsito.

3. METODOLOGIA

A amostra refere-se as ocorrências da instituição policial pública em acidentes de trânsito nas rodovias federais no Rio Grande do Norte no período de 01/01/2024 a 31/12/2024, envolvendo todos os modelos de veículos ocasionados nos acidentes. O banco de dados foi retirado do Boletim de Acidente de Trânsito (BAT) da Polícia Rodoviária Federal (PRF). De acordo com o DNIT (2025), a malha viária federal no Rio Grande do Norte é composta pelas BR's 101, 104, 110, 226, 304, 405, 406, 427 e 437.

De acordo com os estudos do IPEA/DENATRAN (2006), o custo de atendimento da instituição policial pública em acidentes de trânsito nas rodovias federais pode ser representado pela equação 1.

$$C_{atendimento} = d.Cop + (Tdesloc. + Tatend).S\# \quad (1)$$

Onde:

d = distância entre posto da Polícia Rodoviária Federal mais próximo e o local do acidente

Cop = Custo operacional de deslocamento por km = R$ 9,80/km[1]

Tdesloc = tempo de deslocamento = (distância percorrida) / velocidade média de deslocamento

Velocidade média de deslocamento = 70km/h

Tatend = tempo de atendimento no local do acidente =

a) acidentes sem vítimas – meia hora; b) acidentes com vítimas – uma hora; c) acidentes com fatalidade – duas horas e meia.

S = Custo por hora do agente = R$ 70,01[2]

Os custos são representados pela somatória dos custos do tempo dos policiais, da utilização dos veículos para atendimento no local do acidente e deslocamento para hospital ou delegacia.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A malha viária do Rio Grande do Norte conta com 1.913 quilômetros de rodovias federais distribuídas entre: BR 101, com extensão de 196 km; BR 104, com extensão de 218 km; BR 110, com extensão de 180 km; BR 226, com extensão de 429 km; BR 304, com extensão de 322 km; BR 405, com extensão de 196 km; BR 406, com extensão de 170 km; BR 427, com extensão de 170 km e BR 437 com extensão de 32 km.

A BR 101 extende-se do litoral do Rio Grande do Norte desde a divisa com a Paraíba até Touros. A BR 110 liga a cidade de Areia Branca a Mossoró e se extende até a Paraíba. A BR 226 corta o Rio Grande do Norte no sentido leste-oeste, desde Natal até a divisa com o Ceará, ligando as cidades da Região do Seridó. A BR 304 corta o Estado potiguar no sentido leste-oeste, desde Natal até a divisa RN/CE. A BR 405 tem início em Mossoró e atinge a divisa RN/PB. A BR 406 liga Natal ao litoral norte do Estado. Durante o período de 01/01/2024 a 31/12/2024 foram registrados 1.596 acidentes de trânsito nas rodovias federais que cortam o Rio Grande do Norte. A distribuição dos acidentes de trânsito ao longo das rodovias federais no Rio Grande

[1] Valores atualizados conforme correção monetária baseado no indicador oficial de inflação no Brasil - IPCA
[2] Valores atualizados conforme correção monetária baseado no indicador oficial de inflação no Brasil - IPCA

do Norte em 2024 pode ser observada no Figura 1 a seguir.

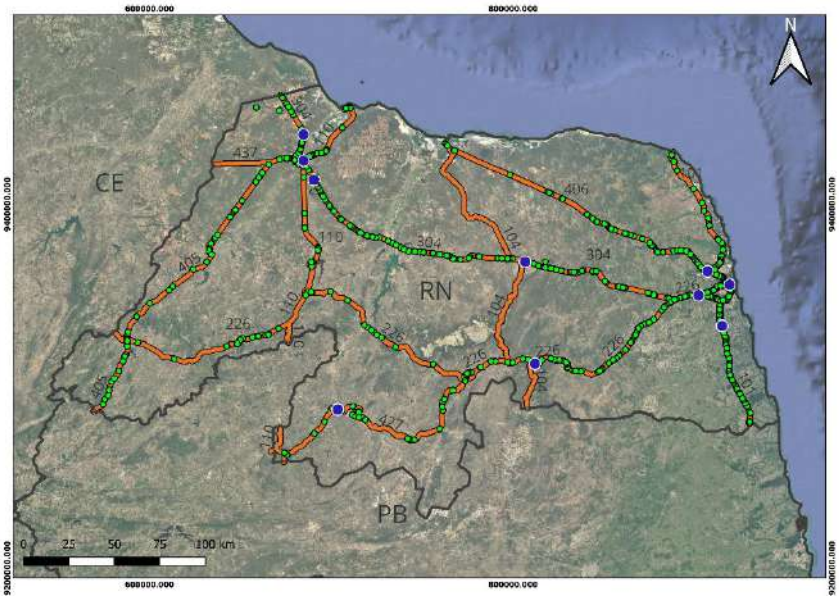


Figura 1: Distribuição dos Acidentes de Trânsito nas BR's do Rio Grande do Norte em 2024

Dos 1.596 acidentes registrados nas rodovias federais no Rio Grande do Norte em 2024, a rodovia que registrou o maior número de acidentes foi a BR 101, seguido pela BR 304; posteriormente pelas BR 406; BR 226; BR 110; BR 405 e BR 427, respectivamente. A única rodovia federal do Rio Grande do Norte que possui toda a extensão de suas vias duplicadas é justamente a BR 101. A distribuição percentual dos acidentes de trânsito ocorridas nas rodovias federais no Rio Grande do Norte em 2024 podem ser observadas na Figura 2 a seguir.

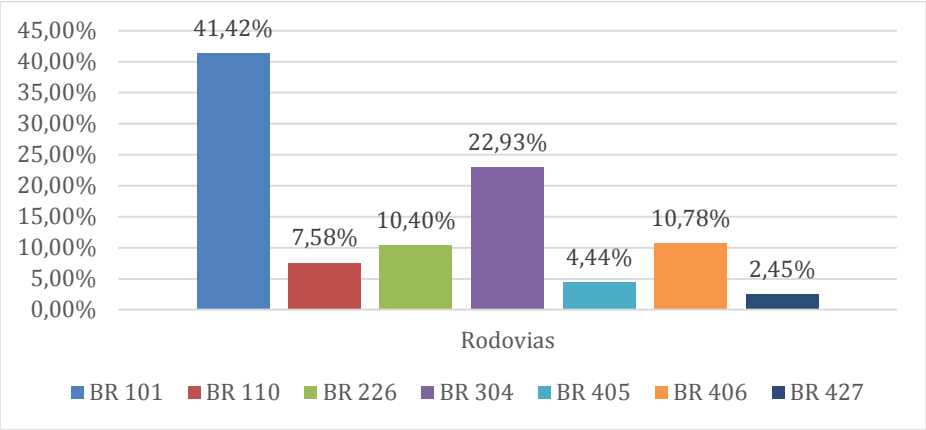


Figura 2: Distribuição Percentual dos Acidentes nas Rodovias Federais no Rio Grande do Norte em 2024

Como o maior número de acidentes em 2024 ocorreram na BR 101 é natural que os maiores custos de atendimentos da instituição policial pública também tenham sido em tal rodovia. O valor total ficou próximo de R$ 3.000.000,00; seguido pelos custos de atendimentos na BR 304 com valores próximos a R$ 1.700.000,00. Apesar dos custos totais de atendimentos terem ocorridos na BR 101; os valores médios dos atendimentos das rodovias que apresentaram o maior (BR 101) e o menor (BR 427) número de acidentes foram praticamente idênticos. Isso ocorre devido a distância de deslocamento entre posto da Polícia Rodoviária Federal mais próximo e o local do acidente serem bem maiores na BR 427. Esse e demais valores podem ser observados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Custos de Atendimento da Instituição Policial Publica nos Acidentes em 2024 Conforme as Rodovias

Rodovias	Número de Acidentes	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Total
BR 101	661	R$ 4.525,18	R$ 4.427,40	R$ 12.263,00	R$ 2.100,30	R$ 2.991.148,39

BR 110	121	R$ 4.283,40	R$ 4.214,64	R$ 11.008,02	R$ 2.105,70	R$ 518.291,46
BR 226	166	R$ 6.708,26	R$ 6.838,53	R$ 14.583,95	R$ 2.111,10	R$ 1.113.571,18
BR 304	366	R$ 4.643,06	R$ 4.276,20	R$ 11.585,83	R$ 2.103,54	R$ 1.699.362,94
BR 405	71	R$ 5.291,55	R$ 4.513,80	R$ 12.772,72	R$ 2.111,10	R$ 375.700,20
BR 406	172	R$ 4.940,35	R$ 4.265,40	R$ 11.592,31	R$ 2.118,66	R$ 849.741,59
BR 427	39	R$ 4.452,32	R$ 4.437,12	R$ 10.669,98	R$ 2.160,78	R$ 173.640,86

Assim como os locais, os acidentes de trânsito também são classificados quanto aos danos humanos como: com vitimais fatais – com pelo menos uma morte, com vítimas feridas – com ferido(s), porém sem morte(s) e sem vítimas – sem mortes e feridos. Dos 1.596 acidentes de trânsito nas rodovias federais do Rio Grande do Norte em 2024, 105 foram com vítimas fatais, 1.258 com vítimas feridas e 233 sem vítimas. Os custos de atendimento da Polícia Rodoviária Federal nos acidentes de trânsito nas BR's no Rio Grande do Norte em 2024 conforme os danos humanos estão apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Custos de Atendimento da Instituição Policial Publica nos Acidentes em 2024 Conforme os Danos Humanos

Classificação	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Custos
Com Vítimas Fatais	R$ 11.285,10	R$ 10.827,66	R$ 14.583,95	R$ 10.502,58	R$ 1.184.936,22
Com Vítimas Feridas	R$ 4.727,48	R$ 4.409,04	R$ 8.369,45	R$ 4.200,60	R$ 5.947.175,76
Sem Vítimas	R$ 2.529,37	R$ 2.316,30	R$ 5.264,74	R$ 21,003	R$ 589.344,66

Seguindo os preceitos metodológicos apontados pela Equação 1, os custos de atendimento variam conforme a classificação do dano humano ocorrido. Devido a gravidade da ocorrência, os acidentes com vítimas fatais requerem maior tempo de atendimento e deslocamento, seguidos pelos acidentes com feridos e sem ferimentos, respectivamente. Assim, de acordo com a Tabela 2, os maiores custos de atendimento da Polícia Rodoviária Federal nas rodovias federais do Rio Grande do Norte em 2024 foram com ocorrências de vítimas feridas com R$ 5.947.175,76, seguidas pelas ocorrências com vítimas fatais com R$ 1.184.936,22 e por acidentes sem vítimas com R$ 589.344,66. Apesar das médias dos custos serem maiores nas ocorrências de vítimas fatais, os maiores valores totais foram com acidentes com vítimas feridas. Isso ocorre devido ao número de acidentes totais com vítimas fatais terem sido bem menores do que os acidentes com vítimas feridas. Ao total, a União – na unidade policial rodoviária – teve uma estimação nos custos de atendimento em 2024 nas rodovias federais do Rio Grande do Norte um valor de R$ 7.721.456,65.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dos 1.596 acidentes registrados nas rodovias federais do Rio Grande do Norte em 2024, as estimações dos custos de atendimento policial rodoviário, constatou-se que os valores alcançaram um patamar aos cofres do Governo Federal de R$ 7.721.456,65. Observou-se que nem sempre a gravidade do acidente condiz com valores mais altos de atendimento e que o número de acidentes e consequentemente o de atendimento também não representa maiores custos a União.

A distância de deslocamento entre posto da Polícia Rodoviária Federal mais próximo e o local do acidente muitas vezes é o fator determinante na cotação dos custos de atendimento. Visto que no Rio Grande do Norte existem apenas 8 unidades operacionais responsáveis por 1.913 quilômetros de rodovias federais. O que muitas vezes é necessário o deslocamento à distancias maiores para o atendimento e consequente maiores custos.

Uma pesquisa similar a esta foi realizado por Carvalho (2020), no qual foi utilizado a mesma metodologia, porém sua amostra tem abrangência nacional e o seu corte temporal remonta ao ano de 2014. O que torna a comparação de seus resultados com este estudo equivocado, pois tratam de amostras diferentes (país em relação a uma unidade da federação) e um hiato de uma década entre as duas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil, DNIT (2004) Custos de Acidentes de Trânsito nas Rodovias Federais. Publicação IPR – 733, Sumário Executivo, Rio de Janeiro.

Carvalho, C. H. R. (2020) Custos dos Acidentes de Trânsito no Brasil: Estimativa Simplificada com Base na Atualização das Pesquisas do IPEA sobre Custos de Acidentes nos Aglomerados Urbanos e Rodovias, Texto para Discussão 2565, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, Brasília.

CNT (2025) Painel CNT de Acidentes Rodoviários. Acidentes em Rodovias Federais. Brasília – DF. de Norma DNIT

180/2018 – ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

IPEA/DENATRAN (2006) Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras – Relatório Executivo – Brasília: IPEA/DENATRAN/ANTP.

Wijnen, W., Weijermars, W., Vanden Berghe, W., Schoeters, A., Bauer, R., Carnis, L., Elvik, R., Theofilatos, A., Filtness, A., Reed, S., Perez, C., e Martensen, H. (2017) *Crash cost estimates for European countries*, Deliverable 3.2 of the H2020 project SafetyCube.

World Bank (2005) *Transport Economics, Policy, and Poverty Thematic Group*. Transport Notes. TRN-16. Washington, DC.

Pablo Manoel Santana Vital (pablo.vital@alunos.ufersa.edu.br)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas/RN, Departamento de Ciência e Tecnologia – DCT, Avenida Universitária "Leto Fernandes," SN, RN 233, Zona Rural, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil
Fabiano da Costa Dantas (fabianodantas@ufersa.edu.br)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas/RN, Departamento de Ciência e Tecnologia – DCT, Avenida Universitária "Leto Fernandes," SN, RN 233, Zona Rural, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil

DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO DE TRANSPORTE ESCOLAR: REFLEXÕES A PARTIR DA EXPERIÊNCIA DO SISTEMA SETE

Juliana Pereira Rincon, Cláudia Mikaella Moraes, Marcos Roriz Junior
Faculdade de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal de Goiás

RESUMO
A incorporação de sistemas de informação na gestão de transporte pode auxiliar os municípios no planejamento e operação de seu sistema de transporte. Apesar das vantagens, sabe-se das dificuldades em implantar esses sistemas, em particular devido à complexidade tecnológica e a mudança de dinâmica de trabalho dos atores envolvidos. Essa dificuldade se acentua no âmbito do transporte escolar em decorrência das assimetrias socioeconômicas dos municípios brasileiros. Para compreender esses desafios, este trabalho investigou o processo de implementação do Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE), um *software* de gestão para o transporte escolar. Para tal, o estudo acompanhou o processo de implantação em 35 municípios brasileiros e conduziu uma análise documental e entrevistas com os participantes. Os dados revelam que, embora o SETE tenha potencial para aprimorar a gestão, sua adoção esbarra em obstáculos como escassez de pessoal, alta rotatividade de equipes e dificuldades técnicas com o sistema.

1. INTRODUÇÃO

A constituição brasileira em vigência assegura o direito à educação a todos os brasileiros, independentemente de sua localização (BRASIL, 1988). Desta forma, os gestores devem fornecer transporte para todos os seus estudantes, mesmo aqueles localizados em áreas remotas, tais como áreas rurais e ribeirinhas. Este fator destaca o aspecto desafiador deste objetivo, uma vez que áreas rurais e remotas são carentes em termos de infraestrutura de transportes (FNDE/CEFTRU, 2007).

A carência, no entanto, não se limita ao aspecto físico, estendendo-se aos aspectos da gestão e planejamento, muitas vezes com poucos recursos humanos e tecnológicos para a realização destes serviços. De fato, a análise conduzida por Przeybilovicz *et al.* (2018) revela que 1309 municípios brasileiros (23% do total) podem ser classificados como "*sem tecnologia*", isto é, não empregam ou empregam de forma precária o uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) para gestão de políticas públicas. Fato corroborado por Bertolini e Giovanini (2022), que apontam a falta de infraestrutura digital adequada à adoção de tecnologias de governança digital (*e-software*). Além disso, os autores destacam a escassez de recursos humanos especializados em tecnologia, bem como a baixa integração entre sistemas de diferentes setores no município.

Sabe-se que a implementação de sistemas digitais de gestão tem se mostrado essencial para aprimorar a administração pública em diferentes áreas. Por exemplo, de acordo com Nijkamp e Cohen-Blankshtain (2009), 67% dos gestores europeus acreditam que a implantação de sistemas de *e*-governança torna o processo de tomada de decisão mais eficiente. No contexto do transporte escolar, o uso de um *software* de gestão vai além da digitalização de processos: ele facilita o controle de custos, o preenchimento e a consulta de dados, e amplia o acesso às informações, tornando-as mais acessíveis e organizadas. Outro aspecto importante é a continuidade administrativa: com registros digitais bem estruturados, a transição entre gestões se torna mais fluida, garantindo a continuidade de projetos e evitando a perda de informações importantes (CNM, 2015; Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos, 2024; Radar Ibê, 2021).

Para auxiliar os municípios brasileiros, em especial aqueles que não possuem soluções próprias, o Governo Federal desenvolveu o Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE), em parceria com o Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar Centro-Oeste (CECATE Centro-Oeste) e o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE). A proposta foi criar uma ferramenta que apoiasse os municípios no planejamento e na gestão do transporte escolar. Para garantir sua ampla adoção, o FNDE tornou o uso do SETE obrigatório para os órgãos gestores vinculados ao Programa Caminho da Escola e ao Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar (PNATE), conforme as Resoluções n°1, de 20 de abril de 2021 e n°18, de 22 de outubro de 2021 (FNDE, 2023; CECATE Centro-Oeste, 2025).

Porém, como relatado por Porru *et al.* (2020), há diversos desafios na implantação desses sistemas: como a coleta de dados e a acessibilidade. No trabalho, os autores destacam os entraves tecnológicos na implantação de sistemas no contexto coreano. Porém, os autores limitam-se a discutir aspectos técnicos, não adentrando os desafios de outra natureza, como os processuais e os relacionados a recursos humanos. Para melhor

compreender esses entraves, este trabalho visa investigar quais são os desafios que se encontram no processo de implementação de sistemas de *software* para o transporte escolar no Brasil através da implantação do SETE.

2. MÉTODO

Este estudo utiliza uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada no acompanhamento do processo de implementação do SETE e na análise dos relatórios e de entrevistas com gestores de 35 municípios brasileiros. O SETE é um *software* livre que fornece aos gestores, de forma modular, um conjunto de ferramentas para auxiliar na gestão do transporte escolar, tais como digitalização dos alunos e escolas atendidas, gestão da frota, roteirização e estimativa de custo da rota (CECATE Centro-Oeste, 2025). A Figura 1 ilustra a interface gráfica do sistema na versão *web*.

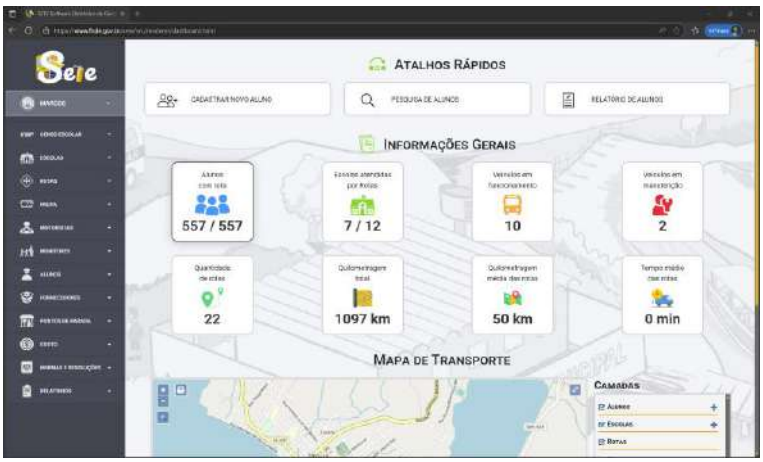


Figura 1: Tela do *software* SETE

A Tabela 1 ilustra os municípios que participaram do processo piloto. Note que há representante de todas as regiões do país. Em relação ao transporte escolar fornecido pelos municípios pilotos, nota-se a predominância do modo de transporte rodoviário frente ao aquaviário. Além disso, destaca-se que poucos municípios realizam a gestão do transporte escolar para os estudantes residentes na área urbana.

O acompanhamento de implantação dos pilotos ocorreu de 2021 até 2024. As entrevistas foram realizadas no segundo semestre do ano de 2024. Para enriquecer a análise, combinou-se os relatos obtidos nas entrevistas com os dados preenchidos pelos municípios no banco de dados do SETE até a data de 26/09/2024 de forma anonimizada. Além disso, utilizou-se os dados do Censo Escolar para compreender o nível de uso do sistema. O link para as perguntas da entrevista semiestruturada pode ser acessada através do seguinte link: *http://marcosroriz.com.br/papers/anpet_2025_pilotos_sete/MODELO_FICHA.pdf*

Tabela 1: Lista de municípios pilotos

Reg.	Município	Estado	Número de alunos transportados	Público	Modos de Transporte	Tamanho da equipe
Centro-Oeste	Piloto 1	GO	246	Rural	Rodoviário	1
	Piloto 2	GO	1755	Urbano	Rodoviário	4
	Piloto 3	GO	898	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 4	MT	848	Rural	Rodoviário	1
	Piloto 5	MT	2295	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 6	MT	659	Rural	Rodoviário	3
	Piloto 7	MT	352	Rural	Rodoviário	3
Nordeste	Piloto 8	BA	1555	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 9	BA	1254	Rural	Rodoviário	1
	Piloto 10	PE	4979	Urbano	Rodoviário	1
	Piloto 11	PE	7719	Rural	Rodoviário	10
	Piloto 12	PE	2014	Rural	Aquaviário e Rodoviário	4
	Piloto 13	PE	1468	Rural	Rodoviário	1
	Piloto 14	PE	5426	Urbano e Rural	Aquaviário e Rodoviário	1
	Piloto 15	PI	3572	Rural	Rodoviário	1
	Piloto 16	RN	4094	Rural	Rodoviário	2

Norte	Piloto 17	AM	6574	Rural	Aquaviário e Rodoviário	2
	Piloto 18	PA	5559	Rural	Aquaviário e Rodoviário	2
	Piloto 19	PA	6984	Rural	Aquaviário e Rodoviário	4
	Piloto 20	RO	1833	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 21	RO	655	Rural	Aquaviário e Rodoviário	Não resp.
	Piloto 22	RO	9327	Rural	Rodoviário	Não resp.
	Piloto 23	RO	980	Rural	Rodoviário	2
Sudeste	Piloto 24	ES	2672	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 25	ES	1555	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 26	MG	1035	Rural	Rodoviário	4
	Piloto 27	MG	846	Rural	Rodoviário	3
	Piloto 28	MG	485	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 29	MG	1382	Urbano e Rural	Rodoviário	3
	Piloto 30	SP	1735	Urbano	Rodoviário	2
	Piloto 31	SP	1222	Urbano e Rural	Rodoviário	1
Sul	Piloto 32	PR	741	Rural	Rodoviário	2
	Piloto 33	RS	954	Rural	Rodoviário	3
	Piloto 34	SC	1698	Urbano e Rural	Rodoviário	1
	Piloto 35	SC	1301	Rural	Rodoviário	1

3. RESULTADOS

Ao analisar os relatos dos municípios pilotos, destaca-se dois eixos problemáticos no processo de implantação de sistemas: recursos humanos e coleta de dados. Em relação ao primeiro eixo, destaca-se a limitação de funcionários alocados na gestão do transporte escolar do município como um todo.

3.1. Desafios referentes aos recursos humanos

Nota-se que 32% dos municípios possuem apenas um único funcionário, enquanto que 38% possuem dois trabalhadores lotados na gestão do transporte escolar. A maior equipe entre os pilotos se encontra no Piloto #14, com dez colaboradores. A explicação para tal decorre do alto número de alunos transportados pelo município, mais de 7 mil. Para lidar com a gestão dessa quantidade de discentes, requer-se uma equipe maior. Porém, nem sempre isso acontece. Como contraexemplo, considere a situação do Piloto #18. Este município transporta mais de cinco mil alunos e realiza a gestão deles usando apenas dois funcionários. Por fim, observou-se que um tamanho de equipe reduzido dificulta a implantação do sistema, uma vez que retirar um dos poucos funcionários para participar de um processo de capacitação pode comprometer o andamento da gestão, já que essa mesma equipe é tipicamente responsável por todas as demais atividades ligadas ao transporte escolar. Neste critério não se observou aspectos regionais.

O próximo obstáculo se trata da rotatividade de funcionários, em que foram analisados dados de um período de dois anos. Em 31% dos municípios houve troca de funcionários e em 44% dos municípios não houve a substituição de pessoal, os demais municípios pilotos não souberam responder (25%) se houve troca de funcionários durante o período proposto. A rotatividade dificulta a continuidade da gestão, uma vez que requer novos treinamentos. Além disso, como reflexão, é possível compreender que parte dos entrevistados que não souberam responder pode indicar a ocorrência de rotatividade, já que o desconhecimento pode decorrer do fato de o funcionário ser novo em seu cargo – um espelho da própria rotatividade. Assim como o tamanho da equipe, não se observou variação na rotatividade da equipe em diferentes regiões do país.

O tamanho da equipe também impacta na atividade de coleta de dados. Por exemplo, o módulo de rotas do SETE possibilita que o gestor digitalize os trajetos através de arquivos abertos espaciais GPX (*GPS eXchange Format*) gerados por aplicativos móveis gratuitos, como *WikiLoc* e *OpenGPX Tracker*. O funcionamento do módulo segue a seguinte lógica: o gestor portando um dispositivo móvel faz o trajeto da rota com o aplicativo móvel em operação. O aplicativo então registra periodicamente a posição GPS do dispositivo, por exemplo, segundo a segundo. Ao final da rota, cria-se digitalmente o arquivo a partir dessas posições. Porém, devido ao tamanho da equipe, alguns gestores não conseguiram se ausentar de suas funções para realizar essa tarefa.

3.2. Desafio referente aos dados

Como mencionado, os desafios de equipe impactam diretamente o preenchimento de dados no sistema. No caso dos alunos do transporte escolar, o SETE oferece três formas de cadastro: manual, planilha eletrônica e censo escolar. A maioria dos municípios (57,89%) optou pelo modo manual, mais lento devido à limitação de

pessoal. Outros 26,32% utilizaram planilhas, e 15,79% recorreram ao censo escolar — método que se tornou mais complexo nos últimos anos por exigências da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). Isso evidencia a necessidade de mecanismos que integrem o SETE a outros sistemas, como bases estaduais e o próprio censo.

Para compreender a completude do dado, comparou-se o quantitativo de alunos registrados do SETE com os relatados no censo escolar dos respectivos municípios. Neste quesito, observou-se que, em geral, os municípios que já possuem outros sistemas tiveram um preenchimento inferior aos que não possuem. Por exemplo, os pilotos do estado de São Paulo, que possuem sistema estadual próprio, registraram apenas 33% do quantitativo de alunos no SETE frente ao relatado no censo.

Outro complicador refere-se ao preenchimento dos dados espaciais. Apenas 19% dos municípios realizaram totalmente o georreferenciamento dos discentes. Entre as principais dificuldades relatadas para realização do georreferenciamento, encontra-se o tamanho da equipe. Como mencionado previamente, algumas equipes contam com somente uma pessoa, o que inviabiliza a ida a campo para coleta de dados GPS. Como alternativa, pode-se pensar em soluções de georreferenciamento indiretas, como aquelas que utilização os dados de contas de energia ou água para estimar a localização dos alunos. Embora a técnica seja promissora, exigindo integração com bancos de dados das prestadoras de serviço, os pilotos relataram problemas de precisão, como alunos sendo localizados em municípios vizinhos ou até mesmo em outro país. Isso indica que a abordagem ainda necessita de ajustes antes de ser amplamente adotada.

Outra questão reportada refere-se ao mapa desatualizado no SETE. Isso porque, o sistema utiliza como mapa de fundo as plataformas abertas *OpenStreetMaps* e *Bing Maps*. As plataformas mencionadas podem ser integradas livremente em outros sistemas, sem custos. Porém, como reportado por Roriz Junior (2023), há uma discrepância na atualidade dos mapas das áreas rurais, o que dificulta a localização dos discentes. Como alternativa, pode-se pensar em integrar plataformas proprietárias aos sistemas, como o Google Maps, porém isso gerará um custo interno para a manutenção do *software*.

Destaca-se a dúvida recorrente referente à necessidade de preenchimento dos dados dos atores terceirizados no sistema, como veículos e motoristas externos. Essa confusão fez com que alguns municípios só preenchessem os dados referentes aos equipamentos e recursos humanos providos diretamente pela prefeitura. Como justificativa, os gestores apontaram a dificuldade em obter dados dos prestadores terceirizados. Também se questionou os pilotos o preenchimento dos dados optativos, como data de vencimento da Carteira de Habilitação Nacional (CNH) e do salário dos motoristas. Esses dados são importantes pois possibilitam o correto funcionamento de outros módulos, como o de estimativa de custo. Porém, se observou que somente 7 dos 36 pilotos (19.4%) preencheram adequadamente esses dados.

Por fim, em relação aos problemas de infraestrutura, alguns pilotos reportaram alguns *bugs* e a instabilidade do servidor do sistema. Este problema se manifestou mais durante a migração do SETE para o FNDE. Outra dificuldade reportada refere-se a dificuldade de identificar dados duplicados, *e.g.*, motoristas que possuem a mesma CNH. Apesar do sistema impedir o registro de dados duplicados, não há uma forma fácil de identificá-los. Esses problemas evidenciam a necessidade de suporte contínuo e melhorias na interface do sistema.

4. CONCLUSÃO

A experiência dos municípios pilotos com a implantação do SETE evidencia que, embora a digitalização da gestão do transporte escolar represente um avanço necessário, ela não ocorre sem entraves. Muitos dos problemas relatados não dizem respeito apenas à tecnologia em si, mas sim a um contexto de deficiência em processos e recursos humanos, incluindo a rotatividade e a falta de funcionários capacitados. Como alternativa, para lidar com o tamanho reduzido das equipes, é necessário considerar formas de capacitar outros atores, como motoristas e monitores, para colaborar na gestão do transporte escolar.

Além disso, observou-se certa confusão por parte dos gestores quanto à responsabilidade de informar os dados dos prestadores de serviço terceirizados, além da dificuldade prática de obtê-los. Nesse sentido, é fundamental esclarecer que a terceirização não exime o município do dever de prestar informações sobre esses serviços. Semelhantemente, se observou um baixo preenchimento dos dados optativos, como os relacionados aos salários de motoristas e características do veículo. A inexistência desses dados impede o município de utilizar

módulos dependentes, como a estimativa de custo da rota ou a roteirização. Uma possível solução seria tornar tais campos obrigatórios. Porém, destaca-se que essa medida pode dificultar ainda mais o processo de implantação do sistema, pois o sistema irá requerer uma maior completude dos dados para funcionamento. Destaca-se que não se observou variação significativa dos pilotos nas regiões do país, mas em função do tamanho da equipe e da existência ou não de sistemas prévios.

Por fim, os municípios reportaram uma necessidade de se criar mecanismos para facilitar a troca e integração de dados entre sistemas. Neste sentido, aponta-se como trabalho futuro a construção de um formato padrão para troca de dados de transporte escolar através de um protocolo aberto. Nesta linha, a equipe do CECATE-CO desenvolveu uma API (*Application Programming Interface*), uma interface computacional que possibilita que o SETE possa ler quanto receber dados de outros sistemas de transporte e externos. Atualmente, a API encontra-se em análise para sua possível liberação de uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidente da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em 02 fev. 2021.

Bertolini, L. B., e Giovanini, A. (2022) Sistemas inteligentes e transformação digital: evidências empíricas para os municípios brasileiros. Textos de Economia, 25(1), 1–25. doi:10.5007/2175-8085.2022.e87001

CNM, Confederação Nacional de Municípios. (2015) Modernização da Gestão E-governança nos Municípios Brasileiros. CNM. Disponível em: https://cnm.org.br/biblioteca/exibe/2092. Acesso em 06/07/2025.

CECATE-CO, Centro Colaborador de Apoio ao Transporte Escolar – Centro-Oeste (2023). SISTEMA ELETRÔNICO DE GESTÃO DO TRANSPORTE ESCOLAR. Disponível em <https://cecate.fct.ufg.br/p/49406-sete-sistema-eletronico-de-gestao-do-transporte-escolar>. Acesso em 06/07/2025.

ELIAS, E. N. N. et al. The quality of OpenStreetMap in a large metropolis in northeast Brazil: Preliminary assessment of geospatial data for road axes. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 26, n. 3, p. e2020012, 2020.

FNDE, Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (2023) FNDE reforça a obrigatoriedade do preenchimento de dados no Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar. Rede Integrar. Disponível em: https://www.gov.br/fnde/pt-br/assuntos/noticias/fnde-reforca-a-obrigatoriedade-do-preenchimento-de-dados-no-sistema-eletronico-de-gestao-do-transporte-escolar. Acesso em 06/07/2025.

FNDE/CEFTRU. Projeto: Transporte Escolar Rural – Volume II – Questionário Web. Centro de Formação de Recursos Humanos e Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, 2007.

Ministério da Educação. (2024) Caminho da Escola. gov.br. Obtido 21 de junho de 2025, de https://www.gov.br/fnde/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/caminho-da-escola

Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos. (2024, julho 30) Gestão reforça importância das parcerias com os estados para impulsionar entrega de políticas públicas. gov.br. Disponível em: https://www.gov.br/gestao/pt-br/assuntos/noticias/2023/junho/gestao-reforca-importancia-das-parcerias-com-os-estados-para-impulsionar-entrega-de-politicas-publicas. Acesso em 06/07/2025.

Nijkamp, P., & Cohen-Blankshtain, G. (2009). The importance of ICT for cities: E-governance and cyber perceptions. In M. Schrenk et al. (Eds.), REAL CORP 2009: Cities for Everyone – Liveable, Healthy, Prosperous (pp. 1–13). CORP – Competence Center of Urban and Regional Planning. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32141-2_13

Przeybilovicz, E., Cunha, M. A., & Meirelles, F. de S. (2018). O uso da tecnologia da informação e comunicação para caracterizar os municípios: quem são e o que precisam para desenvolver ações de governo eletrônico e smart city. Revista de Administração Pública, 52(4), 630–649. https://doi.org/10.1590/0034-7612170582

Porru, S., Misso, F. E., Pani, F. E., & Repetto, C. (2020). Smart mobility and public transport: Opportunities and challenges in rural and urban areas. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7(1), 88–97. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.10.002

Radar Ibê. (2021). Novidade x continuidade: o que fazer quando a gestão muda? Radar Ibê. Obtido 21 de junho de 2025, de https://radar.ibegesp.org.br/novidade-x-continuidade-o-que-fazer-quando-a-gestao-muda/

Roriz Junior, M. P.; Carvalho, W.; Medeiros, D. UMA ANÁLISE DA COMPLETUDE DA MALHA DO OPENSTREETMAPS FRENTE AO SISTEMA DE TRANSPORTE ESCOLAR BRASILEIRO. In: Anais do XXXVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. Santos, Brazil: ANPET, 2023.

Juliana Pereira Rincon (julianarincon@discente.ufg.br)
Claudia Mikaella Carvalho de Moraes (claudiamoraes@discente.ufg.br)
Marcos Paulino Roriz Junior (marcosroriz@ufg.br)
Willer Luciano Carvalho (willer_carvalho@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)
Aparecida de Goiânia - Goiás - Brasil

EFEITOS ECONÔMICOS DOS DIFERENTES MODOS DE TRANSPORTE SOBRE OS SETORES PRODUTIVOS BRASILEIROS

Rafael Oliveira[1], **João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos**[1], **Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato**[1] , **Samuel D'Andréa Santos**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
Este estudo avalia os impactos econômicos dos investimentos do PAC 2025 nos diferentes modos de transporte, utilizando a matriz insumo-produto para analisar as inter-relações setoriais e subsidiar políticas públicas. As simulações indicam efeitos multiplicadores relevantes sobre a economia brasileira. Os investimentos em rodovias apresentam os maiores impactos, com R$590,7 bilhões em valor da produção, geração de 5,3 milhões de empregos e R$100,3 bilhões em remuneração. Ferrovias totalizam R$359,4 bilhões em produção, 3,2 milhões de empregos e R$61 bilhões em remunerações. Portos e hidrovias geram R$224,2 bilhões em produção, 1,8 milhão de empregos e R$40,7 bilhões em remuneração. Aeroportos somam R$41,5 bilhões em produção, 373 mil empregos e R$7 bilhões em remuneração. O transporte público, com R$34,1 bilhões em produção, gera 283 mil empregos e R$5,8 bilhões em remuneração. Os resultados destacam a relevância dos investimentos em transporte para impulsionar o PIB e o emprego no país.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema de transporte é reconhecido como um dos elementos fundamentais para o desenvolvimento econômico e da integração regional, pois facilita o deslocamento de mercadorias, serviços e indivíduos de uma forma que aumenta a competitividade e a coesão territorial (Morales, 2013). A infraestrutura de transporte, ao reduzir os custos com logística e aumentar o acesso aos mercados, contribui diretamente para o crescimento, criação de empregos e melhoria da qualidade de vida da população (Santos Menezes et al., 2014). Para analisar os impactos intersetoriais do setor de transporte na economia, a Mip - matriz de insumo produto, proposto por Wassily Leontief, emergiu como uma técnica importante, revelando as relações diretas e indiretas entre os setores produtivos e as atividades de transporte (Carvalheiro, 1997; Guilhoto et al, 2010). A Mip considerada possibilita a análise de encadeamentos produtivos, interdependências e possíveis lacunas estruturais e também é atualizado periodicamente para o Brasil pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A matriz de insumo-produto é uma ferramenta quantitativa-chave para estudar as inter-relações entre diferentes setores da economia, permitindo rastrear de que maneira os insumos de um setor entram na produção de outros setores e simultaneamente adicionaram à demanda dos últimos últimos (Guilhoto; Sesso Filho, 2010). A Mip é uma matriz cujas linhas e colunas correspondem aos fornecedores e demandantes de insumos (consumo intermediário, demanda final e valor adicionado), respectivamente (Carvalheiro, 1997). Os coeficientes técnicos obtidos são diretamente da Mip, sintetizando a quantidade de insumo consumido em um setor para produzir uma unidade de produto em outro setor, tornando-os essenciais para realizar a análise de encadeamentos produtivos (Miller; Blair, 2009 apud Souza; Perobelli, 2009). A matriz inversa de Leontief derivada da matriz técnica permite calcular os efeitos diretos e indiretos das mudanças na demanda final sobre a produção setorial, sendo uma ferramenta-chave para avaliar os impactos econômicos e a identificação daqueles setores que são básicos em uma economia (Vale; Perobelli, 2020).

A Mip tem sido cada vez mais aplicada desde seu desenvolvimento para a análise de impactos intersetoriais em vários setores, incluindo o transporte (Carvalheiro, 1997). As aplicações tradicionais são a avaliação dos efeitos multiplicadores de investimentos em infraestrutura de transporte sobre bens, investimentos e rendimentos e para indicar os setores que mais se beneficiam com mudanças na oferta de serviços de transporte ou que são benéficos (Ichihara, 2012). Em pesquisas recentes, o MIP foi incorporado em metodologias de geoprocessamento e modelagem regional, fornecendo uma análise mais detalhada da distribuição espacial dos impactos do transporte e das políticas públicas para a logística e mobilidade (Silva, Zorzo, 2021).

A Mip tem sido amplamente aplicada para estimar os efeitos intersetoriais de qualquer setor da economia, incluindo o transporte (Carvalheiro, 1997; Oliveira et all, 2024). Aplicações típicas são a investigação dos impactos do investimento em infraestrutura de transporte na produção, emprego e renda, e o setor a ser mais afetado ou mais beneficiado pelas variações na oferta de serviços de transporte (Ichihara, 2012). Novos

estudos incluíram a Mip no geoprocessamento e na modelagem regional, o que permite uma sincronização mais precisa e exata nos efeitos da distribuição do transporte e avaliação das políticas públicas de logística e mobilidade (Silva; Zorzo, 2021).

A Mip brasileira possibilita a identificação dos impactos dos principais modos de transporte — aéreo, terrestre e aquático — e suas interações com outros setores econômicos. A importância para a movimentação de passageiros e carga de alto valor agregado e bens é o modo aéreo, que viabiliza a integração regional e internacional da nação. O transporte aéreo brasileiro recuperou-se em 2022 após a pandemia, aumentando a demanda doméstica em 28,3% em relação às demandas de 2021, embora ainda abaixo dos valores de 2019, apontando sua sensibilidade às crises econômicas e sanitárias. O modo terrestre, com o rodoviário e ferroviário, é responsável pela distribuição da produção nacional em geral, principalmente no que diz respeito aos bens agrícolas e industriais, e revela significativa capilaridade e articulação entre a produção nacional. Já o modo aquaviário, embora menos expressivo em termos de participação no transporte de passageiros, é estratégico para o comércio exterior, especialmente na exportação de grãos, minérios e outros produtos de grande volume, além de apresentar vantagens ambientais e de custo em relação aos demais modos (ABEAR, 2022; IBGE, 2025).

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar o impacto dos setores de transporte aéreo, terrestre e aquaviário nos diversos setores da economia brasileira, utilizando a matriz de insumo-produto e ferramentas computacionais. Busca-se, assim, contribuir para o entendimento das inter relações produtivas e subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas à melhoria da infraestrutura de transportes e ao desenvolvimento econômico integrado (Almeida et al., 2011).

2. CÁLCULO DOS IMPACTOS INTERSETORIAIS VIA MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO

Esta seção aborda como a matriz de insumo-produto (MIP) permite mensurar os efeitos diretos e indiretos de choques na demanda final de determinado setor sobre toda a economia, detalhando os fluxos de bens e serviços entre setores e demonstrando as relações intersetoriais (IBGE, 2025).

O ponto de partida é a equação fundamental do modelo de Leontief:

$$x = (I - A)^{-1} y \qquad (1)$$

x = vetor de produção total dos setores
I = matriz identidade
A = matriz de coeficientes técnicos (cada elemento aij representa o insumo do setor i necessário para produzir uma unidade no setor j)
$(I-A)^{-1}$ = matriz inversa de Leontief, que capta os efeitos diretos e indiretos dos choques de demanda
y = vetor de demanda final

O cálculo dos impactos intersetoriais consiste em aplicar um choque (variação) na demanda final (ΔyΔy) de um setor e observar o efeito sobre a produção total (ΔxΔx), conforme:

$$\Delta x = (I - A)^{-1} \Delta y \qquad (2)$$

Esse procedimento permite quantificar, por exemplo, como um aumento na demanda por transporte terrestre repercute em toda a cadeia produtiva, afetando desde fornecedores de insumos até setores consumidores finais (Guilhoto; Sesso Filho, 2010). Além disso, podem ser calculados multiplicadores de produção, emprego e renda, fornecendo uma visão abrangente dos efeitos intersetoriais (IPARDES, 2024)

3. RESULTADOS E ANÁLISE

A tabela 1 apresenta os valores previstos pelo governo federal para investimentos (público e privado) do Novo PAC 2025 nos modos de transporte terrestre (rodovias e ferrovias), aquaviário (portos e hidrovias), aeroportos e transporte público, discriminando os valores públicos e privados e separando construção/ampliação e manutenção, conforme fontes oficiais. Em 2025, o Brasil direciona um volume expressivo de investimentos públicos e privados para infraestrutura de transportes, com destaque para as rodovias, que concentram a maior parte dos recursos (R$ 154,8 bilhões), seguidas por ferrovias (R$ 94,2 bilhões), portos e hidrovias (R$ 55,1 bilhões), aeroportos (R$ 10,9 bilhões) e transporte público (R$ 8,4 bilhões, focados na renovação de frota e construção de infraestruturas). A forte participação do setor privado,

especialmente em rodovias, ferrovias e aeroportos, evidencia uma estratégia de parceria para ampliar a capacidade de investimento nacional, enquanto o setor público mantém protagonismo em áreas sociais e de interesse coletivo, como o transporte público. O conjunto desses aportes revela uma busca por diversificação e modernização da matriz logística, com atenção à manutenção, à expansão e à sustentabilidade, visando maior eficiência, integração e competitividade para o país.

Tabela 1: Investimento pelo PAC-2025 para o setor de transportes

Modo	Construção/Ampliação (R$ bi)	Operação (R$ bi)
Rodovias (total)	154,8	-
Ferrovias	94,2	-
Portos/Hidrovias	32,9	26,3
Aeroportos	10,9	-
Transporte Público	4,0 (obras de infraestrutura)	4,4 (renovação de frota)

Fonte: Casa Civil (2025)

A análise dos impactos econômicos dos investimentos do PAC 2025, realizada utilizando o *Mipsystem* desenvolvida pela Nectere, demonstra efeitos multiplicadores na economia brasileira. O Valor da produção revela o quanto foi produzido na economia, refletido em valores monetários, os empregos revelam quantos postos de trabalho são gerados e as remunerações por sua vez quantificam a renda total das famílias. Assim, os valores presentes na Tabela 2 evidenciam os impactos dos investimentos em cada um desses, além de revelar que os investimentos promovem incrementos substanciais na geração de empregos, remunerações e valor da produção.

Tabela 2: Resultado dos investimento pelo PAC-2025

Modo	Valor da Produção	Empregos	Remunerações	Produção (por Bi investido)	Empregos (por Bi investido)	Remuneração (por real investido)
Rodovias (total)	590.763.338.359	5.298.308	100.290.304.015	3,81	34.227	0,64
Ferrovias	359.495.519.854	3.224.164	61.029.371.048	3,81	34.227	0,64
Portos/Hidrovias	224.202.407.126	1.855.424	40.774.677.002	3,79	31.341	0,69
Aeroportos	41.597.676.926	373.072	7.061.784.973	3,81	34.227	0,64
Transporte Público	34.152.611.683	283.290	5.788.901.325	4,06	33.725	0,69

Os investimentos em infraestrutura de transportes apresentam elevados efeitos multiplicadores sobre a economia conforme a Tabela 2. Para cada real investido, observa-se a geração de aproximadamente R$ 3,8 a R$ 4,1 em valor de produção, com destaque para o transporte público. Essa eficiência é resultado do encadeamento produtivo que caracteriza o setor: obras de infraestrutura demandam insumos de diversas cadeias industriais, estimulam o comércio e induzem inovação tecnológica.

A geração de empregos é outro aspecto importante na avaliação da eficiência dos investimentos. Os dados mostram que, para cada R$ 1 bilhão investido em infraestrutura de transportes, são criados, em média, entre 31 mil e 34 mil postos de trabalho, dependendo do modo. Essa geração de empregos ocorre tanto na fase de construção quanto na operação e manutenção das obras, beneficiando trabalhadores de diferentes níveis de qualificação

Enfim, todos os modos apresentam impacto semelhante, gerando cerca de R$ 3,8 a R$ 4,1 em valor de produção para cada bilhões de reais investido, com destaque para o transporte público. Os investimentos em construção e ampliação de rodovias, além de gerarem maior valor da produção em valores absolutos (R$ 590,7 bilhões), proporcionam uma geração de 5.298.308 novos postos de trabalho e R$ 100,29 bilhões em remunerações. Os investimentos em ferrovias apresentaram valor da produção de R$ 359,4 bilhões, geração de 3.224.164 empregos e R$61,03 bilhões de remuneração. Os investimentos em portos e hidrovias geram R$ 224,2 bilhões em valor de produção, criando 1.855.424 postos de trabalho e R$ 40,77 bilhões em valor de remuneração, enquanto os investimentos em aeroportos resultam em um valor de produção de R$ 41,5 bilhões, gerando 373.072 empregos e R$7,06 bilhões em remuneração. O transporte público apresenta um crescimento mais modesto em valores absolutos, com valor de produção resultando em R$34,1 bilhões, com geração de 283.290 novos postos de trabalho e R$5,78 bilhões em remuneração. Contudo, nota-se que o

valor de produção foi o maior por bilhão investido nesse setor. Desse modo, estes resultados evidenciam a capacidade dos investimentos em infraestrutura de transporte de dinamizar a arrecadação fiscal e promover uma expansão profícua do mercado de trabalho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A infraestrutura de transportes em 2025 consolida-se como vetor estratégico para o desenvolvimento econômico brasileiro, evidenciando impactos multiplicadores expressivos tanto no aumento do valor da produção quanto na geração substancial de empregos. Os investimentos realizados nos diferentes modos — rodoviário, ferroviário, aquaviário e aéreo — promovem inter-relações produtivas complexas com diversos segmentos da economia, reforçando a centralidade dos modos terrestres e destacando o potencial dinâmico dos modais aquaviário e aéreo.

A análise dos dados demonstra que os investimentos em infraestrutura de transportes resultaram na criação de mais de 10 milhões de empregos diretos e indiretos, evidenciando seu papel na promoção da inclusão social e na distribuição de renda. Este desempenho respalda a formulação de políticas públicas integradas, uma vez que os benefícios dos investimentos em transportes extrapolam o setor, tornando-se instrumentos eficazes de política econômica para o desenvolvimento nacional. A utilização da matriz insumo-produto como ferramenta analítica mostrou-se fundamental para mensurar os efeitos econômicos dessas políticas, fornecendo base técnica sólida para decisões estratégicas voltadas ao desenvolvimento integrado e à competitividade do país.

No contexto do Novo PAC 2025, observa-se uma transformação estratégica na infraestrutura de transportes, marcada por avanços quantitativos e qualitativos. Os investimentos apresentam efeito multiplicador robusto, impulsionando o crescimento econômico, a geração de empregos e renda, além de promover o desenvolvimento regional e a redução das desigualdades. Evidências apontam que aportes em transportes têm impacto positivo e estatisticamente significativo no crescimento dos estados e na diminuição das desigualdades de renda, especialmente quando direcionados a regiões historicamente menos favorecidas. Grandes projetos estimulam cadeias produtivas locais e nacionais, ampliando a demanda por insumos, máquinas e serviços.

O ciclo atual de investimentos destaca o setor privado, responsável por cerca de 72% dos aportes em 2025, especialmente em rodovias, ferrovias e aeroportos. Esse cenário resulta de avanços regulatórios e institucionais, bem como das oportunidades criadas por concessões e parcerias público-privadas, que ampliam a capacidade de investimento, aceleram a execução de projetos e introduzem práticas de gestão mais eficientes. Contudo, a dependência do capital privado ressalta a necessidade de um ambiente de negócios mais atrativo e de políticas públicas que mitiguem riscos regulatórios e financeiros. O Brasil investe cerca de 2,2% do PIB em infraestrutura, abaixo do mínimo recomendado para países emergentes, o que limita o potencial de modernização e integração logística. Entraves regulatórios, demora no licenciamento ambiental e altos custos de financiamento permanecem como desafios a serem superados para ampliar a eficiência e os benefícios dos investimentos.

Além dos impactos econômicos, a modernização da infraestrutura de transportes gera efeitos sociais relevantes, como a melhoria do acesso a serviços públicos, a redução dos custos logísticos empresariais, o estímulo à competitividade internacional e o fortalecimento da inclusão social por meio da mobilidade de pessoas e mercadorias. Investimentos em transporte público e mobilidade urbana, em particular, assumem papel estratégico na promoção da equidade e na redução das disparidades socioespaciais.

Agradecimentos
Os autores agradecem a empresa Nectere pelo cessão de uso do *Mipsytem* para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEAR. O setor aéreo em dados e análises. 2022. Disponível em: https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2023/12/Panorama2022-vf.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

AGÊNCIA GOV. Seleção do Novo PAC para 2025 conta com mais de R$ 8 bilhões para mobilidade urbana. Agência Gov, 2024. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202502/selecao-do-novo-pac-para-2025-conta-com-mais-de-r-8-bilhoes-p

ara-mobilidade-urbana. Acesso em: 1 jul. 2025.

ALMEIDA, L. M. de; SANTOS, M. J. dos; SILVA, J. L. G. da; TERRA, A. de M. S. O papel do transporte no desenvolvimento econômico: um olhar questionador da cidade de Palmas-TO. XV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e XI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2011. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2011/anais/arquivos/RE_0231_0757_01.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

CARVALHEIRO, N. Observações sobre a elaboração da matriz de insumo-produto. Revista de Economia Política, v. 17, n. 2, p. 140-157, 1997. Disponível em: https://revistas.pucsp.br/rpe/article/download/11766/8487/28206. Acesso em: 18 jun. 2025.

GUILHOTO, J. J. M.; SESSO FILHO, U. A. Análise de insumo-produto: teoria e fundamentos. Disponível em: http://www.erudito.fea.usp.br/PortalFEA/Repositorio/835/Documentos/Guilhoto%20Insumo%20Produto.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

IBGE. Matriz de Insumo-Produto. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html. Acesso em: 18 jun. 2025.

ICHIHARA, S. M. Uma aplicação do modelo de insumo-produto combinado com geoprocessamento. EconomiA, Selecta, Brasília (DF), v. 8, n. 4, p. 199–231, 2012. Disponível em: https://www.anpec.org.br/revista/vol8/vol8n4p199_231.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

MORALES, C. A. Transportes urbanos e desenvolvimento econômico: notas sobre um estudo. Revista de Administração de Empresas, v. 53, n. 3, p. 1-5, 2013. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rae/a/jd4fPHgppRdbvWqsDcf9w7H/. Acesso em: 18 jun. 2025.

SANTOS MENEZES, A. A.; DE MOURA, F. R.; FARIAS, T. A.; ARAUJO, P. J. L. A importância dos transportes para o desenvolvimento econômico: uma análise econométrica dos custos de frete do transporte rodoviário. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, v. 2, n. 1, p. 155–164, 2014. Disponível em: https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/1274. Acesso em: 18 jun. 2025.

SILVA, R. S. da; ZORZO, A. Logística, transporte e desenvolvimento econômico. In: FATEC AMERICANA – MINISTRO RALPH BIASI. Anais do XII FATECLOG, 2021. Disponível em: https://fateclog.com.br/anais/2021/parte4/351-410-1-RV.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

VALE, V. A.; PEROBELLI, F. S. Análise de Insumo-Produto: teoria e aplicações no R. Curitiba, PR: Edição Independente, 2020.

BRASIL. Casa Civil. Seleções 2025 — Novo PAC. Portal Gov.br, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/selecoes2025. Acesso em: 25 jun. 2025.

BRASIL. Casa Civil. Tudo Sobre Cada Modalidade 2025 — Novo PAC. Portal Gov.br, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/selecoes2025/tudo-sobre-cada-modalidade-2025. Acesso em: 25 jun. 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. Novo PAC Seleções 2025. Portal Gov.br, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/novo-pac-selecoes-2025. Acesso em: 25 jun. 2025.

MINISTÉRIO DAS CIDADES confirma nova rodada de investimentos do PAC para 2025. Diário do Transporte, 23 jun. 2025. Disponível em: https://diariodotransporte.com.br/2025/06/23/ministerio-das-cidades-confirma-nova-rodada-de-investimentos-do-pac-para-2025/. Acesso em: 25 jun. 2025.

OLIVEIRA R.A.; VASCONCELO J.G.; RODRIGUES, A.; SANTOS D. S. Análise da participação do setor de transportes terrestre na economia do país usando a matriz de insumo produto; 38 ANPET, Florianópolis, SC

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Rafael Oliveira (rafael@werf.com.br)
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos (jgvasconcelos16@gmail.com)

IMPACTOS ECONÔMICOS DE INVESTIMENTOS EM FERROVIAS: MATRIZ DE INSUMO PRODUTO COM CHOQUES SETORIAIS AGREGADOS E DESMEMBRADOS

João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos[1], **Rafael Oliveira**[1], **João Vitor Lima Sousa**[1], **Yaeko Yamashita**[1] , **Joaquim José Guilherme de Aragão**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
Este artigo analisa os impactos socioeconômicos de investimentos em infraestrutura de transporte a partir de dois cenários distintos, utilizando a Matriz Insumo-Produto.No Cenário 1, os recursos foram alocados ao transporte terrestre, que gera maior produção (R$ 391,5 bi) e remuneração (R$ 66,3 bi), mas menos empregos (3,03 mi) que o Cenário 2, que distribui recursos na cadeia, gerando 3,12 mi de empregos, porém com menor produção e remuneração. As análises demonstram que diferentes formas de alocação dos investimentos setoriais produzem impactos distintos na economia, sendo necessário definir cuidadosamente os cenários para orientar decisões de investimento. O estudo evidencia que a forma de modelar o investimento na MIP — seja como choque em um único setor ou distribuído entre vários setores da cadeia produtiva — altera a intensidade e dispersão dos multiplicadores econômicos. Modelagens mais desagregadas tendem a refletir de maneira mais realista os impactos econômicos dos investimentos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A infraestrutura ferroviária exerce papel fundamental no desenvolvimento econômico, especialmente em países com grandes distâncias territoriais e elevado peso de exportações, como o Brasil. O investimento em ferrovias reduz custos logísticos, amplia a integração regional e nacional, e contribui para o aumento da produtividade e da renda. Estudos mostram que a construção de ferrovias foi responsável por percentuais expressivos do crescimento da produtividade do trabalho e do PIB em países como Índia ao promover a redução dos custos de transporte, a especialização produtiva e o acesso a mercados mais amplos (Fundação Getulio Vargas, 2023).

Além de possibilitar ganhos de eficiência e competitividade, o transporte ferroviário apresenta vantagens econômicas e ambientais em relação a outros modos, como maior capacidade de carga, menor consumo de combustível e menor emissão de poluentes. Isso torna o modo ferroviário estratégico para o crescimento sustentável e para a superação dos gargalos logísticos que afetam a economia brasileira (GMS Resíduos, 2025; FGV, 2023).

Para mensurar os impactos econômicos dos investimentos em infraestrutura ferroviária, a Matriz Insumo-Produto (MIP) destaca-se como instrumento analítico robusto. A MIP permite analisar de forma desagregada as inter-relações entre setores produtivos e mensurar os efeitos diretos, indiretos e induzidos de choques de demanda, como investimentos em infraestrutura, sobre variáveis econômicas como produção, valor adicionado e emprego (Sessa, 2018; Instituto Jones dos Santos Neves, 2023). Sua utilização é justificada pela capacidade de capturar a intensidade das interdependências setoriais e de fornecer subsídios para políticas públicas e planejamento econômico.

No entanto, a forma de modelar o choque de investimento na MIP pode alterar significativamente os resultados. Tradicionalmente, parte dos estudos considera o investimento em ferrovias como um choque aplicado a um único setor. Alternativamente, é possível desmembrar o investimento entre vários setores que compõem a cadeia produtiva, como construção, materiais e serviços, refletindo de modo mais realista a distribuição dos recursos. A escolha entre vetor único ou distribuição setorial do choque influencia a intensidade e a dispersão dos multiplicadores econômicos, impactando a avaliação dos benefícios do investimento ferroviário (Sessa, 2018).

Diante desse contexto, este artigo propõe um estudo comparativo dos impactos econômicos de investimentos em ferrovias utilizando a MIP, analisando os resultados quando o choque de investimento é aplicado como um único setor versus a desagregação entre múltiplos setores. O objetivo é contribuir para o aprimoramento das metodologias de avaliação de políticas públicas e para uma compreensão mais precisa dos efeitos socioeconômicos dos investimentos em infraestrutura de transporte.

2. METODOLOGIA

A análise dos impactos econômicos dos investimentos do PAC 2025, com foco no setor ferroviário, foi conduzida por meio da ferramenta *Mipsytem* desenvolvida pela Nectere que opera a partir da Matriz Insumo-Produto - MIP nacional brasileira. Essa abordagem permite estimar os efeitos diretos, indiretos e induzidos decorrentes da alocação de recursos públicos em infraestrutura ferroviária. A seguir, detalha-se a estrutura da metodologia para a simulação dos choques de investimento.

2.1. Definição da Base de Dados

Utiliza-se a Matriz Insumo-Produto (MIP) nacional brasileira do IBGE, edição 2015, baseada no Sistema de Contas Nacionais (SCN) 2010. A MIP apresenta 67 atividades econômicas e 127 produtos, proporcionando uma visão desagregada da estrutura produtiva nacional e das interrelações setoriais. Os dados são compilados a partir das Tabelas de Recursos e Usos (TRU), seguindo padrões metodológicos internacionais estabelecidos pelo modelo de Leontief. Para a simulação dos impactos econômicos dos investimentos em ferrovias, foram utilizados dados de investimento do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) 2025, considerando os valores destinados para obras de construção e manutenção de infraestruturas ferroviárias. Com base nesse cenário, foi possível estimar os efeitos multiplicadores sobre arrecadação de impostos, emprego e valor adicionado, destacando a importância estratégica do setor ferroviário na dinamização econômica e na articulação intersetorial.

2.2. Construção dos Cenários de Choque

Formulam-se dois cenários distintos: (1) Cenário Agregado - concentra todo o investimento ferroviário em um único setor (transporte terrestre); (2) Cenário Desmembrado - os investimento foram distribuídos entre múltiplos setores da cadeia produtiva ferroviária (construção e serviços de arquitetura, engenharia e atividades técnicas relacionadas).

2.3. Cálculo da Matriz de Coeficientes Técnicos

Obtém-se a matriz de coeficientes técnicos diretos (A) através da fórmula aij = xij/Xj, onde cada elemento representa a quantidade de insumo do setor i necessária para produzir uma unidade monetária do setor j. Esta matriz captura as relações de interdependência tecnológica entre setores e os encadeamentos produtivos da economia.

2.4. Obtenção da Matriz Inversa de Leontief

Calcula-se a matriz inversa $L = (I - A)^{-1}$, elemento central do modelo que mostra a produção total necessária de cada setor para atender à demanda final. A condição de invertibilidade requer que a soma dos elementos de cada coluna da matriz A seja inferior a 1, garantindo multiplicadores econômicos positivos e finitos.

2.5. Aplicação dos Choques de Investimento

Aplicam-se os choques através da equação $X = (I - A)^{-1} Y$. No cenário agregado, todo o investimento é alocado em uma posição do vetor ΔY. No cenário desmembrado, o vetor é distribuído conforme os coeficientes da Unidade Padrão de Investimento (UPI), permitindo simular impactos diferenciados sobre a estrutura produtiva.

2.6. Cálculo dos Impactos Econômicos

Os impactos são calculados por $\Delta X = (I - A)^{-1} \Delta Y$ para produção, e utilizando coeficientes setoriais para emprego ($\Delta E = \hat{e} \cdot \Delta X$), valor adicionado ($\Delta VA = \hat{v} \cdot \Delta X$) e massa salarial ($\Delta MS = \hat{w} \cdot \Delta X$). Os multiplicadores econômicos quantificam os efeitos de transbordamento dos investimentos ferroviários sobre toda a economia.

2.7. Decomposição dos Efeitos Multiplicadores

Decompõem-se os multiplicadores em efeitos diretos (no próprio setor de investimento), indiretos (nos setores fornecedores via encadeamentos para trás) e induzidos (decorrentes do aumento da renda e consumo). Esta decomposição identifica como os choques se propagam na economia e quais setores são mais beneficiados.

2.8. Análise Comparativa dos Resultados

Comparam-se sistematicamente os resultados dos dois cenários, avaliando magnitude dos multiplicadores, dispersão setorial e intensidade dos encadeamentos. A análise identifica diferenças metodológicas e suas implicações para políticas públicas, subsidiando recomendações para avaliação de investimentos em infraestrutura ferroviária e fornecendo subsídios quantitativos para planejamento econômico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo, recorreu-se à ferramenta *Mipsystem* para simulação dos choques de investimento, com base em dois cenários distintos: o cenário agregado e o cenário desmembrado. Dessa forma, para estimar esses efeitos dos investimentos públicos em infraestrutura ferroviária, foram considerados os valores destinados ao setor referenciados no PAC 2025, presentes na tabela 1. Para o primeiro cenário foi considerado o investimento total de 91,2 bilhões no setor de Transporte terrestre, e para o segundo cenário os investimentos foram divididos em Construção e Serviços de arquitetura e engenharia e atividades técnicas relacionadas, seguindo o detalhamento das modalidades de investimento propostas pelo PAC.

Tabela 1: Investimento pelo PAC-2025 para Ferrovias e setores correspondentes

Modalidade do investimento	Valor do investimento (R$ bi)	Setor do investimento
Adequação	0,1	Construção
Construção	5,6	Construção
Investimentos das concessões existentes	85,2	Construção
Planejamento, Estudos e Projetos	0,2	Serviços de arquitetura e engenharia e atividades técnicas relacionadas
Estudos para Novas Concessões	0,1	Serviços de arquitetura e engenharia e atividades técnicas relacionadas
Total	91,2	-

Fonte: Casa Civil (2025)

A comparação entre ambos os cenários desenhados está representada na Tabela 2. Pode-se notar que, no cenário agregado, em que todo o investimento foi concentrado em um único setor - transporte terrestre - houve um impacto direto no Valor de Produção de R$ 391.484.480.378, gerando um total de 3.034.112 postos de trabalho nesse cenário, e renda total de R$ 66.273.808.827.

Tabela 2: Resultado dos investimentos

	Empregos	Remuneração (R$)	Valor da Produção (R$)
Cenário 1 (agregado):	3.034.112	66.273.808.827	391.484.480.378
Cenário 2 (desmembrado):	3.119.585	59.113.376.787	348.023,667.802

Por outro lado, no cenário desmembrado o Valor Bruto de Produção foi de R$ 348.023,667.802, a geração de empregos foi ampliada, totalizando 3.119.585 postos de trabalho, distribuídos entre os setores impactados, gerando uma renda de R$ 59.113.376.787. A comparação entre os dois cenários de alocação de investimentos, um concentrado em um único setor (choque único) e outro distribuído entre vários setores da cadeia produtiva (desmembrado), revela diferenças significativas nos impactos econômicos e sociais gerados. No cenário de choque único, em que todos os recursos foram destinados ao setor de transporte terrestre, observa-se um maior valor de produção, atingindo R$ 391,5 bilhões, além de uma remuneração total mais elevada, de R$ 66,3 bilhões. No entanto, esse cenário resulta em um número menor de empregos gerados, totalizando 3.034.112 postos de trabalho.

Esses resultados demonstram que a forma de alocação dos investimentos influencia diretamente os multiplicadores econômicos e sociais. Enquanto a concentração dos recursos em setores de maior valor agregado tende a maximizar a produção e a remuneração, a distribuição entre setores intensivos em trabalho amplia o impacto sobre o emprego. A discussão sobre a modelagem dos impactos dos investimentos em infraestrutura não deve se restringir à simples priorização de objetivos, como maximizar produção, renda ou emprego, mas sim buscar uma abordagem que reflita de forma mais fiel a realidade econômica, na qual setores estratégicos mobilizam uma ampla cadeia de atividades interligadas. Na prática, investimentos em setores como transporte, construção ou energia não ocorrem de maneira isolada; eles geram demandas por insumos, serviços técnicos, tecnologia, mão de obra e logística, envolvendo diversos segmentos da

economia. Por isso, ao analisar os efeitos econômicos de um investimento, é fundamental considerar a complexidade e a extensão dessas cadeias produtivas.

Modelar o investimento como um choque concentrado em um único setor pode simplificar a análise, mas tende a subestimar a dispersão dos efeitos econômicos, pois não capta adequadamente a participação de fornecedores, prestadores de serviço e outros agentes envolvidos. Em contrapartida, distribuir o investimento entre os diversos setores que compõem a cadeia produtiva aproxima a análise da realidade, permitindo identificar de forma mais precisa e abrangente os impactos diretos, indiretos e induzidos.

Assim, a escolha do cenário de alocação dos investimentos deve ser guiada não apenas pelos objetivos de política pública, mas também pela necessidade de refletir a estrutura real das cadeias produtivas. Uma abordagem desmembrada, que distribui os recursos entre os setores efetivamente envolvidos, tende a captar melhor os efeitos multiplicadores ao longo da cadeia, evidenciando como o investimento inicial se propaga por diferentes setores. Além disso, permite identificar gargalos e oportunidades de desenvolvimento setorial e regional, ao revelar quais segmentos são mais sensíveis ao aporte de recursos, e apoia decisões de política pública mais informadas, ao fornecer uma visão detalhada dos impactos econômicos e sociais.

Adotar uma modelagem que distribua o investimento conforme a participação real dos setores na cadeia produtiva aprimora a precisão das estimativas e contribui para a formulação de políticas públicas mais eficazes e alinhadas ao desenvolvimento sustentável. Isso possibilita avaliar o potencial de geração de empregos qualificados e não qualificados em diferentes elos da cadeia, mensurar os efeitos regionais dos investimentos, considerando a localização dos fornecedores e prestadores de serviços, e promover inclusão social e inovação ao identificar setores com maior potencial de absorção de mão de obra e geração de valor agregado.

Portanto, mais do que priorizar objetivos isolados, a definição dos cenários de investimento deve buscar refletir a complexidade das cadeias produtivas, garantindo que a alocação setorial dos recursos esteja alinhada tanto à realidade econômica quanto aos objetivos estratégicos de desenvolvimento do país. Essa abordagem fortalece a capacidade de análise e de tomada de decisão, promovendo resultados econômicos e sociais mais robustos e sustentáveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados apresentados, fica evidente que a avaliação dos impactos econômicos dos investimentos em infraestrutura exige uma abordagem que vá além da análise setorial simplificada, incorporando a complexidade e as interdependências das cadeias produtivas envolvidas. O estudo demonstra que a modelagem desmembrada dos investimentos, ao distribuir os recursos entre os diversos setores que compõem a cadeia, oferece uma estimativa mais realista e abrangente dos efeitos econômicos e sociais, permitindo captar com maior precisão os impactos diretos, indiretos e induzidos sobre produção, emprego e renda. Essa abordagem não apenas aprimora a compreensão dos multiplicadores econômicos, mas também fornece subsídios mais robustos para o planejamento e a formulação de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável, à competitividade e à inclusão social.

Além disso, a análise evidencia que a escolha da metodologia de alocação dos investimentos influencia de maneira significativa os resultados obtidos, podendo direcionar os efeitos para diferentes objetivos estratégicos, como maximização do valor agregado, geração de empregos ou promoção da equidade regional. Ao considerar a distribuição real dos recursos ao longo das cadeias produtivas, é possível identificar gargalos, potencializar oportunidades de desenvolvimento regional e setorial, e promover uma melhor integração entre setores econômicos.

Recomenda-se, portanto, que futuras avaliações e decisões de investimento em infraestrutura adotem metodologias que reflitam a estrutura real das cadeias produtivas, alinhando os resultados esperados à dinâmica econômica do país e aos objetivos de desenvolvimento de longo prazo. Dessa forma, será possível potencializar os benefícios dos investimentos, promovendo não apenas o crescimento econômico, mas também a inovação, a integração regional, a geração de empregos de qualidade e a redução das desigualdades sociais e territoriais. Em última instância, a adoção de uma abordagem mais realista e

integrada fortalece a capacidade do Estado e da sociedade de planejar e executar políticas públicas mais eficazes, contribuindo para um desenvolvimento nacional mais equilibrado, resiliente e sustentável.

Agradecimentos
Os autores agradecem a empresa Nectere pelo cessão de uso do *Mipsytem* para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Casa Civil. Novo PAC: Programa de Aceleração do Crescimento. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/transporte-eficiente-e-sustentavel/ferrovias. Acesso em: 08 jul. 2025.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. Papel histórico das ferrovias no Brasil mostra importância de investir em infraestrutura. Blog do Ibre, 2023. Disponível em: https://blogdoibre.fgv.br/posts/papel-historico-das-ferrovias-no-brasil-mostra-importancia-de-investir-em-infraestrutura.

GMS RESÍDUOS. Importância dos trilhos ferroviários na economia. Disponível em: https://gmsresiduos.com.br/importancia-dos-trilhos-ferroviarios-na-economia/.

SESSA, C. B. Economia do Insumo-Produto: uma análise de impacto dos investimentos anunciados para o Espírito Santo entre 2011 e 2016 com base na MIP. Revista Economia Ensaios, Uberlândia, 32(2): 151-177, Jan./Jun. 2018. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/revistaeconomiaensaios/article/view/33583/22669.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES. Tabela de Recursos e Usos e Matriz de Insumo-Produto do Espírito Santo 2015. Texto para Discussão, n. 60, 2023. Disponível em: https://ijsn.es.gov.br/publicacoes/textos-para-discussao/td-60-tabela-de-recursos-e-usos-e-matriz-de-insumo-produto-do-espirito-santo-2015.

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos (jgvasconcelos16@gmail.com)
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Rafael Oliveira (rafael@werf.com.br)

METODOLOGIA PARA GESTÃO METROPOLITANA E ORDENAMENTO TERRITORIAL EM CORREDORES VIÁRIOS ARTERIAIS

Rodrigo Juan Martins Cardozo[1,2], Fernanda Catarina Ribeiro da Luz[1], Laura Esmeraldo Arraes de Lavor[1,2], Jéssica Renata Macêdo dos Santos[2], Claudio Marcelo Manguinho Vieira[2], Mauricio Oliveira de Andrade[1]
[1]Universidade Federal de Pernambuco e [2]Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco

RESUMO
A falta de coordenação entre municípios na implantação de vias arteriais metropolitanas gera ocupação desordenada e conflitos de uso do solo. Para enfrentar esse problema, propõe-se uma metodologia integrada de planejamento territorial, articulando aspectos econômicos, sociais e ambientais por meio da coordenação entre entes federativos e participação da sociedade civil. Com seis etapas, a proposta inclui articulação institucional, diagnóstico participativo, elaboração e implementação de planos integrados, prevendo governança permanente e financiamento. A abordagem supera a fragmentação político-administrativa através de mecanismos institucionais de coordenação intermunicipal, oferecendo diretrizes para desenvolvimento territorial sustentável e otimização de investimentos públicos em contextos metropolitanos brasileiros.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da infraestrutura viária tem se mostrado um catalisador importante para o desenvolvimento socioeconômico, melhoria da acessibilidade e promoção da integração regional (Rosik e Wójcik, 2023). Em Regiões Metropolitanas Integradas (RMIs), no entanto, a implantação de novas vias arteriais sem o devido planejamento urbano e ambiental tende a provocar impactos negativos como o espraiamento urbano desordenado – que acarreta áreas distantes, dispersas e desconectadas das demais (WRI, 2017), além de degradação de ecossistemas sensíveis (Carneiro *et al.*, 2021). A literatura mostra que a infraestrutura de transporte atua como indutor de transformações territoriais, sendo capaz de reconfigurar padrões de ocupação e induzir novas dinâmicas econômicas, como a transformação do espaço anterior em áreas urbanas (Kasraian *et al*., 2017).

Ainda, o Estatuto da Metrópole (Brasil, 2015) dispõe acerca da necessidade de gestão plena do interesse comum, com ação coordenada entre entes federativos que compõem a unidade territorial urbana, em prol do desenvolvimento urbano sustentável. Desse modo, quando há a ausência de mecanismos de coordenação entre os planos diretores municipais e as diretrizes regionais de planejamento, inviabiliza-se uma gestão territorial integrada e eficiente. Contudo, a implementação prática desses mecanismos de coordenação ainda enfrenta obstáculos significativos, especialmente quando se trata de grandes projetos de infraestrutura viária que atravessam múltiplas jurisdições municipais.

Outro ponto fundamental nas decisões de políticas públicas é a participação da sociedade civil organizada, um elemento fundamental para a legitimidade e efetividade do planejamento urbano e metropolitano. A governança participativa, conforme destacam Vivier e Sanchez-Betancourt (2023), está frequentemente associada ao conceito de "responsividade" governamental, onde a participação cidadã deve ser "ouvida" pelo governo e os atores governamentais devem estar capacitados para responder adequadamente. A inclusão da sociedade civil nos processos decisórios fortalece a democracia participativa e contribui para a identificação de necessidades locais, a prevenção de conflitos sociais e a construção de consensos em torno de projetos de desenvolvimento territorial (Foroughi *et al.*, 2023), além de buscar garantir e continuidade das ações planejadas para além governos.

No contexto de grandes obras de infraestrutura viária, a participação popular torna-se ainda mais relevante, uma vez que esses projetos frequentemente geram impactos significativos sobre as comunidades locais, alterando padrões de mobilidade, uso do solo e dinâmicas socioeconômicas. A utilização de metodologias participativas baseadas em Sistemas de Informação Geográfica Participativos (PPGIS), como demonstrado por Kyttä *et al.* (2023), permite coletar informações experienciais localizadas sobre os ambientes cotidianos dos residentes, enriquecendo o planejamento técnico com conhecimento local e demandas sociais, resultando em políticas mais aderentes à realidade territorial e com maior probabilidade de sucesso na implementação.

A implantação de vias arteriais sem coordenação com planos municipais e ambientais causa ocupação

desordenada, conflitos de uso do solo e degradação ambiental, além de desperdício de oportunidades econômicas. Por isso, este artigo propõe uma metodologia integrada para orientar o uso do solo nas áreas de influência dessas vias, conciliando eficiência econômica, justiça territorial, proteção ambiental e regulação intermunicipal.

Diante desse cenário, surge a seguinte questão de pesquisa: como estruturar uma metodologia integrada que permita a coordenação efetiva entre múltiplos entes federativos no planejamento do uso e ocupação do solo em áreas de influência de vias arteriais metropolitanas, articulando potenciais econômicos e sociais com a proteção de ativos ambientais e a participação da sociedade civil organizada?

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Impactos territoriais de infraestruturas viárias

A infraestrutura rodoviária exerce um papel fundamental no desenvolvimento econômico, ao facilitar o comércio, promover a conectividade e impulsionar o crescimento regional. Diversos estudos apontam essa infraestrutura como um catalisador do progresso socioeconômico (Li, Liu e Peng, 2018). Por meio de análise exploratória de dados e regressão logística espacial, Cheng e Masser (2003) destacaram, em estudo sobre a expansão urbana na China, a relevância da infraestrutura rodoviária urbana e da área urbanizada como determinantes centrais do crescimento das cidades.

Ng *et al*. (2017) destacam que a demanda por estradas varia conforme o nível de desenvolvimento econômico, influenciando o crescimento: países mais desenvolvidos beneficiam-se da mobilidade para exportações, enquanto países menos desenvolvidos precisam investir mais em acessibilidade para gerar impactos. Além disso, investimentos rodoviários são eficazes na redução da pobreza, ampliando acesso a serviços e oportunidades (Whitzman, James e Poweseu, 2013). Nesse contexto, o estudo de Navarro-Moreno, Calvo-Poyo e De Oña (2023), que analisou 23 países europeus com diferentes níveis de renda, constatou que o investimento em construção de estradas em países de baixa renda e em manutenção viária em ambos os grupos está associado à redução das taxas de mortalidade no trânsito.

Contudo, para que o desenvolvimento seja sustentável, é essencial considerar a mitigação dos impactos ambientais associados às obras viárias, especialmente desde sua fase de construção. Sijtsma *et al*., (2020) ressaltam que, embora a infraestrutura rodoviária contribua para o desenvolvimento econômico, ela compromete a biodiversidade. Em resposta, os autores propõem a implementação de travessias de fauna, como os ecodutos, apontando-os como soluções eficazes. Ainda assim, sob a perspectiva custo-benefício, túneis e viadutos de uso compartilhado mostraram-se alternativas mais vantajosas.

2.2. Corredores econômicos e vocações territoriais

A infraestrutura rodoviária atua como vetor estruturante do território, induzindo adensamentos seletivos, consolidando vocações produtivas locais e incentivando a formação de polos econômicos especializados (Tavares, 2018). A atração de investimentos promove a formação de centralidades regionais e zonas especializadas, impulsionando a reorganização territorial e a concentração de atividades intensivas em transporte (Proença e Santos Jr., 2019). Essa dinâmica influencia a localização de arranjos produtivos e decisões logísticas empresariais (Catela e Seabra, 2017), gerando benefícios como redução de custos e maior eficiência operacional no longo prazo (*Brookings Institution*, 2013).

Segundo Andrade *et al.* (2022), corredores econômicos são rotas estratégicas que conectam centros econômicos em escalas regional, nacional e internacional. Essas rotas são estruturadas por projetos âncoras, que exercem efeitos de arrasto sobre cadeias produtivas associadas, promovendo a integração de mercados e a redução de custos logísticos. A articulação entre setores público e privado nos corredores rodoviários atrai investimentos e permite ao Estado focar em funções estratégicas, como infraestrutura e regulação, contornando restrições fiscais por meio da ampliação da base arrecadatória, sem necessidade de novos tributos.

2.3. Gestão metropolitana e integração de políticas urbanas

A gestão metropolitana eficaz constitui um dos principais desafios para o planejamento territorial integrado, especialmente quando se trata da articulação de políticas públicas entre diferentes municípios e da coordenação entre planejamento viário e ordenamento territorial. Nesse contexto, o Estado assume papel fundamental como

elemento integrador, capaz de articular interesses divergentes e promover a cooperação intermunicipal necessária para o desenvolvimento territorial coordenado. Vassalo (2010) destaca que a integração regional bem-sucedida requer não apenas infraestrutura física adequada, mas também mecanismos institucionais fortes que permitam a coordenação entre diferentes níveis de governo e setores.

Nas regiões metropolitanas brasileiras, a fragmentação político-administrativa dificulta a articulação entre o planejamento viário regional e o ordenamento territorial municipal, gerando conflitos de uso do solo e ocupações desordenadas. A falta de coordenação entre planos diretores e projetos viários compromete a conectividade e o desenvolvimento integrado. Superar esse desafio requer mecanismos institucionais que integrem os diversos instrumentos de planejamento, como planos diretores, PDUIs e projetos de infraestrutura. Vassalo (2010) enfatiza que essa integração requer vontade política e instrumentos técnicos e financeiros adequados, incluindo a participação de instituições financeiras e do setor privado quando os orçamentos públicos são insuficientes.

A Região Metropolitana de Curitiba destaca-se como um dos casos mais exitosos de coordenação intermunicipal no Brasil. O arranjo institucional desenvolvido conseguiu realizar efetiva coordenação da gestão metropolitana através de mecanismos de articulação para a governança regional. Um exemplo são os planos de desenvolvimento integrado, que articulam diferentes municípios em torno de objetivos comuns de desenvolvimento territorial.

A gestão metropolitana integrada também demanda a criação de instâncias de governança que transcendam as fronteiras municipais. Essas instâncias devem ser capazes de articular interesses muitas vezes divergentes entre municípios, promovendo uma visão regional de desenvolvimento que considere tanto as especificidades locais quanto as necessidades de integração metropolitana. A experiência internacional sugere que o sucesso dessas iniciativas depende da criação de incentivos adequados para a cooperação intermunicipal e da definição clara de competências e responsabilidades.

3. ESTRUTURA SUGERIDA DA METODOLOGIA

A metodologia proposta articula etapas técnicas, institucionais e participativas em uma sequência metodológica que busca garantir a integração entre diferentes escalas de planejamento e a participação efetiva dos atores envolvidos. A estrutura metodológica foi concebida para ser flexível e adaptável a diferentes contextos metropolitanos, mantendo a coerência técnica e a legitimidade política necessárias para a implementação bem-sucedida de políticas integradas de uso do solo. Neste contexto, instrumentos normativos como o Decreto nº 25.794, de 27 de agosto de 2003 (Pernambuco, 2003), de Pernambuco, que declara de utilidade pública para fins de constituição de área especial faixa de terra no entorno da Rodovia BR-232, trecho Recife-Caruaru, exemplificam a necessidade de articulação entre o planejamento viário e o ordenamento territorial, reforçando a importância de mecanismos institucionais que permitam a coordenação efetiva entre diferentes entes federativos na gestão de corredores viários metropolitanos.

Etapa 0: Articulação Institucional constitui o alicerce político e institucional de todo o processo. Nesta fase são realizadas reuniões estratégicas, convocadas pelo Estado, com prefeituras dos municípios envolvidos e órgãos setoriais relevantes, incluindo secretarias de planejamento urbano, meio ambiente, transportes e desenvolvimento econômico. O objetivo central é estabelecer uma pactuação prévia sobre os objetivos do estudo e construir um consenso inicial sobre a importância da abordagem integrada. Esta etapa é fundamental para superar resistências políticas e garantir o comprometimento institucional necessário para as fases subsequentes. A articulação institucional também envolve a definição de responsabilidades, cronogramas preliminares e mecanismos de coordenação entre os diferentes entes federativos.

Etapa 1: Mapeamento e Caracterização Preliminar constitui a base técnica do estudo, reunindo dados sobre o traçado viário, características do solo, densidade urbana, atividades econômicas e tendências de crescimento. Inclui a análise fundiária e das restrições legais, visando identificar conflitos e potencialidades. Ao final, são

elaborados mapas temáticos e definida a área de estudo, considerando a influência direta e indireta da infraestrutura viária.

Etapa 2: Elaboração do Plano de Trabalho Integrado é desenvolvida pelos municípios envolvidos, sob a coordenação do governo do estado, através de um grupo coordenador intersetorial e interinstitucional. Esta etapa consiste na sistematização e estruturação de todas as informações coletadas nas etapas anteriores em um documento técnico abrangente. Este plano de trabalho funciona como um instrumento de planejamento que articula objetivos específicos, justificativas técnicas e políticas, fundamentação legal aplicável, metodologia detalhada, identificação e caracterização dos atores envolvidos, cronograma executivo e estimativas orçamentárias. O documento serve como referência para todas as atividades subsequentes e como instrumento de comunicação com os diferentes atores.

Etapa 3: Diagnóstico e Propostas Preliminares concentra a coleta de dados primários e o diálogo com atores locais, por meio de trabalho de campo, entrevistas, questionários e escutas qualificadas. Com base nessas informações, são elaboradas propostas iniciais de uso do solo, diretrizes urbanísticas, zoneamento e estratégias de desenvolvimento local, considerando potencialidades e restrições. Essas propostas são preliminares e passíveis de ajustes nas fases seguintes.

Etapa 4: Consolidação de Diagnóstico e Propostas constitui o momento de síntese e refinamento de todo o trabalho desenvolvido. Nesta fase, as contribuições coletadas durante o processo participativo são sistematicamente analisadas e integradas às propostas preliminares, resultando em um conjunto consolidado de diretrizes e recomendações. A representação cartográfica das propostas finais é elaborada com alto nível de detalhamento, incluindo mapas de zoneamento proposto, identificação de áreas prioritárias para desenvolvimento, localização de equipamentos públicos sugeridos e delimitação de zonas de proteção ambiental. Esta etapa também envolve a realização de análises de viabilidade técnica, econômica e jurídica das propostas, garantindo sua exequibilidade e sustentabilidade.

Etapa 5: A fase de Implementação e Gestão marca a transição do planejamento à ação, com a elaboração de instrumentos normativos, estratégias de gestão integrada e mecanismos de coordenação entre entes federativos. Inclui a revisão legal, definição de diretrizes de monitoramento e criação de instâncias de governança permanentes. Também abrange a definição de fontes de financiamento, como Parcerias Público-Privadas (PPPs), consórcios, emendas e créditos, viabilizando a execução das propostas formuladas.

A metodologia propõe um modelo de gestão das vias arteriais que reconhece seu papel como corredores econômicos do desenvolvimento metropolitano. Esse modelo deve abranger manutenção física, gestão integrada dos impactos territoriais, captura de valor imobiliário, financiamento por beneficiários e estratégias de tráfego. Prevê-se também a criação de instâncias de governança específicas, articulando poder público, setor privado e sociedade civil para garantir a sustentabilidade e a capacidade de indução ao desenvolvimento econômico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta metodológica busca suprir lacunas no planejamento de grandes obras em áreas metropolitanas, ao oferecer uma base técnica que concilia desenvolvimento econômico, sustentabilidade e justiça social. Contribui para o planejamento integrado no Brasil, enfrentando a fragmentação político-administrativa por meio de governança compartilhada e instrumentos que promovem uma visão territorial além dos limites municipais.

O presente trabalho respondeu à questão de pesquisa proposta ao estruturar uma metodologia integrada que viabiliza a coordenação efetiva entre múltiplos entes federativos no planejamento do uso e ocupação do solo

em áreas de influência de vias arteriais metropolitanas. A metodologia desenvolvida integra potenciais econômicos e sociais à proteção ambiental e à participação da sociedade civil por meio de um processo estruturado em seis etapas complementares. Ela cumpre plenamente o objetivo de estabelecer diretrizes para o uso e ocupação do solo nas áreas de influência de novas vias arteriais metropolitanas, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais.

A implementação bem-sucedida depende de condições políticas e institucionais favoráveis, incluindo vontade política dos gestores municipais, capacidade técnica das equipes envolvidas e disponibilidade de recursos financeiros adequados. A estrutura metodológica foi concebida para ser flexível para se adaptar às especificidades locais, mantendo a coerência técnica necessária para garantir resultados consistentes em diferentes contextos metropolitanos brasileiros. Como agenda de pesquisas futuras, recomenda-se a aplicação empírica da metodologia em uma via arterial metropolitana específica que atravesse múltiplos municípios, permitindo validar sua eficácia metodológica e identificar especificidades relacionadas aos impactos viários sobre o uso do solo, dinâmicas de valorização imobiliária e necessidades de coordenação institucional.

Agradecimentos
Agradeço à FACEPE pelo apoio concedido à pesquisa. Processos n°: IBPG-1883-3.01/24 e IBPG-0558-3.01/23.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, M.; J. J. G. Aragão; A. Brasileiro; Y. Yamashita e R. Soares (2022) Potencial dos corredores econômicos para viabilização de investimento em infraestrutura viária: estudo dos Eixos Nacionais de Integração e Desenvolvimento (ENID) e da Iniciativa de Integração da Infraestrutura Regional Sul-Americana (IIRSA). *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 18, n. 3. DOI: 10.54399/rbgdr.v18i3.6632.

Brasil (2015). Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015. Institui o Estatuto da Metrópole. *Diário Oficial da União*, seção 1, Brasília, DF, 13 jan. 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13089.htm (acesso em 30/06/2025).

Brookings Institution (2013) Economic Corridors. Disponível em: https://www.brookings.edu/articles/economic-corridors/ (acesso em 07/07/2025).

Carneiro, E.; Lopes, W., Espindola, G. (2021). Linking Urban Sprawl and Surface Urban Heat Island in the Teresina–Timon Conurbation Area in Brazil. *Land*, v. 10, n.516. DOI: 10.3390/land10050516.

Catela, E.; Seabra, F (2017) Aglomerações produtivas e escolha de modal de transporte: um estudo de caso do setor industrial de São Paulo e Manaus. *Nova Economia*, v. 27, n. 2., p.295-321. DOI: 10.1590/0103-6351/2785 Disponível em:https://www.scielo.br/j/neco/a/7kH5s49qwFfQs4bNpHHsYyp/?format=pdf&lang=pt

Foroughi, M.; de Andrade, B.; Pereira Roders, A.; Wang, T. (2023) Public participation and consensus-building in urban planning from the lens of heritage planning: A systematic literature review. Cities, v. 135, 104235. DOI: 10.1016/j.cities.2023.104235

Kasraian, D.; Maat, K.; van Wee, B. (2017). The impact of urban proximity, transport accessibility and policy on urban growth: A longitudinal analysis over five decades**.** *Urban Analytics and City Science*, v.46, ed.6. DOI: 10.1177/2399808317740355.

Kyttä, M.; Randrup, T.; Sunding, A.; Rossi, S.; Harsia, E.; Palomäki, J.; Kajosaari, A. (2023) Prioritizing participatory planning solutions: Developing place-based priority categories based on public participation GIS data. Landscape and Urban Planning, v. 239, 104868. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104868

Pernambuco. (2003). Decreto nº 25.794, de 27 de Agosto de 2003. Declara de utilidade pública para fins de constituição de área especial, faixa de terra no entorno da Rodovia BR-232, trecho Recife-Caruaru. Recife, PE, 27 ago. 2003.

Proença, A.; W. Santos Jr. (2019) The productive restructuring and consolidation of new vectors of territorial development: the case of the Perimetrical Development Vector of the São Paulo Macrometropolis. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 23. DOI: https://doi.org/10.22296/2317-1529.2019v21n2p312.Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeur/a/8bBrRt6nxNvhZnsDYNqVBTD

Rosik, P.; Wójcik, J. (2023). Transport Infrastructure and Regional Development: A Surveyof Literature on Wider Economic and Spatial Impacts. *Sustainability,* v. 15. DOI:10.3390/su15010548.

Tavares, J.C. (2018) Planejamento regional no estado de São Paulo: polos, eixos e a região dos vetores produtivos. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 20, n.2. DOI: https://doi.org/10.22296/2317-1529.2018v20n2p344. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeur/a/BcqwmJ9R6PmdtQwqRb4LNqb

WRI (2017). Planejamento urbano: como influencia em nosso dia a dia?. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/planejamento-urbano-como-influencia-em-nosso-dia-dia?

Li, Hongbo; Liu, Yali; Peng, Kaili. Characterizing the relationship between road infrastructure and local economy using structural equation modeling. Transport Policy, [s. l.], v. 61, p. 17–25, 2018.

Cheng, Jianquan; MASSER, Ian. Urban growth pattern modeling: a case study of Wuhan city, PR China. Landscape and urban planning, v. 62, n. 4, p. 199-217, 2003.

Ng, Choy Peng et al. Relative improvements in road mobility as compared to improvements in road accessibility and economic growth: A cross-country analysis. Transport Policy, [s. l.], v. 60, p. 24–33, 2017.

Whitzman, Carolyn; James, Kathryn; Poweseu, Ipul. Travelling together: participatory research methods for disability inclusive road development in Papua New Guinea. Journal of Transport Geography, [s. l.], v. 26, p. 65–71, 2013.

Navarro-Moreno, José; Calvo-Poyo, Francisco; deOña, Juan. Investment in roads and traffic safety: linked to economic development? A European comparison. Environmental Science and Pollution Research, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 6275–6297, 2023.

Sijtsma, Frans J. et al. Ecological impact and cost-effectiveness of wildlife crossings in a highly fragmented landscape: a multi-method approach. Landscape Ecology, v. 35, n. 7, p. 1701-1720, 2020.

Vivier, E.; Sanchez-Betancourt, D. (2023) Participatory governance and the capacity to engage: A systems lens. Public Administration and Development, v. 43, n. 3, p. 220-231. DOI: 10.1002/pad.2012

Rodrigo Juan Martins Cardozo (rodrigo.cardozo@ufpe.br)
Fernanda Catarina Ribeiro da Luz (fernanda.rluz@ufpe.br)
Laura Esmeraldo Arraes de Lavor (laura.lavor@ufpe.br)
Jéssica Renata Macêdo dos Santos (renataa.macedo@gmail.com)
Claudio Marcelo Manguinho Vieira (cmanguinho@condepefidem.pe.gov.br)
Maurício Oliveira de Andrade (mauricio.andrade@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE

O QUE OS USUÁRIOS VALORIZAM NO METRÔ? UMA ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS CARIOCAS

Matheus Araújo Maciel[1], **Karina Braga Marsola** [1], **Gleidisom Thyery Souza da Costa**[1], **Thayane Caroline Oliveira da Conceição**[1], **Matheus Melo de Souza**[1], **Rafael Santos Gouveia**[1], **Richardson Costa de Carvalho**[1], **Michelle Andrade**[2]
[1]Universidade Estadual de Campinas, [2]Universidade de Brasília

RESUMO
O sistema metroviário presta um importante serviço à sociedade, o qual impacta diretamente na segurança, saúde e qualidade de vida dos usuários. Analisar a percepção da sociedade em relação a este sistema também é uma ferramenta para melhoria contínua do serviço. Dessa forma, o objetivo da pesquisa é investigar se os usuários do metrô do Rio de Janeiro atribuem diferentes níveis de importância em atributos do serviço. Para tal fim, 9 atributos foram utilizados em um questionário via QRCode aplicado aos usuários do MetrôRio. Através da aplicação de duas análises, a saber: análise de *ranking* e Análise de Componentes Principais (PCA) foram aplicadas para identificar a relação entre as variáveis. Como resultado, a análise de *ranking* demonstrou que os atributos segurança, passagens e horário de funcionamento foram os três mais votados para a primeira colocação na ordem de percepção, já o PCA revelou padrões como a valorização da confiabilidade em detrimento da lotação e tarifa, e a busca por horários menos cheios, possivelmente devido à efeitos residuais da pandemia. Destaca-se uma relação de variáveis onde há valorização do conforto, sugerindo reavaliação de prioridades no pós-pandemia.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planejamento urbano eficaz é indispensável ao funcionamento das áreas metropolitanas, que exercem significativa influência econômica, social e cultural. Entre os elementos estruturantes desse planejamento, destaca-se a oferta de sistemas de transporte adequados e eficientes, fundamentais para sustentar o desenvolvimento urbano e assegurar qualidade de vida nas metrópoles em expansão (Choi *et al.*, 2025). No caso do Rio de Janeiro, essa necessidade torna-se ainda mais premente em virtude de seu papel central no cenário estadual e nacional, associado à complexidade geográfica de seu território, caracterizado por relevo acidentado e expressiva presença de áreas elevadas. Esse contexto reforça a urgência da implantação de um sistema de transporte público eficiente, capaz de atender às crescentes demandas por mobilidade de forma equitativa.

Além de facilitar o deslocamento cotidiano da população, o transporte urbano é igualmente essencial para o funcionamento da economia, ao garantir o fluxo de pessoas e mercadorias e contribuir para a manutenção dos padrões de consumo e bem-estar (Gifford & Steg, 2007). A valorização do transporte público e dos modos compartilhados depende, em grande medida, da qualidade dos serviços ofertados (Beirão & Sarsfield Cabral, 2007). Melhorias nesse setor não apenas ampliam sua atratividade em relação ao transporte individual, mas também desempenham funções urbanas relevantes, como promover maior equidade no acesso ao espaço urbano (Welch & Mishra, 2013), reduzir os congestionamentos (Eboli & Mazzulla, 2015) e mitigar impactos ambientais (Rérat *et al.*, 2024).

Nesse processo, fatores emocionais e contextuais, como a percepção de conforto, segurança e valor agregado ao serviço, influenciam diretamente as motivações de uso e a adoção do transporte público como escolha habitual (Redman *et al.*, 2013). A satisfação dos usuários, por sua vez, constitui um componente central da eficácia do sistema, uma vez que suas experiências moldam a avaliação geral do serviço (Ingvardson & Nielsen, 2019). Essa satisfação é influenciada por diversos atributos, entre os quais se destacam acessibilidade, tempo de viagem, pontualidade, clareza das informações, qualidade do atendimento, conforto, segurança (Stjerborg, 2024) e imagem institucional (Ibrahim *et al.*, 2020).

Diante desse contexto, o objetivo desta pesquisa é investigar se os usuários do metrô do Rio de Janeiro atribuem diferentes níveis de importância aos atributos do serviço. A hipótese a ser testada é a de que a percepção de importância atribuída aos diferentes atributos do sistema metroviário difere dentre os usuários.

Para alcançar esse objetivo, os participantes da pesquisa foram convidados a ranquear a importância de diversos atributos do serviço metroviário, de acordo com suas percepções individuais. Os dados obtidos foram analisados por meio da técnica de Análise de Componentes Principais (ACP), empregada para a redução de

dimensionalidade e identificação de padrões de avaliação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, em 2023. Nesse ano, o sistema metroviário transportou aproximadamente 188 milhões de passageiros, o que corresponde a cerca de 67% do total de usuários de transporte público da capital (Datario, 2025; Invepar, 2019; MetrôRio, 2023). O sistema é composto por 41 estações distribuídas em três linhas, conectadas por 14 pontos de integração.

Os dados analisados nesta etapa da pesquisa referem-se exclusivamente às respostas obtidas por meio da aplicação de um questionário eletrônico, acessado via *QR Code*. Os usuários foram convidados a ranquear nove atributos do serviço de acordo com o grau de importância que atribuem a cada um. Os atributos avaliados foram: passagens (preço e tipos), confiabilidade, horário de funcionamento, segurança, lotação de pessoas, informação, temperatura/ventilação, limpeza e imagem corporativa. Esses atributos representam diferentes dimensões já discutidas na literatura, como conforto, segurança, acessibilidade e confiabilidade (Aghajanzadeh *et al.*, 2022; Ibrahim *et al.*, 2020; Oña *et al*., 2020; Shiwakoti *et al*., 2019).

Para a análise inicial, utilizou-se o método *Ranked Voting Method* (Fox & Bruyns, 2025), adaptado para captar percepções de importância. Nesse procedimento, cada posição do *ranking* recebeu uma pontuação decrescente (de 9 a 1), de modo que os atributos considerados mais relevantes obtiveram maiores pontuações. A importância relativa de cada atributo foi definida pela soma ponderada das pontuações atribuídas por todos os respondentes.

Em seguida, aplicou-se a técnica de Análise de Componentes Principais (ACP/PCA) (Ismael *et al.*, 2023; Wanke *et al.*, 2023), com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados referentes ao ranqueamento dos atributos e identificar fatores latentes capazes de sintetizar os principais padrões de prioridade percebidos pelos usuários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Perfil da amostra de usuários

Foram coletadas 473 respostas de usuários do metrô do Rio de Janeiro. A amostra é composta majoritariamente por jovens adultos, com elevado nível de escolaridade e renda intermediária, refletindo um perfil qualificado de usuários do sistema metroviário da cidade. A predominância de respondentes entre 18 e 30 anos (60,6%) pode estar associada à estratégia de coleta, realizada por meio de *QR Code* e redes acadêmicas, o que também contribui para explicar a elevada proporção de participantes com ensino superior completo ou em andamento (55,6%), valor superior às médias nacional (18,4%) e estadual (18,7%). A distribuição entre os gêneros apresenta equilíbrio, com leve predominância feminina (51,2%), o que sugere representatividade adequada nesse quesito. Em termos de renda, destaca-se a faixa entre R$ 4.000,00 e R$ 10.000,00 (29,7%), evidenciando um recorte socioeconômico predominantemente de classe média. Quanto ao padrão de uso, observa-se um perfil mais ocasional, com predominância de deslocamentos de uma a duas vezes por semana (35,1%), sendo o trabalho o principal motivo relatado (32,1%). No contexto da pandemia, verificou-se um elevado grau de incerteza em relação à infecção, com 40,6% dos respondentes declarando não saber se haviam sido contaminados, além de uma adesão significativa ao isolamento social, já que mais da metade dos participantes (52,5%) afirmou ter deixado de utilizar o metrô por permanecer em casa. Esse conjunto de características indica uma amostra digitalmente conectada, com alto capital educacional, renda intermediária e padrão de uso estratégico do transporte público, especialmente associado a deslocamentos laborais.

3.2 Ordem de Importância

A Tabela 1 apresenta a distribuição das respostas dos usuários em função de cada atributo no formato de *ranking*. Os itens Segurança (149 votos), Passagens (147 votos) e Horário de Funcionamento (56 votos) foram os três mais votados para a primeira colocação na ordem de percepção. Entretanto, quando é feita a análise das pontuações, a ordem dos atributos passa para: Segurança (3.385 pontos), Passagens (3.134 pontos) e Lotação de Pessoas (2.747 pontos). Apesar de o horário de funcionamento ter recebido mais votos para a primeira colocação do que lotação (56 contra 54), este último obteve melhor desempenho na classificação final devido à sua melhor posição média nos rankings individuais

Tabela 1 - Número de respondentes por atributo em cada posição do *ranking*

Atributo	***Ranking***									**Pontuação total**
	1º	**2º**	**3º**	**4º**	**5º**	**6º**	**7º**	**8º**	**9º**	
Pontuação	**9**	**8**	**7**	**6**	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**	
Segurança	149	98	83	55	34	29	16	6	3	3.385
Passagens	147	75	64	52	35	36	21	26	17	3.134
Lotação de Pessoas	54	84	80	72	41	47	37	35	23	2.747
Horário de funcionamento	56	80	68	63	55	51	53	38	9	2.721
Confiabilidade	47	69	49	43	55	68	70	65	7	2.470
Temperatura/ventilação	8	37	67	86	90	75	49	45	16	2.356
Limpeza	5	19	39	60	104	93	95	47	11	2.112
Informação	5	10	19	38	48	59	105	155	34	1.621
Imagem corporativa	2	1	4	4	11	15	27	56	353	739

Por ser um período pós-pandêmico, esperava-se que atributos relacionados a limpeza, lotação de pessoas, ventilação e temperatura ganhassem destaque, pois refletem preocupações com conforto e saúde, características deste período e apontados como atributos importantes em outras pesquisas semelhantes (Aghajanzadeh *et al.*, 2022; Kriswardhana *et. al.*, 2025). O atributo informação recebeu os maiores votos nas colocações 7 e 8, resultado que podemos relacionar com a facilidade de acesso à informação no celular, deixando as informações físicas como uma segunda opção. O item imagem corporativa mostrou-se o menos importante com 353 votos na última colocação, mostrando que o investimento financeiro em ações de imagem da empresa pode não influenciar a percepção dos usuários, enquanto investimentos nos outros atributos podem naturalmente melhorar a imagem corporativa.

3.3 Análise de Componentes Principais

Os três primeiros componentes principais foram selecionados por explicarem cerca de 70% da variância total. O primeiro componente (PC1 da Figura 1) apresenta uma discrepância entre os atributos confiabilidade (0,55), segurança (0,27), passagens (-0,54) e lotação de Pessoas (-0,52), o que reflete um perfil de usuários que priorizam confiabilidade do serviço prestado (isto é, ter exatidão nos horários de chegada e partidas), em contraste com preocupações relacionadas ao custo da passagem e ao nível de lotação. Trata-se de um grupo para o qual a segurança também tem um peso relevante, ainda que em menor grau.

O segundo componente (PC2 da Figura 1**)** apresenta dissonância entre os atributos de horário de funcionamento (0,65), lotação de pessoas (-0,34) e de temperatura/ventilação (-0,48). Esses resultados apontam para um perfil de usuário que priorizam a disponibilidade do serviço (horário de funcionamento) independentemente da lotação e do conforto térmico (temperatura/ventilação). Isto pode acontecer para usuários que utilizam o sistema nas horas do pico da manhã e da noite, horários que poderiam ser evitados se o sistema estivesse aberto em horários que atualmente está fechado, evitando problemas de superlotação. Temperatura e a aglomeração são atributos que frequentemente impactam diretamente na frequência de uso do transporte público (Ismael *et. al.*, 2023) dissonante dos achados do PC2.

O terceiro componente (PC3 da Figura 1) é caracterizado por um grupo que valoriza o horário de funcionamento (0,62), e à temperatura/ventilação (0,32), ao mesmo tempo que apresenta correlação negativa com aspectos relacionados a passagens (-0,61). Caracteriza-se por um grupo que valoriza o serviço prestado e conveniência em detrimento do valor da passagem, semelhante ao PC1.

No sistema de ônibus, a situação é semelhante, pois atender as expectativas está diretamente ligado a atração de usuários para o sistema de transporte, sendo até mais eficaz do que aumentar a percepção do serviço atual (Atombo e Wemegah, 2021). Essa lógica pode ser extrapolada para os sistemas metroviários, no qual o entendimento de como os atributos se relacionam a partir da percepção dos usuários é importante para o desenvolvimento de um sistema satisfatório. Quando ao serviço atende às expectativas, há uma promoção na competição do transporte público frente ao transporte privado, com uma propensão maior de recomendação de uso do transporte público (Ingvardson e Nielsen, 2019). Também há a possibilidade de transferência de usuários do transporte privado para o transporte público, pois esta mudança é conectada com as percepções e motivações de cada indivíduo (Redman *et al.*, 2013).

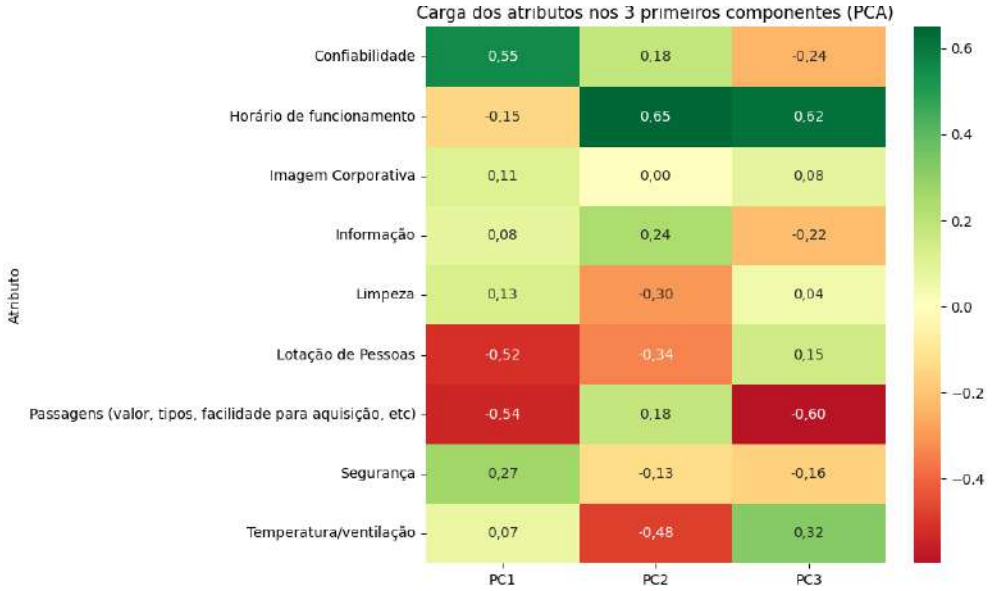


Figura 1- Carga dos atributos nos 3 primeiros componentes (PCA)

4. CONCLUSÕES

Um total de 473 usuários do metrô do Rio de Janeiro responderam um questionário que possuía o objetivo de investigar se os usuários do sistema metroviário atribuem diferentes níveis de importância aos atributos do serviço e se essas percepções variam conforme características sociodemográficas, comportamentais e contextuais. A amostra caracteriza-se por jovens adultos, com alto nível educacional, renda intermediária e uso predominantemente ocasional, motivado pelo trabalho.

Duas análises foram avaliadas, a primeira de *Ranked Voting Method* mostrou que a segurança foi o atributo mais importante, seguido por passagens e lotação de pessoas. Já a segunda análise de PCA, três grupos foram identificados. O primeiro prioriza a confiabilidade e segurança do serviço, sendo sensível à superlotação e ao valor das passagens. O segundo valoriza a disponibilidade do metrô, mesmo com menor conforto térmico e alta lotação, sugerindo uso fora dos horários de pico. O terceiro grupo destaca-se pela busca por conveniência e conforto, com menor preocupação com o preço, indicando disposição para pagar mais por melhor qualidade no serviço. Baseado nisto, a gestão do metrô precisa ter mais atenção no ajuste de horários, segurança e conforto.

Algumas limitações da pesquisa estão relacionadas a faixa etária do usuário (18 a 30 anos), pois a pesquisa foi realizada *on-line*, onde esta faixa etária está mais presente e participam de pesquisas *on-line* com mais frequência. Uma análise da pesquisa com diferentes usuários poderia viabilizar análises mais representativas em função do gênero, faixa etária, frequência de uso, dentre outros. Para trabalhos futuros, há a necessidade de ampliar a base de dados sobre a percepção de importância em outros sistemas metroviários do Brasil, com o objetivo de realizar uma comparação entre sistemas para viabilizar a adoção de práticas de *benchmarking*, identificando estratégias e ações implementadas por determinadas concessionárias que possam ser adaptadas e aplicadas em outras empresas ou regiões do país.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aghajanzadeh, M.; K. Aghabayk; J. Esmailpour; C. de Gruyter (2022) Importance – Performance Analysis (IPA) of metro service attributes during the COVID-19 pandemic. *Case Studies on Transport Policy*, v. 10, n. 3. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.06.005

Atombo, C.; T. D. Wemegah (2021) Indicators for commuter's satisfaction and usage of high occupancy public bus transport service in Ghana. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100458

Choi, N.; J. Kim; S. Kim; K. Jang; J. Schmocker (2025) The role of perceptions and expectations for public transport

satisfaction in Korean metropolitan áreas. *Research in Transportation Business & Management*, v. 60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101333

Eboli, L., G. Mazzulla (2015) Relationships between rail passengers' satisfaction and service quality: a framework for identifying key service factors. *Public Transport*, v. 7, n. 2. DOI: 10.1007/s12469-014-0096-x

Dai, S.; Yu, L.; L. Song; Y. Li; X. Fan (2024) The temporal distribution of ridership in metro stations from land-use perspective. *Plos One*, v. 19. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308759

Datario (2025) Total mensal de passageiros transportados no Metrô, segundo as estações e linhas, no Município do Rio de Janeiro entre 1998 e 2024. Disponível em: https://www.data.rio/documents/2f911f92b7e44b33854c13d4160b0f5a/about

Fox, N. B.; B. Bruyns (2025) An Evaluation of Borda Count Variations Using Ranked Choice Voting Data. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.00618

Gifford, R.; L. Steg (2007) The impact of automobile traffic on quality of life. In T. Gärling, & L. Steg (Eds.), Threats from car traffic to the quality of urban life : problems, causes, and solutions (pp. 33-51). Elsevier

Kriswardhana, W.; K. Ismael; S. Duleba; D. Esztergár-Kiss (2025) Uncovering distinct public transport user profiles and the factors influencing the users' intentions. *Journal of Urban Mobility*, v. 7. DOI: https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2025.100127

Metrôrio. (2023) Sobre o MetrôRio. Disponível em: https://www.metrorio.com.br/Empresa/Sobre. (acesso em: 23/06/2025)

Ibrahim, A. N. H.; M. N, Borhan; N. I. Yusoff; A. Ismail (2020) Rail-based public transport service quality and user satisfaction – a literature review. *Promet - Traffic - Traffico*, v. 32, n. 3, p. 423–435 DOI: https://doi.org/10.7307/ptt.v32i3.3270

Ismael, K.; D. Esztergár-Kiss; S. Duleba (2023) Evaluating the quality of the public transport service during the COVID-19 pandemic from the perception of two user groups. *European Transport Research Review*, v. 15. DOI: 10.1186/s12544-023-00578-1

Invepar (2019) *Relatório Anual 2018*. Disponível em: https://www.invepar.com.br/Relatório anual 2018abec.pdf?Arquivo=+FDzv42sw+6SuJq9VMMKHQ== (acesso em: 10/04/2025)

Ingvardson, J., O. Nielsen (2019) The relationship between norms, satisfaction and public transport use: A comparison across six European cities using structural equation modelling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 126. DOI: 10.1016/j.tra.2019.05.016

Onã, J. de; E. Estévez; R. de Õna. Perception of Public Transport Quality of Service among Regular Private Vehicle Users in Madrid, Spain. *Transportation Research Record*, v. 2674, n. 2. DOI: https://doi.org/10.1177/0361198120907095

Redman, L.; M. Friman; T. Garling; T Harting (2013) Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*, v. 25. DOI: 10.1016/j.tranpol.2012.11.005

Rérat, P.; D. Marincek; E. Ravalet (2024) How do e-bikes compete with the other modes of transport? Investigating multiple dimensions of a modal shift. *Applied Mobilities*. DOI: https://doi.org/10.1080/23800127.2024.2332006

Shiwatoki N.; P. Stasinopoulos; P. Vincec; W. Qian; R. Hafsar (2019) Exploring how perceptive differences impact the current public transport usage and support for future public transport extension and usage: A case study of Melbourne's tramline extension. *Transport Policy*, v. 84. DOI: 10.1016/j.tranpol.2019.10.002

Stjernborg, V. (2024) Triggers for feelings of insecurity and perceptions of safety in relation to public transport; the experiences of young and active Travellers. *Apllied Mobilities*, DOI: 10.1080/23800127.2024.2318095

Wanke, P. F.; A. K. Yazdi; T. Hanne; Y. Tan (2022) Unveiling drivers of sustainability in Chinese transport: an approach based on principal component analysis and neural networks. *Transportation Planning and Technology*, v. 46, n. 5. DOI: https://doi.org/10.1080/03081060.2023.2198517

Welch, T.; S. Mishra (2013) A measure of equity for public transit connectivity. *Journal of Transport Geography*, v. 33. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.09.007

Matheus Araújo Maciel (matheus1914maciel@gmail.com)
Karina Braga Marsola (kbraga@unicamp.br)
Gleidisom Thyery Souza da Costa (Thyery1808@gmail.com)
Thayane Caroline Oliveira da Conceição (carolinethayane13@gmail.com)
Matheus Melo de Souza (matheuusmelodesouza@gmail.com)
Richardson Costa de Carvalho (r175550@dac.unicamp.br)
Rafael Santos Gouveia (rafaelgou1110@gmail.com)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Laboratório de Logística e Comercialização, Av. Candido Rondon, 501 - Barão Geraldo, Cidade Universitária, Campinas, São Paulo, Brasil
Michelle Andrade (maccivil@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Anexo SG-12, 1º andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal

PESQUISA DE SATISFAÇÃO COM OS USUÁRIOS DE ÔNIBUS DE JAGUARIÚNA SP E PLANO DE AÇÃO PARA MELHORAR O SISTEMA

Rodrigo Bormio Sanchez[1], **Waldyr Luiz Ribeiro Gallo**[1,]
[1]Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
Neste trabalho foi feita uma pesquisa de satisfação com os usuários do sistema de ônibus de Jaguariúna, com o objetivo de descobrir quais são as características do sistema que a população considera mais importantes, e qual o desempenho de cada uma delas, de modo a ter-se um plano de ação para melhorar o serviço e atrair mais usuários. Após uma entrevista de campo e uma regressão linear, verificou-se que o conforto da viagem e o preço da passagem são importantes e têm boa performance, devendo-se trabalhar para que isso seja mantido. Tempo de espera e pontualidade são relativamente importantes mas têm baixa performance, e deve-se desenhar ações para melhorar. As outras características são menos importantes para o plano de ação, de acordo com o modelo.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, ficou claro que buscar estratégias para uma mobilidade urbana mais verde deve ser um objetivo das autoridades e da sociedade, cientes de que a circulação de pessoas pelas áreas urbanas continua sendo fundamental para as economias locais. Shah et al. (2021) defendem que os 3 pilares para isso são evitar, mudar e melhorar (abordagem A-S-I: *Avoid, Shift, Improve*). “Evitar” refere-se a desenhar o tecido urbano de modo que as pessoas precisem viajar menos para ter acesso a serviços e comodidades, principalmente através de uma maior diversidade de usos do solo em diferentes bairros. “Mudar” significa promover a mudança modal, buscando meios para que as pessoas usem a rede de transporte coletivo para fazer suas rotas ao invés de seus carros. Claro que também deve-se trabalhar para que o caminho oposto seja evitado: que as pessoas não deixem de usar o transporte público. Por fim, “melhorar” está ligado a um viés mais técnico, onde trabalha-se para diminuir a pegada ecológica dos veículos através de melhorias em sua engenharia. O foco deste trabalho é o pilar “Mudar”, aplicado ao município de Jaguariúna, SP.

Taylor, Miller, Isek e Fink (2009) afirmam que faz sentido interpretar a mobilidade urbana como qualquer outro segmento do mercado, em que os cidadãos são os consumidores cuja demanda é se locomover através da cidade. Neste sentido, a escolha por qual modal irão usar em suas viagens é um resultado entre os custos (preço, tempo de espera, etc.) e benefícios de cada um (conforto, velocidade, etc.). Para aumentar os níveis de uso do transporte público, portanto, os planejadores urbanos devem buscar meios de diminuir os seus custos e melhorar os seus benefícios.

Neste trabalho, é apresentada uma pesquisa de satisfação com os usuários da rede de ônibus municipal de Jaguariúna, SP. O município possui 60816 habitantes (IBGE, 2022). O intuito é esclarecer 2 pontos: (1) qual o nível de satisfação da população com as principais características da rede e (2) quais são as características mais importantes que determinam o nível de satisfação geral do público com o serviço. Responder esses dois questionamentos significa construir uma matriz IPA para o transporte público de Jaguariúna.

A matriz IPA (*Importance-Performance Analysis*) foi apresentada por Martilla e James (1977) e consiste em uma técnica para priorizar recursos na direção mais eficiente quando em busca por obter mais clientes e/ou melhorar a satisfação dos usuários sobre algum produto ou serviço. A estratégia consiste em mapear quais são as características mais e menos importantes, e de melhor e pior desempenho, do objeto em estudo, de modo a desenhar uma matriz de 4 quadrantes (Figura 1) que irá direcionar a tratativa para cada característica mapeada de acordo com a sua posição na matriz, buscando otimizar os recursos e resultados.

O objetivo deste trabalho é, portanto, a partir do resultado da pesquisa de satisfação, construir uma matriz IPA para a rede de ônibus público de Jaguariúna e desenhar um plano de ação para melhorar seu desempenho geral frente aos usuários, garantindo recursos na direção que irá trazer os melhores resultados.

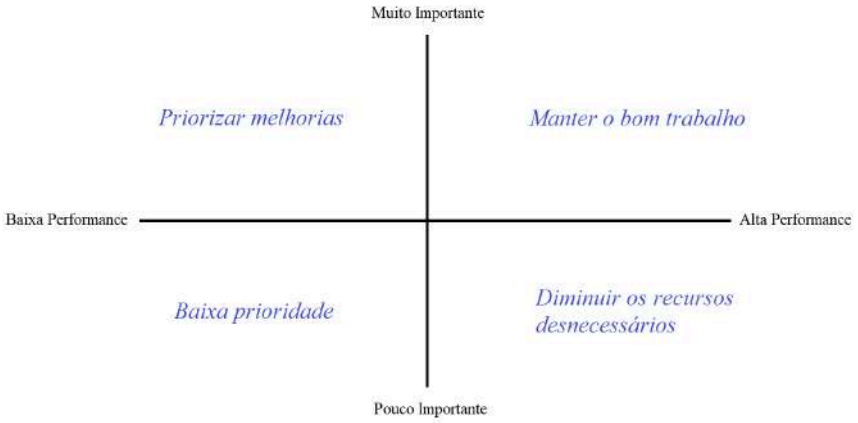


Figura 1: Matriz IPA

2. METODOLOGIA

Para a montagem do questionário, foram avaliados trabalhos acadêmicos da linha de pesquisa que mede a elasticidade das taxas de uso de redes de transportes ao redor do mundo em relação às suas principais características. Esses artigos geralmente coletam informações sobre esses atributos, seja via pesquisa de campo ou bases de dados dos municípios em estudo, e cruzam com séries históricas de uso das linhas para desenvolver modelos de regressão linear. O objetivo de avaliar quais são as características de maior elasticidade (em módulo — positivas ou negativas) é inserir perguntas no questionário que sejam, de fato, relevantes para o entendimento do desempenho do ônibus de Jaguariúna. Para cada pergunta, a resposta fica dentro de uma escala de 0 a 4, onde 0 representa uma percepção que tende a afastar o usuário — como alto preço ou baixo conforto — e 4 tende a gerar lealdade ao serviço - como baixo tempo de espera ou alto nível de segurança.

Taylor, Miller, Iseki e Fink (2009) fizeram um estudo deste tipo para 265 áreas urbanas nos Estados Unidos e calcularam que as características que mais afetam o uso do transporte coletivo foram a frequência das linhas e o preço médio da passagem. Deve haver, portanto, perguntas no questionário sobre o preço de embarque e o tempo de espera nas estações (considera-se que os pontos são estações). Em um estudo na cidade de Los Angeles, Chakrabarti (2017) encontrou que as 4 variáveis de maior impacto foram o tempo das viagens, os desvios de horário e a densidade de estações na região de moradia e trabalho. Perguntas sobre tempo de viagem, pontualidade das linhas e distância para o ponto de ônibus mais próximo foram incluídas na pesquisa. No trabalho de Devika e Harikrishna (2020) em Calicute, as variáveis de maior impacto foram o tempo e conforto da viagem. Perguntas sobre o conforto das estações e dos veículos foram inseridas no questionário. Por fim, os autores consideram que faz sentido perguntar aos usuários o que pensam sobre a segurança nas estações e durante as viagens, visto que segurança pública é um tema relevante no Brasil.

Um dos autores abordou as pessoas nos dias 14 e 21/06/2025, na praça Umbelina Bueno, no centro da cidade. Primeiramente, perguntava-se se a pessoa usava o serviço. Para aqueles que não andavam no ônibus ao menos uma vez por semana, a pesquisa foi interrompida. Ao todo 56 pessoas responderam ao questionário num tempo total de 4:30h em campo.

Através dessas perguntas, foi possível medir a performance média (na percepção dos respondentes) de diferentes características da rede de ônibus público de Jaguariúna. Num segundo passo, para calcular a contribuição de uma delas para o desempenho geral do sistema, é necessário primeiramente conhecê-lo: foi, portanto, adicionada uma pergunta final ao questionário: “Qual seu nível de satisfação geral com o sistema de ônibus de Jaguariúna?”, também usando uma escala de 0 a 4. Deste modo, o questionário ficou como na Tabela 1.

Tabela 1: Questionário feito aos usuários

Pergunta	Extremidades da escala das respostas 0	4
O que você pensa sobre a distância até a estação mais próxima?	Muito longe	Muito perto
O que você pensa sobre o tempo de espera para o ônibus?	Muito longo	Muito curto
O que você pensa sobre a pontualidade das linhas?	Nada pontual	Muito pontual
O que você pensa sobre o conforto das estações?	Muito desconfortável	Muito confortável
O que você pensa sobre a segurança das estações?	Muito inseguras	Muito seguras
O que você pensa sobre o tempo das viagens?	Muito longo	Muito curto
O que você pensa sobre o conforto das viagens?	Muito desconfortável	Muito confortável
O que você pensa sobre a segurança das viagens?	Muito inseguras	Muito seguras
O que você pensa sobre o preço da passagem?	Muito caro	Muito barato
Qual seu nível de satisfação geral com o sistema de ônibus de Jaguariúna?	Muito insatisfeito	Muito satisfeito

Segundamente, é necessário transformar a satisfação geral na variável dependente do estudo. Em outras palavras, ela é mais afetada pelas características que a população considera mais relevantes. Existem diferentes métodos matemáticos para calcular a importância relativa das perguntas de uma pesquisa de satisfação de clientes, como por exemplo o SEM (*Structural Equation Modeling*), usado por Sahraei et al. (2023). Neste estudo, todavia, foi usada a regressão linear múltipla, de forma similar a Figler, Sriraj, Welch e Yavuz (2011). Neste caso, então, a satisfação geral é a variável dependente S, cujo resultado é função da satisfação individual dos atributos da rede, que são as variáveis independentes s_i do modelo:

$$S = \beta_0 + \beta_1 s_1 + \beta_2 s_2 + \ \ldots \ + \beta_n s_n \qquad (1)$$

Desta forma, foram calculados valores de β_i que melhor predizem a avaliação de um respondente sobre o desempenho geral do sistema de ônibus com base em suas próprias respostas para as características do sistema, buscando diminuir ao máximo a diferença entre a satisfação geral calculada pelo modelo e aquela que de fato foi informada pela pessoa entrevistada. Foi usada a técnica de eliminação regressiva, retirando as variáveis de maior valor-p acima de 0,05 uma a uma, e simulando o modelo a cada rodada. Os resultados para intersecção no ponto 0 ficaram melhores, e isto faz sentido pois, se a avaliação de um usuário for 0 para cada atributo, a satisfação geral com o serviço deve ser 0 também. Os cálculos foram realizados no Excel.

3. RESULTADOS

3.1. Satisfação dos usuários e importância calculada das características

Foi possível medir o desempenho de cada característica avaliada da rede de ônibus de Jaguariúna aos olhos da população, sendo este a média numérica de 0 a 4 para todas as respostas. Além disso, a regressão linear chegou nos seguintes coeficientes para cada característica da rede:

Tabela 2: Resultados do questionário feito aos usuários e coeficientes da regressão linear

Característica	0	1	2	3	4	Média	Desvio-padrão	β_i	p-valor
Distância até a estação mais próxima	2%	11%	11%	55%	21%	2,84	0,95	-	-
Tempo de espera para o ônibus	30%	29%	14%	23%	4%	1,41	1,25	0,22	0,017
Pontualidade das linhas	25%	29%	11%	32%	4%	1,61	1,27	0,18	0,045
Conforto das estações	29%	34%	13%	23%	2%	1,36	1,18	-	-
Segurança das estações	27%	27%	9%	38%	0%	1,57	1,25	-	-
Tempo das viagens	5%	16%	23%	52%	4%	2,32	0,97	-	-
Conforto das viagens	11%	11%	21%	52%	2%	2,20	1,07	0,42	0,000
Segurança das viagens	9%	20%	25%	45%	2%	2,11	1,04	-	-
Preço da passagem	2%	16%	7%	54%	21%	2,77	1,03	0,21	0,005
Satisfação geral	9%	13%	41%	34%	4%	2,11	0,98	-	-

Este modelo, já com as variáveis independentes selecionadas, obteve um R^2 $ajustado$ de 0,87. Além disso, o histograma de resíduos apresentou uma forma simétrica em forma de sino, de média 0,017, indicando uma distribuição normal.

3.2. Matriz IPA e plano de ação

Através do desempenho e grau de importância para cada característica, foi possível construir a matriz IPA. Para o eixo "performance" foi usada a mesma escala do questionário: de 0 a 4. Para o eixo "importância", as características foram normalizadas pelo maior coeficiente linear da regressão (conforto das viagens: 0,42) e multiplicadas por 4.

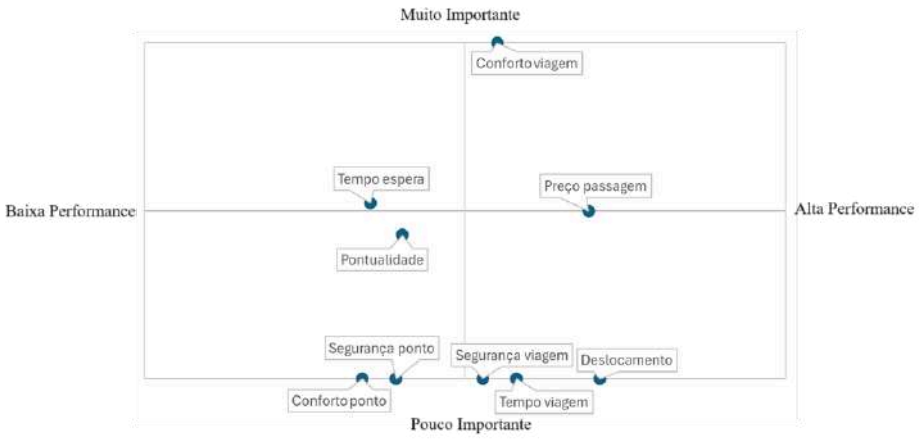


Figura 2: Matriz IPA para o serviço de ônibus de Jaguariúna

A matriz IPA indica que o conforto da viagem é a característica mais importante numa percepção média da população, e apresenta uma performance um pouco acima de razoável. Nos últimos anos o município de Jaguariúna passou a contar com ônibus mais novos, equipados com ar condicionado e wi-fi. Além disso, o fato de ser uma cidade relativamente pequena em relação a grandes metrópoles significa que não é comum viajar em ônibus muito cheios, e as pessoas conseguem, na maioria das vezes, ficar sentadas ao longo do percurso. Mesmo assim, há o que melhorar: muitos entrevistados reclamaram ao autor sobre o ônibus "chacoalhar" muito, indicando que deve ser feito um trabalho para melhorar o sistema de amortecimento dos veículos.

O preço da passagem aparece como ponto alto do serviço. A cidade subsidia boa parte dos custos da empresa terceirizada que opera o sistema, de modo que a taxa de embarque seja de R$ 2,50, valor considerado bom pela maioria dos entrevistados. Cabe às autoridades da cidade encontrar maneiras de continuar com essa política, buscando recursos financeiros e parcerias público-privadas para seguir com essa prática benéfica.

Em contrapartida, o tempo de espera para embarque e a pontualidade das linhas tiveram uma importância calculada média, porém performance abaixo de 2. Isso significa que a população considera, sim, estes atributos, de certa forma, relevantes porém está, na média, infeliz com sua performance. Aumentar a frequência das linhas parece uma solução desafiadora, uma vez que seriam enviados ônibus grandes para carregar uma baixa quantidade de passageiros de alguns bairros que são quase rurais. Todavia, uma solução interessante seria operar essas linhas de bairros mais afastados e/ou horários fora de pico com mini-ônibus ou vans, de menor capacidade, mas que seriam suficientes para esta baixa demanda de pessoas. Em relação à pontualidade, cabe cobrar os responsáveis pela condução que sejam mais rígidos com os horários, bem como entrevistá-los e ouvir os motivos pelos quais não estão conseguindo atender os pontos na hora marcada, para corrigir aquilo que seja necessário. Outra ação interessante é instalar *trackers* de posição dos ônibus por GPS, associados a algum aplicativo de acompanhamento das linhas em tempo real pelos usuários.

O conforto e segurança dos pontos aparecem com baixa importância e baixa performance. Apesar de não influenciarem tanto a satisfação geral dos usuários, instalar proteções contra vento e chuva, bancos acolchoados e melhorar os sistemas de filmagem e iluminação são ações de menor prioridade, porém

interessantes ao bem estar público. Essas câmeras também podem ser instaladas dentro do ônibus para melhorar a segurança ao longo da viagem, que apresentou um resultado pouco acima do razoável.

Por fim, o tempo da viagem e o deslocamento até o ponto de ônibus mais próximo obtiveram uma boa avaliação geral dos usuários, apesar de pouco influenciarem a percepção geral. Isso se explica pelo fato de Jaguariúna ser uma cidade pequena e, portanto, as distâncias de caminhada até o ponto, bem como as das linhas, são curtas na maioria dos bairros. Cabe aos responsáveis pela mobilidade da cidade manterem a boa densidade de pontos de ônibus pelas áreas da cidade e aumentarem onde for necessário, que são poucos lugares. Como a matriz mostra, há outras prioridades na frente destas, mas deve-se buscar que não piore.

Vale notar que 5 das 9 variáveis foram retiradas do modelo por apresentarem p-valores altos. Isso é um indicativo de que a importância relativa de cada característica do sistema não é um consenso entre a população, mas varia bem de pessoa para pessoa. Um próximo passo para este trabalho seria incluir no questionário uma pergunta justamente sobre isso, de modo que fosse possível comparar a importância calculada com a importância declarada. Mais que isso, seria interessante explorar mais a fundo os dados socioeconômicos dos respondentes e tirar as devidas conclusões. Por fim, este estudo pode ser replicado em outras cidades do Brasil, preferencialmente usando as mesmas perguntas, para comparar os resultados.

4. CONCLUSÕES

Um dos pilares fundamentais para alcançar a mobilidade urbana verde é atrair mais usuários para o transporte coletivo. Para isso, é necessário entender quais são as características mais importantes de uma rede de transporte público aos olhos da população e qual o desempenho de cada uma delas. Em uma pesquisa de satisfação com usuários do ônibus circular de Jaguariúna, calculou-se que o conforto da viagem foi o atributo mais importante, com desempenho um pouco acima do razoável. O preço da passagem teve a melhor avaliação, e contribui razoavelmente para o todo. O tempo de espera e pontualidade das linhas precisam ser melhorados e, em menor prioridade, a segurança e conforto dos pontos. A segurança da viagem, tempo da viagem e deslocamento até o ponto mais próximo não são motivos de preocupação, mas deve-se trabalhar para que não piorem. Partindo disso, desenhou-se um simples, porém eficiente, plano de ação. Por fim, este trabalho abre espaço para continuações, ou que seja replicado em outros municípios para comparação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Shah, K. J.; S. Pan; I. Lee; H. Kim; Z. You; J. Zheng e P. Chiang (2021) Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 326, p. 1-13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129392

Chakrabarti, S. (2017) How can public transit get people out of their cars? An analysis of transit mode choice for commute trips in Los Angeles. *Transport Policy*, v. 54, p. 80-89. DOI: 10.1016/j.tranpol.2016.11.005

Taylor, B. D.; D. Miller; H. Iseki e C. Fink (2009) Nature and/or nurture? Analyzing the determinants of transit ridership across US urbanized areas. *Transportation Research Part A*, v. 43, n. 1, p. 60-77. DOI: 10.1016/j.tra.2008.06.007

Figler, S. A.; P. S. Sriraj; E. W. Welch e N. Yavuz (2011) Customer Loyalty and Chicago, Illinois, Transit Authority Buses: Results from 2008 Customer Satisfaction Survey. *Transportation Research Record*, v. 2216, n. 1, p. 148-156. DOI: 10.3141/2216-16

Sahraei, M; M. Mesbah; M. Habibian; T. Saeidi e A. Soltanpour (2023) How transit improvements are perceived by passengers? Results of a before-after customer satisfaction survey. *Archives of Transport*, v. 65, n. 1, p. 53-66. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2477

Martilla, J. A e J. C. James (1977) Importance-Performance Analysis. *Journal of Marketing*, v. 41, n. 1, p. 77-79. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/1250495 (acesso em 04/06/2025)

Devika, R. e M. Harikrishna (2020) Analysis of factors influencing mode shift to public transit in a developing country. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 491, p. 1-7. DOI: 10.1088/1755-1315/491/1/012054

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Censo Demográfico 2022. Rio de Janeiro: IBGE.

Rodrigo Bormio Sanchez (rodrigo.bormio.sanchez@gmail.com)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Rua Mendeleyev, 200, Cidade Universitária, Campinas, São Paulo, Brasil
Waldyr Luiz Ribeiro Gallo (gallo@fem.unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Rua Mendeleyev, 200, Cidade Universitária, Campinas, São Paulo, Brasil

PLANEJAMENTO E DESAFIOS DO BRT EM CIDADES LATINO-AMERICANAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA COM ÊNFASE NO CASO DE BOGOTÁ

Gabriela Lopes Martins, Letícia Gabrielle Barbosa de Oliveira, Leonardo Herszon Meira
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

RESUMO
Este artigo analisa os desafios enfrentados na implementação de sistemas *Bus Rapid Transit* (BRT) em cidades latino-americanas, muitas vezes associados à ausência ou fragilidade do planejamento urbano e de transportes, com foco na experiência do TransMilenio de Bogotá. Utilizando o protocolo PRISMA, foi realizada uma revisão sistemática na base Scopus com os termos "BRT", "*transport planning*" e "TransMilenio", resultando em 11 artigos selecionados. A análise bibliométrica demonstrou a predominância de estudos quantitativos voltados a impactos socioeconômicos, segurança viária e eficiência operacional, enquanto a análise sistemática permitiu a identificação de quatro eixos temáticos principais: infraestrutura e segurança, governança, impactos sociais e otimização. Os resultados evidenciam a centralidade do TransMilenio no debate regional sobre mobilidade e reforçam a necessidade de abordagens integradas, que articulem planejamento urbano, inclusão social e participação cidadã. Conclui-se que o sucesso de sistemas BRT depende de aspectos técnicos, arranjos institucionais e sensibilidade às desigualdades urbanas, sendo estes itens essenciais também no planejamento de transportes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A implantação de sistemas de transporte coletivo estruturados, como o *Bus Rapid Transit* (BRT), representa uma estratégia recorrente para enfrentar os desafios de mobilidade em centros urbanos latino-americanos marcados por crescimento desordenado, desigualdades espaciais e fragmentação institucional. No entanto, a adoção desse modelo não deve se restringir à mera transposição de soluções técnicas. A experiência internacional evidencia que a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas BRT estão diretamente associadas à existência de um planejamento urbano integrado, consistente e sensível às realidades locais.

Conforme destaca o BRT *Planning Guide*, diversas cidades iniciaram processos de transformação urbana impulsionados não apenas por governos, mas também por coalizões sociais, universidades, organizações internacionais e o setor privado, que desempenham papéis essenciais na articulação técnica, política e institucional dos projetos. O documento ressalta que, embora existam recursos técnicos e financeiros disponíveis em nível global, a efetivação de um sistema de transporte público eficiente depende fundamentalmente da capacidade de planejamento local, do engajamento de atores diversos e da construção de consensos em torno de mudanças estruturais necessárias (ITDP, 2017).

Nesse cenário, destaca-se o TransMilenio, sistema BRT da cidade de Bogotá, na Colômbia, amplamente reconhecido como uma das referências globais em transporte coletivo de média e alta capacidade (Cervero, 2013). Inaugurado em 2000, o TransMilenio foi pioneiro ao alcançar desempenho comparável ao de sistemas metroviários, tanto em termos de eficiência operacional quanto de volume transportado. Com demanda diária próxima a 1 milhão de passageiros, tornou-se símbolo de inovação no setor e passou a inspirar projetos semelhantes em diversas cidades latino-americanas (Escobar, 2013).

Nesse contexto, o presente artigo busca analisar os principais desafios relacionados ao planejamento e à implementação de sistemas BRT em cidades latino-americanas, com ênfase na experiência do TransMilenio de Bogotá. Por meio de uma análise bibliométrica da literatura científica indexada na base Scopus, pretende-se identificar os enfoques metodológicos predominantes, temas recorrentes e lacunas de pesquisa, de modo a contribuir para o aprimoramento das práticas e diretrizes de planejamento do transporte público na região.

2. METODOLOGIA

2.1. Busca por artigos na base de dados

Para a condução deste estudo, foi utilizada a base de dados Scopus, acessada por meio do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Adotou-se como referência metodológica o protocolo PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises), conforme orientações de Moher *et al*. (2010), o qual organiza a coleta em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão.

A etapa de identificação foi realizada em junho de 2025, por meio de uma busca nos campos de título, resumo e palavras-chave, utilizando as expressões "brt", "*transport planning*" e "*transmilenio*". A combinação desses termos com operadores booleanos teve como objetivo delimitar o escopo da pesquisa para publicações que abordassem o sistema BRT TransMilenio em articulação com o planejamento do transporte urbano. Como resultado, foram identificados 13 documentos. Na etapa de seleção, aplicaram-se filtros para considerar apenas artigos científicos completos, publicados em periódicos revisados por pares, redigidos em inglês ou espanhol e disponíveis na versão final. Embora todos os 13 artigos tenham atendido a esses critérios, apenas 11 estavam acessíveis integralmente para leitura e análise. Assim, a etapa de inclusão foi composta por esses 11 artigos completos, os quais fundamentam a base empírica deste trabalho.

2.2. Análise Bibliométrica e Sistemática

Com os artigos selecionados, procedeu-se à extração dos dados diretamente na plataforma Scopus, nos formatos .bib e .csv, para fins de tratamento e análise. A pesquisa foi organizada em duas frentes complementares: uma abordagem bibliométrica e uma análise sistemática do conteúdo.

Para a análise bibliométrica, utilizaram-se os softwares Microsoft Office Excel e o pacote Bibliometrix, por meio do ambiente RStudio, a fim de verificar a distribuição dos estudos ao longo do tempo, os principais autores e instituições vinculadas à produção científica sobre o tema.

Na etapa sistemática, construiu-se um quadro-resumo com as informações extraídas de cada artigo, incluindo: autor e ano de publicação, objetivo da pesquisa e metodologia empregada. Em seguida após o quadro foi destacada suas principais conclusões. Essa estruturação permitiu a identificação de padrões temáticos e metodológicos, bem como a construção de eixos analíticos que orientaram a discussão dos resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Análise bibliométrica

Essa primeira análise dos 11 artigos selecionados revela uma concentração significativa de estudos voltados à experiência do TransMilenio de Bogotá, com destaque para o período entre 2013 e 2024, fase esta que coincide com a expansão da terceira etapa do sistema. Esta concentração evidencia o papel central de Bogotá como referência regional em transporte coletivo estruturado, despertando crescente interesse acadêmico sobre o BRT como solução para os desafios da mobilidade urbana em contextos latino-americanos.

Essa centralidade temática e geográfica é reforçada pela nuvem de palavras gerada a partir dos termos mais recorrentes nos artigos analisados (Figura 1). Observa-se a predominância de expressões como *Colômbia*, *Bogotá*, *TransMilenio*, *bus rapid transit* e *urban transport*, que sintetizam o foco das publicações e sua vinculação com a realidade colombiana e o contexto latino-americano.



Figura 1: Nuvem de palavras gerada a partir dos artigos selecionados na base Scopus

Em relação à autoria, observa-se predominância de pesquisadores vinculados a instituições latino-americanas, especialmente colombianas, indicando uma produção científica ancorada nas realidades locais. Destacam-se autores recorrentes, como Guzmán, que aborda desde questões tarifárias até impactos fundiários, demonstrando a diversidade de enfoques possíveis sobre um mesmo sistema.

No que se refere às metodologias, há predominância de abordagens quantitativas, com uso de modelos econométricos, regressões, técnicas de diferenças-em-diferenças e análises espaciais, refletindo uma preocupação com evidências empíricas para avaliação de impactos. Contudo, também se identificam abordagens qualitativas relevantes, voltadas à governança, participação social, justiça espacial e gênero no planejamento do transporte, os quais são aspectos igualmente visíveis na nuvem de palavras, por meio de termos como *urban planning*, *governance*, *cities* e *humans*.

Tematicamente, os estudos distribuem-se em quatro eixos principais, são eles os impactos socioeconômicos, incluindo renda, valorização fundiária (*land value*) e posse de veículos; o planejamento e operação do sistema, com foco em modelos de otimização (*optimization*) e desempenho; a governança e participação social, com ênfase na judicialização e conflitos institucionais; e a equidade e segurança viária, incluindo acessibilidade e gênero. Essa variedade revela a complexidade dos sistemas BRT e seu papel no debate urbano contemporâneo, como alternativa técnica e instrumento de reconfiguração social, territorial e política das cidades.

3.2. Análise Sistemática

Com base na seleção dos 11 artigos da análise, procedeu-se à sistematização dos principais elementos de cada estudo, com foco na identificação de seus objetivos e das metodologias aplicadas. A tabela a seguir resume as informações, permitindo observar diferentes enfoques adotados na literatura científica sobre TransMilenio de Bogotá e suas interfaces com o planejamento do transporte público em contextos latino-americanos.

Tabela 1: Artigos selecionados - objetivos de pesquisa e metodologias empregadas

Autores/Ano	Objetivo	Metodologia
Garcia *et al*. (2024)	Avaliar o desempenho em segurança viária de corredores exclusivos e preferenciais de ônibus em Bogotá, identificando o impacto desses tipos de faixas na ocorrência de acidentes de trânsito.	Foram aplicados modelos binomiais negativos multivariados para comparar acidentes em vias arteriais, BRT e BHLS em Bogotá, com validação por AIC, K-fold e parcimônia.
Montero & Sotomayor (2024)	Analisar como a judicialização e a mobilização cidadã levaram à suspensão do projeto TransMilenio pela Carrera Séptima em Bogotá, destacando o papel de atores judiciais e sociais no processo de planejamento urbano.	Estudo de caso qualitativo com base em análise documental, revisão de decisões judiciais e entrevistas com atores institucionais e membros da sociedade civil envolvidos no debate sobre o corredor TM7.
Guzmán *et al*. (2021)	Estimar a elasticidade-preço da demanda por transporte público no sistema TransMilenio, com foco nas variações de comportamento entre diferentes grupos de renda.	Aplicação de modelos econométricos de elasticidade-preço com base em dados de bilhetagem eletrônica e informações socioeconômicas georreferenciadas, usando séries temporais e segmentação espacial para análise diferenciada da sensibilidade à tarifa.
Guzmán *et al*. (2021)	Avaliar o impacto do TransMilenio sobre o valor dos imóveis residenciais em Bogotá, com foco em como esses efeitos variam conforme o perfil socioeconômico dos bairros.	Aplicação do método de pareamento *Coarsened Exact Matching* (CEM) em dados cadastrais transversais detalhados para estimar os efeitos do TransMilenio sobre o valor de terrenos residenciais, considerando a heterogeneidade dos impactos conforme renda, localização e características físicas dos bairros.
Kash (2020)	Investigar como barreiras institucionais dificultam a incorporação de uma perspectiva de gênero no planejamento do transporte público, com foco no sistema TransMilenio de Bogotá.	Estudo de caso qualitativo com análise documental, observação em campo e entrevistas com planejadores, gestores e usuários do TransMilenio, examinando práticas institucionais e normativas que perpetuam a negligência frente ao assédio sexual no transporte.
Epting (2016)	Propor o princípio da "Democracia no Transporte" a partir do caso do TransMilenio, defendendo um planejamento urbano mais justo e participativo.	Análise teórica e normativa com base em revisão de literatura e casos do TransMilenio, utilizando argumentos filosóficos sobre justiça restaurativa e equidade no acesso à mobilidade.
Combs (2014)	Analisar o impacto da implantação do TransMilenio na posse de veículos em Bogotá, considerando o papel da forma urbana na efetividade dos investimentos em BRT.	Aplicação de um modelo de diferenças-em-diferenças com dados de domicílios, combinando indicadores de acesso ao TransMilenio e características da forma urbana para estimar efeitos na probabilidade de aquisição de veículos.
Bocarejo *et al*. (2013)	Avaliar os impactos do sistema BRT TransMilenio na densidade populacional, uso e valor do solo urbano em Bogotá ao longo de uma década.	Aplicação de análise de diferenças-em-diferenças (*difference-in-differences*) combinada com análise espacial (*hot spot analysis*) em dados de densidade, área construída e valores imobiliários, utilizando como grupos de comparação as zonas com e sem acesso ao TransMilenio.

Autores/Ano	Objetivo	Metodologia
Heres *et al*. (2013)	Avaliar se a implantação do TransMilenio em Bogotá teve impacto sobre a renda dos moradores de bairros próximos às estações do sistema BRT.	Combinação de regressão linear com microdados da pesquisa de mercado de trabalho e análise espacial com mapas em GIS para estimar o impacto da proximidade ao TransMilenio na renda dos moradores, controlando variáveis socioeconômicas e características dos bairros.
Leiva *et al*. (2010)	Avaliação operacional do BRT em Santiago	O artigo utiliza modelagem matemática em AMPL com solução via MINOS e heurísticas iterativas para otimizar a rede de BRT considerando transferências e restrições de capacidade.
Caicedo (2010)	Desenvolver um modelo de otimização para sistemas BRT, integrando parâmetros de transporte (demanda, frequência, tamanho dos ônibus) com o desempenho mecânico e ciclo de vida de pavimentos asfálticos, aplicado ao caso do TransMilenio em Bogotá.	Formulação de um modelo estocástico de programação não linear que integra variáveis operacionais do BRT (frequência, demanda, tamanho dos ônibus) com o desempenho mecânico e o ciclo de vida de pavimentos, aplicado ao TransMilenio por meio de simulações computacionais.

A análise sistemática desses artigos permitiu identificar quatro eixos principais de abordagem: infraestrutura e segurança viária, governança e participação social, impactos socioeconômicos e otimização operacional. No primeiro eixo, destaca-se o estudo de García *et al.* (2024), que utilizou modelos binomiais negativos multivariados para comparar a segurança viária entre corredores BRT, BHLS e vias arteriais, evidenciando melhor desempenho do BRT em colisões menos graves. Em governança, os trabalhos de Montero & Sotomayor (2024) e Kash (2020) revelam a importância da participação social e das questões de gênero no planejamento, apontando falhas institucionais e disputas no processo decisório.

A maior parte dos estudos foca em impactos socioeconômicos. Heres *et al*. (2013) e Combs (2014) analisam os efeitos do TransMilenio sobre renda e posse de veículos, enquanto Guzmán *et al.* (2021) investigam elasticidade tarifária e valorização fundiária, com destaque para os impactos diferenciados por classe social. Bocarejo *et al*. (2013) exploram as transformações no uso e valor do solo, e Caicedo (2010) integra variáveis operacionais com desempenho de pavimentos.

Por fim, no campo da otimização, Leiva *et al*. (2010) propõem uma modelagem matemática para melhorar o desempenho do BRT em Santiago, com foco em capacidade e frequência. Os estudos evidenciam uma predominância de métodos quantitativos e análises de impacto, com menor presença de abordagens voltadas à governança integrada. Isso indica a necessidade de aprofundar pesquisas que considerem os aspectos institucionais e sociais no planejamento de sistemas BRT.

4. CONCLUSÃO

Este estudo sobre o TransMilenio de Bogotá evidencia que os sistemas BRT, embora tecnicamente eficientes, estão inseridos em dinâmicas urbanas complexas, onde fatores institucionais, sociais e territoriais desempenham papel central em seus resultados. Os estudos analisados demonstram que os impactos do BRT vão além da mobilidade, afetando a renda, o valor fundiário, o acesso à cidade e até a segurança viária, onde muitas vezes se apresentam de maneira desigual entre os grupos sociais e territórios urbanos.

Observou-se uma predominância de abordagens quantitativas voltadas à avaliação de impacto, como modelagens estatísticas, análises espaciais e econométricas. No entanto, trabalhos que exploram a governança, a justiça social, o papel das instituições e a participação cidadã ainda são minoria, embora se revelem essenciais para compreender os desafios reais enfrentados na implementação desses sistemas. A experiência de Bogotá mostra que o sucesso de um BRT depende da infraestrutura física, da capacidade técnica e da construção de consensos políticos, da articulação interinstitucional e da incorporação ativa das demandas da sociedade civil.

Todavia, é válido destacar que a presente revisão apresenta limitações metodológicas, dentre elas se destaca que a busca se restringiu à base Scopus e a artigos publicados em inglês e espanhol, o que pode ter excluído estudos relevantes em outras línguas ou até mesmo relatórios técnicos e documentos institucionais.

A difusão do TransMilenio como referência técnica impulsionou a adoção do BRT em várias cidades da América Latina, no entanto, a sua replicação sem adaptações institucionais, sociais e territoriais adequadas gerou limitações. No Brasil, o BRT do Rio de Janeiro sofreu com falhas de integração, manutenção precária e

governança fragmentada; o Via Livre, em Recife, foi impactado pela descontinuidade institucional; e em Belo Horizonte e Goiânia, a sobrecarga operacional e a falta de integração metropolitana reduziram a efetividade dos corredores. Portanto, a replicação descontextualizada, aliada a estruturas de governança frágeis e a ausência de integração dos modos de transportes, comprometeu a efetividade de muito dos projetos, demonstrando que BRT não é uma solução única, devendo ser moldado às realidades locais.

Dessa forma, este artigo reforça a importância de uma abordagem integrada e multidisciplinar no planejamento de sistemas BRT na América Latina, que leve em conta sua eficiência operacional, os impactos sociais e territoriais. Para planejamento de transportes futuros, sugere-se também levar em consideração análises sobre arranjos institucionais, mecanismos de financiamento, gestão metropolitana e inclusão social, de modo a fortalecer a capacidade das cidades latino-americanas de desenvolver soluções de mobilidade mais sustentáveis e equitativas. Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se aplicar os métodos analisados em realidades de sistemas de BRT brasileiros.

REFERÊNCIAS

Bocarejo, J. P.; I. Portilla e M. A. Pérez (2013) Impact of Transmilenio on density, land use, and land value in Bogotá. *Research in Transportation Economics*, v. 40, p. 78-86. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.030.

Caicedo, B.; M. Ocampo e M. Sanchez-Silva (2010) An integrated method to optimise the infrastructure costs of bus rapid transit systems. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, v. 8, n. 11, p. 1017-1033. DOI: dx.doi.org/10.1080/15732479.2010.499951.

Cervero, R. (2013). *Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport*. UC Berkeley: Institute of Urban and Regional Development. Disponível em: escholarship.org/uc/item/4sn2f5wc (acesso em: 10/07/2025).

Combs, T. S. e D. A. Rodríguez (2014) Joint impacts of Bus Rapid Transit and urban form on vehicle ownership: New evidence from a quasi-longitudinal analysis in Bogotá, Colombia. *Transportation Research Part A*, v. 69, p. 272-285. DOI: doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.025.

Epting, S. (2016) The Peñalosa Principle of Transportation Democracy: Lessons from Bogotá on the Morality of Urban Mobility. *Science and Engineering Ethics*, v. 23, p. 1085–1096. DOI: doi.org/10.1007/s11948-016-9839-1.

Escobar, F. J. P (2013) *Optimización de Sistemas BRT: TransMilenio*. Dissertação (mestrado). Máster Universitario en Inteligencia Artificial, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. Disponível em: melqkiades.github.io/files/download/thesis/msc-thesis.pdf (acesso em: 28/06/2025).

Garcia, J. A.; C. G. Lizarazo; S. C. Mangones; L. A. Bulla-Cruz e E. Darghan (2024) Safety performance of dedicated and preferential bus lanes using multivariate negative binomial models for Bogotá, Colombia. *Accident Analysis and Prevention*, v. 202, p. 107595. DOI: doi.org/10.1016/j.aap.2024.107595.

Guzman, L. A.; C. Beltran; J. A. Bonilla e S. G. Cardona (2021) BRT fare elasticities from smartcard data: Spatial and time-of-the-day differences. *Transportation Research Part A*, v. 150, p. 335-348. DOI: doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.018.

Guzman, L. A.; H. D. Enríquez e P. Hessel (2021) BRT system in Bogotá and urban effects: More residential land premiums? *Research in Transportation Economics*, v. 90, p. 101039. DOI: doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101039.

Heres, D. R.; D. Jack e D. Salon (2013) Do public transport investments promote urban economic development? Evidence from bus rapid transit in Bogotá, Colombia. *Transportation*, v. 41, p. 57–74. DOI: doi.org/10.1007/s11116-013-9471-8.

ITDP (2017) *The BRT Planning Guide*. Institute for Transportation and Development Policy. 4ª ed. Disponível em: brtguide.itdp.org/branch/master/guide/pdf/the-brt-planning-guide.pdf (acesso em 29/06/2025).

Kash, G. (2020) Transportation professionals' visions of transit sexual assault: The problem of deproblematizing beliefs. *Transportation Research Part A*, v. 139, p. 200-216. DOI: doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.023.

Leiva, C.; J. C. Munoz; R. Giesen e H. Larrain (2010) Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transportation Research Part B*, v. 44, p. 1186–1201. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.trb.2010.01.003.

Moher, D.; A. Liberati; J. Tetzlaff, J. e D. G. Altman (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, v. 8, n. 5, p. 336-341. DOI: 10.1016/j.ijsu.2010.02.007.

Montero, S. e L. Sotomayor (2024) Judicialización y política urbana: Ciudadanos, políticos y jueces en la suspensión de Transmilenio por la Séptima en Bogotá. *Revista EURE - Revista De Estudios Urbano Regionales*, v. 50, n. 149, p. 1-20. DOI: doi.org/10.7764/EURE.50.149.05.

Gabriela Lopes Martins (gabriela.glm@ufpe.br)*; Letícia Gabrielle Barbosa de Oliveira* (leticia.boliveira@ufpe.br); *Leonardo Herszon Meira* (leonardo.meira@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

TELETRABALHO, MOBILIDADE URBANA E QUALIDADE DE VIDA: EVIDÊNCIAS DO CONTEXTO BRASILEIRO

Laryssa de Andrade Mairinque[1], **Robson Bruno Dutra Pereira**[2], **Josiane Palma Lima**[1]
[1]Universidade Federal de Itajubá, [2]Universidade Federal de São João del Rei

RESUMO
Este estudo investigou as relações entre regime de trabalho, mobilidade urbana e qualidade de vida. A coleta de dados foi realizada por meio de um questionário elaborado com base no modelo conceitual desenvolvido pelos autores, e aplicado utilizando a técnica de amostragem por bola de neve. Após as etapas de limpeza e tratamento dos dados, foram conduzidas análises descritivas e inferenciais, incluindo tabelas de contingência, gráficos do tipo *balloon plot* e *boxplot*, além de testes de hipóteses apropriados. Os resultados indicaram que pessoas em teletrabalho apresentam, em média, menor tempo gasto com deslocamentos diários em comparação aos demais regimes, diferença estatisticamente significativa em relação ao regime híbrido. Além disso, indivíduos em teletrabalho relataram maior satisfação com a qualidade de vida e maior frequência de atividades físicas. Esses resultados reforçam o potencial do teletrabalho como aliado de uma mobilidade urbana mais sustentável e de políticas voltadas ao bem-estar da população.

Palavras-chaves: Teletrabalho, Qualidade de vida, Mobilidade Urbana.

1. INTRODUÇÃO

Com o progresso das tecnologias digitais, o trabalho deixou de estar totalmente atrelado a um espaço físico específico, permitindo sua execução de forma cada vez mais descentralizada. O teletrabalho, entendido como a prática laboral realizada fora do ambiente tradicional, tem ganhado espaço nos últimos anos e apresenta potencial para alterar padrões de deslocamento urbano, reduzir externalidades negativas da mobilidade e promover melhorias na qualidade de vida dos trabalhadores (ILO, 2020; Mouratidis & Peters, 2022).

Ao substituir deslocamentos físicos por interações virtuais, o teletrabalho pode ser considerado uma alternativa sustentável de mobilidade. Essa mudança é especialmente relevante do ponto de vista ambiental, pois contribui para a redução de viagens motorizadas e pode estimular o uso de modos de transporte ativos (Martens & Korver, 2000). No entanto, os impactos do teletrabalho sobre a mobilidade urbana não são unilaterais. A flexibilização espacial pode favorecer padrões residenciais dispersos, aumentando a dependência do automóvel para outras atividades cotidianas (Adobati & Debernardi, 2022; Lemos *et al*., 2021).

Além das questões territoriais e de transporte, o teletrabalho afeta diretamente a gestão do tempo, a organização da rotina e a percepção de bem-estar dos indivíduos. Estudos indicam que trabalhadores remotos relatam maior equilíbrio entre vida pessoal e profissional, bem como maior envolvimento em atividades físicas e domésticas (He & Hu, 2015; Erdoğdu & Watson, 2023). Essas relações destacam a importância de compreender o teletrabalho sob uma perspectiva integrada, considerando fatores socioeconômicos, locacionais e comportamentais.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo investigar as possíveis relações entre o regime de trabalho, a mobilidade urbana e a qualidade de vida. Por meio da aplicação de um questionário estruturado e da realização de análises estatísticas descritivas e inferenciais, busca-se contribuir para o debate sobre os impactos do teletrabalho na dinâmica urbana e no bem-estar da população. Compreender essas relações pode reforçar o potencial do teletrabalho como uma estratégia para a promoção de uma mobilidade urbana mais sustentável e para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade de vida e ao bem-estar social.

2. METODOLOGIA

Com o objetivo de investigar as possíveis relações entre o regime de trabalho, a mobilidade urbana e a qualidade de vida, a metodologia adotada — conforme ilustrado na Figura 1 — teve início com a realização de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), voltada à identificação das principais variáveis relacionadas ao teletrabalho. A partir dessa revisão, foi desenvolvido um modelo conceitual que orientou a construção do questionário aplicado na etapa de coleta de dados. O questionário foi distribuído inicialmente para contatos dos pesquisadores e divulgado em mídias digitais e e-mails. Utilizou-se a técnica de amostragem bola de neve, que permite alcançar participantes com características específicas de forma encadeada (Noy, 2008). Essa abordagem, já empregada em estudos semelhantes no contexto da pandemia (Junior *et al*., 2024), mostrou-se adequada ao objetivo dessa pesquisa. Como resultado, foram obtidas 179 respostas, das quais 168 observações atenderam aos critérios de inclusão e foram consideradas válidas para as análises. Por se tratar de uma

amostragem não probabilística, os resultados não podem ser generalizados para toda a população, embora ofereçam evidências relevantes sobre as relações entre regime de trabalho, mobilidade urbana e qualidade de vida. As análises estatísticas, bem como as etapas de manipulação e visualização dos dados, foram conduzidas na linguagem de programação R. Após a importação do banco de dados em formato CSV, realizou-se a limpeza e o pré-processamento dos dados. Os dados foram filtrados e preparados considerando apenas os participantes que estavam ativos no mercado de trabalho no momento da pesquisa, garantindo que as informações analisadas fossem relevantes para os objetivos do estudo.



Figura 1: Etapas de trabalho

Em seguida, foram construídas tabelas de contingência para investigar a associação entre o regime de trabalho e as variáveis categóricas selecionadas para esse estudo, como qualidade de vida, satisfação com o regime de trabalho adotado, frequência de atividades físicas, frequência de atividades de lazer, gênero e modo de transporte mais utilizado. Para facilitar a interpretação dos resultados, essas associações foram visualizadas por meio de gráficos do tipo *balloon plot*, que destacam as distribuições e proporções relativas entre os grupos. De forma complementar, aplicou-se o teste do qui-quadrado, com o objetivo de verificar se há associação estatisticamente significativa entre os pares de variáveis categóricas analisadas. Por fim, analisou-se a variável referente ao tempo de deslocamento até a atividade presencial mais frequente realizada pelos respondentes durante a semana, em função do regime de trabalho adotado. Para essa comparação, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, recomendado para avaliar diferenças entre mais de dois grupos independentes quando as premissas de normalidade não são atendidas (Hollander & Wolfe, 1973). Esse teste verificou se há diferenças significativas entre as distribuições dos tempos de deslocamento conforme o regime de trabalho.

3. RESULTADOS

Com base nas análises realizadas, foi possível identificar relações relevantes entre o regime de trabalho adotado pelos participantes e variáveis associadas à qualidade de vida e à mobilidade. A Figura 2 apresenta os *balloon plots* correspondentes às tabelas de contingência, e também os resultados dos testes de Qui-quadrado para as variáveis categóricas analisadas. Embora a variável referente à percepção da qualidade de vida do respondente, não tenha apresentado significância estatística no teste qui-quadrado (valor de $p > 0,05$), algumas análises podem ser extraídas do gráfico. Observa-se que a maioria dos respondentes avalia sua qualidade de vida como "Boa", independentemente do regime de trabalho. No entanto, o grupo em teletrabalho se destaca por concentrar percepções mais positivas (sem registros de avaliações "Ruim"), enquanto o regime presencial apresenta maior variabilidade nas respostas, inclusive com percepções negativas. Esses resultados sugerem que o regime de trabalho pode influenciar a percepção de qualidade de vida dos participantes, mesmo que a diferença entre os grupos não tenha sido estatisticamente significativa.

Para a variável relacionada à satisfação com o regime de trabalho, o teste Qui-quadrado indicou significância estatística, evidenciando associação entre o tipo de regime e o nível de satisfação dos participantes. A análise do gráfico *balloon plot* reforça esse resultado, mostrando que os trabalhadores em teletrabalho concentram suas respostas em níveis mais altos de satisfação (“satisfeito” e “muito satisfeito”), sem registros de insatisfação. O regime híbrido também apresenta predominância de avaliações positivas. Em contraste, o regime presencial exibe maior dispersão nas respostas, incluindo níveis de insatisfação e indiferença, o que pode sugerir menor uniformidade na percepção de satisfação entre os trabalhadores que atuam presencialmente. Esses achados reforçam que o teletrabalho, ao proporcionar maior flexibilidade de horário

(Asgari *et al*., 2014) e reduzir a necessidade de deslocamentos diários, pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida dos trabalhadores, assim como para o aumento da satisfação com o próprio trabalho.

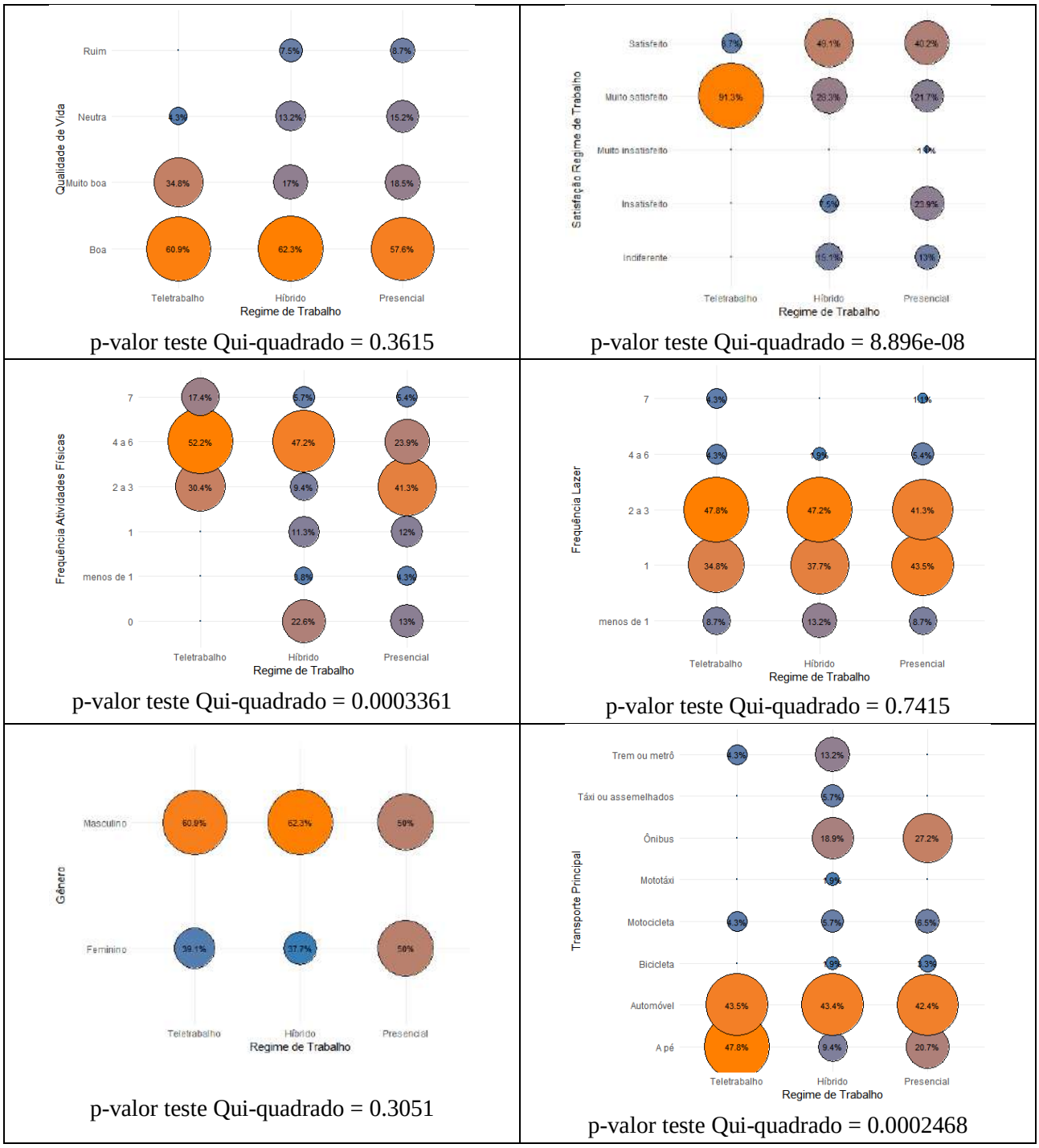


Figura 2: Relação entre o regime de trabalho e variáveis de qualidade de vida, e transporte

Foi observada uma relação estatisticamente significativa entre o regime de trabalho e a frequência de prática de atividades físicas ($p < 0{,}001$). O regime híbrido apresentou maior concentração de participantes que realizam atividades físicas com frequência de 4 a 6 vezes por semana, enquanto o regime presencial destacou-se pela frequência de 2 a 3 vezes semanais. Já o teletrabalho mostrou uma distribuição mais equilibrada, com menor ocorrência de inatividade física, o que pode indicar mais oportunidades para a pratica de atividades físicas. Não foi identificada associação estatisticamente significativa entre o regime de trabalho e a frequência de atividades de lazer ($p \approx 0{,}74$). As respostas concentraram-se predominantemente entre 1 e 3 vezes por semana, sem padrões marcantes que indiquem maior ou menor acesso ao lazer com base no regime de trabalho.

O teste qui-quadrado para a associação entre gênero e regime de trabalho resultou em um p-valor de 0,3051, indicando ausência de associação estatisticamente significativa. No entanto, observa-se que, nos regimes de trabalho remoto e híbrido, há uma maior concentração de homens.

Por fim, para a análise entre modo de transporte e regime de trabalho, observa-se pelo gráfico que o automóvel é o meio de transporte predominante entre os participantes em todos os regimes, especialmente no regime presencial. Já o uso de transporte público, como ônibus, metrô e táxi, concentra-se principalmente entre os trabalhadores presenciais e híbridos, enquanto no teletrabalho esses modos são praticamente inexistentes. O teste qui-quadrado resultou em um p-valor de 0,0002, indicando uma associação estatisticamente significativa entre o regime de trabalho e o principal modo de transporte. Isso reforça que o regime de trabalho influencia diretamente o meio de transporte utilizado, com o teletrabalho reduzindo a dependência de deslocamentos. Esses achados estão alinhados com o estudo de López Soler *et al*. (2021), que identificou o carro como o principal meio de transporte tanto para teletrabalhadores quanto para não teletrabalhadores, destacando ainda que o uso do ônibus é mais comum entre os não teletrabalhadores.

Posteriormente, analisou-se a distribuição do tempo de deslocamento até a atividade presencial mais frequente em função do regime de trabalho, utilizando-se *boxplots* (Figura 3). A visualização revela diferenças claras entre os grupos, trabalhadores em regime de teletrabalho apresentam os menores tempos de deslocamento, com baixa dispersão e ausência de valores extremos elevados. Já aqueles em regime híbrido possuem a maior mediana de deslocamento, além de apresentarem grande variabilidade e presença de *outlier*s, indicando casos com deslocamentos bastante longos. O regime presencial também apresenta variabilidade considerável, com uma mediana intermediária e vários valores extremos, sugerindo que parte dos trabalhadores presenciais enfrenta deslocamentos prolongados. Os resultados apresentados na Figura 3 indicam que o regime de trabalho exerce influência direta sobre o tempo gasto com deslocamentos, sendo o modelo híbrido o que apresenta maior heterogeneidade. Adobati *et al*. (2022) apontam que o teletrabalho geralmente ocorre em contextos com maior distância entre residência e trabalho, aumentando o uso do automóvel para outras viagens. Nesse sentido, no regime híbrido, essa dispersão espacial tende a elevar o tempo total de deslocamento, devido à combinação entre dias de trabalho presencial e remoto. Para confirmar se o tempo de deslocamento para a atividade principal difere de acordo com o regime de trabalho, foram realizados testes de hipótese.

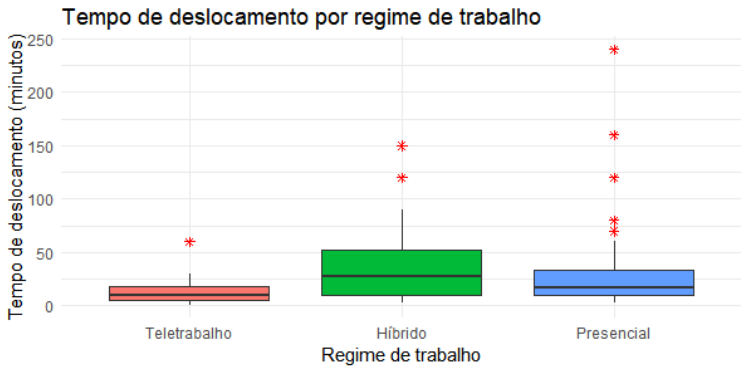


Figura 3: Distribuição do tempo de deslocamento para a atividade principal por regime de trabalho

Inicialmente, os testes de normalidade Shapiro-Wilk indicaram que os dados não seguem distribuição normal para nenhum dos regimes (teletrabalho: $p < 0,001$; híbrido: $p < 0,001$; presencial: $p < 0,001$). Além disso, o teste de Levene para homogeneidade das variâncias apresentou valor não significativo ($p = 0,083$), sugerindo variâncias relativamente semelhantes entre os grupos. Diante da não normalidade dos dados, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que revelou diferenças estatisticamente significativas no tempo de deslocamento entre os regimes de trabalho ($p = 0,00017$). Comparações pareadas por meio do teste de Wilcoxon mostraram que os tempos de deslocamento no regime híbrido diferem significativamente do teletrabalho ($p = 0,00032$), assim como o regime presencial difere do teletrabalho ($p = 0,00032$). Já a diferença entre os regimes híbrido e presencial não foi estatisticamente significativa ($p = 0,20$). Esses resultados indicam que o tempo de deslocamento para a atividade principal é menor no regime de teletrabalho, enquanto os regimes híbrido e presencial apresentam tempos de deslocamento semelhantes, confirmando a influência do regime de trabalho no padrão de deslocamentos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa destacam que o regime de trabalho impacta significativamente tanto os padrões de deslocamento quanto a percepção e práticas relacionadas à qualidade de vida dos trabalhadores. O teletrabalho mostrou-se associado a menores tempos de deslocamento e maior satisfação quanto ao regime de trabalho, refletindo em potenciais benefícios para o bem-estar dos trabalhadores e redução da pressão sobre os sistemas de transporte urbano. Por outro lado, o regime híbrido, embora ofereça certa flexibilidade, está relacionado a maior variabilidade e tempos mais longos de deslocamento, o que pode representar desafios de mobilidade e impactos ambientais relevantes. A predominância do automóvel, especialmente entre os trabalhadores presenciais e híbridos, reforça a necessidade de políticas públicas que incentivem modais mais sustentáveis e a reorganização espacial das cidades para reduzir distâncias. Socialmente, os resultados indicam que a adoção de regimes de trabalho flexíveis pode contribuir para melhorar a qualidade de vida e a saúde, estimulando maior prática de atividades físicas, o que é fundamental para a promoção de uma população mais saudável e produtiva. Portanto, as mudanças nos regimes de trabalho, aliadas a estratégias integradas de mobilidade urbana, têm o potencial de gerar impactos positivos tanto para os indivíduos quanto para as cidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adobati, F. e Debernardi, A. (2022) The breath of the metropolis: Smart working and new urban geographies. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Sustainability. Basel: MDPI, p. 1028.

Asgari, H., Jin, X. e Mohseni, A. (2014) Choice, frequency, and engagement: Framework for telecommuting behavior analysis and modeling. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Transportation Research Record. Los Angeles, CA: SAGE Publications, p. 101–109.

Drucker, J. (2000) The propensity to telework: A logistic analysis. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Urban Studies. London: SAGE Publications, p. 1319–1340.

Erdoğdu, A. İ. e Watson, F. (2023) Millennials' changing mobility preferences: A telecommuting case in Istanbul. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Journal of Consumer Behaviour. Hoboken: Wiley Online Library, p. 483–495.

He, S. Y. e Hu, L. (2015) Telecommuting, income, and out-of-home activities. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Travel Behaviour and Society. Amsterdam: Elsevier, p. 131–147.

Hollander, M. e Wolfe, D. A. (1973) Nonparametric statistical methods. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Nonparametric statistical methods. New York: John Wiley & Sons, p. 115–120.

ILO (2020) Guidance for labour statistics data collection: Defining and measuring remote work, telework, work at home and home-based work. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) ILO Labour Statistics Guidelines. Geneva: ILO, p. 12–18.

Ismail, A. e Bakri, M. H. (2012) Telecommuting and flexible work arrangements in Malaysia: Benefits and disadvantages. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Journal of Applied Sciences Research. Kuala Lumpur: Science Publications, p. 3830–3833.

Junior, J. U. P. e Pitombo, C. S. (2024) Unveiling substitution patterns of work trips by teleworking and their associations with physical and virtual accessibility in the Brazilian COVID-19 crisis. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Travel Behaviour and Society. Amsterdam: Elsevier, p. 100657.

Martens, M. e Korver, W. (2000) Forecasting and assessing the mobility effects of teleservices: Scenario approach. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Transportation Research Record. Los Angeles, CA: SAGE Publications, p. 118–125.

Mouratidis, K. e Peters, S. (2022) COVID-19 impact on teleactivities: Role of built environment and implications for mobility. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Transportation Research Part A: Policy and Practice. Amsterdam: Elsevier, p. 251–270.

Noy, C. (2008) Sampling knowledge: The hermeneutics of snowball sampling in qualitative research. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) International Journal of Social Research Methodology. London: Taylor & Francis, p. 327–344.

Soler, J. R. L., Christidis, P. e Vassallo, J. M. (2021) Teleworking and online shopping: Socio-economic factors affecting their impact on transport demand. In: Abreu Jr., A. e Botelho Neto, B. (eds.) Sustainability. Basel: MDPI, p. 7211.

TRANSPORTE COMO ELO INTEGRADOR DA ECONOMIA: ANÁLISE DE REDE DAS RELAÇÕES INTERSETORIAIS DE POSSE-GO

Rafael Oliveira[1], **João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos**[1], **Marcos Paulo de Assis Teixeira Nonato**[1], **Marcos Thadeu Magalhães**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
O artigo ilustra as relações intersetoriais do setor de transporte, destacando sua função como elo central na economia local. A análise evidencia que o transporte mantém conexões diretas com praticamente todos os demais setores econômicos, representados por nós de diferentes tamanhos e cores, que indicam o volume de interações e a diversidade das atividades. Setores como Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca, Fabricação e refino de açúcar, Fabricação de produtos do fumo, Fabricação de artefatos de couro, Fabricação de celulose, Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos aparecem fortemente ligados ao transporte, demonstrando dependência tanto para o recebimento de insumos quanto para a distribuição de produtos. A disposição dos nós e a densidade das linhas reforçam que o transporte é a principal infraestrutura de integração produtiva e comercial do município, viabilizando o funcionamento eficiente das cadeias produtivas e a circulação de bens e serviços.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma compreensão das relações entre os diferentes setores econômicos de um município é importante para o planejamento e desenvolvimento local, principalmente em cidades pequenas, cuja economia é baseada na integração de atividades produtivas, comerciais e serviços. Nesse processo, o sistema de transporte rodoviário surge como um facilitador do movimento da produção agrícola, de forma a permitir a circulação de mercadorias e pessoas. Compreender e avaliar a relação entre o transporte e outros setores é fundamental para orientar políticas e investimentos específicos para aumentar a eficiência econômica e a competitividade regional.

O estudo das inter-relações entre setores é teoricamente baseado na teoria da Análise de Insumo-Produto, originada por Wassily Leontief. Essa estratégia nos fornece uma maneira de ver a economia como uma rede de fluxos de bens e serviços: cada indústria depende de insumos fornecidos por outro setor e, ao mesmo tempo, satisfaz as demandas de outras indústrias. A matriz de insumo-produto de Leontief demonstra a interdependência das atividades econômicas; indicar que uma mudança em qualquer setor da economia pode ter efeitos multiplicadores, diretos e diretamente, na estrutura produtiva. O modelo de Leontief é amplamente utilizado em pesquisas de estrutura industrial, planejamento econômico e desenvolvimento regional e é particularmente útil para identificar setores-chave da economia local (Leontief, 1986). Para avaliar de forma ordenada e objetiva as atividades econômicas em uma cidade, utilizamos o Sistema Nacional de Classificação de Atividades Econômicas (CNAE). Este é um sistema normatizado que permite a identificação, agrupamento e análise de empresas e suas atividades de acordo com semelhanças baseadas em critérios produtivos, tecnológicos e específicos de uso. O CNAE é organizado em cinco níveis hierárquicos: divisões, grupos, classes e categorias, permitindo análises aprofundadas e comparações entre grupos da economia. Esta padronização é uma base para compilar e divulgar estatísticas econômicas e outros programas estatísticos para analisar os vínculos intersetoriais e estudar a cadeia produtiva local entre setores (IBGE, 2007).

Nesse contexto, o presente trabalho pretende analisar quais são os vínculos do setor de transporte rodoviário com outros setores econômicos da economia, utilizando a técnica de análise de redes baseada na classificação CNAE e na ferramenta *Mipsystem* desenvolvida por Nectere. Isso permitirá o mapeamento das dependências e dos fluxos de apoio entre setores e contribuirá para estratégias de desenvolvimento sustentável do município. Um estudo de caso é realizado na cidade de Posse no estado de Goiás.

2. SETOR DE TRANSPORTE E SUAS CONEXÕES ECONÔMICAS

A contribuição econômica do transporte rodoviário urbano brasileiro excede a parcela total dessa atividade no produto interno bruto (PIB). Embora o transporte represente cerca de 1,4% do PIB, seus impactos podem atingir 29% se considerados os efeitos indiretos e induzidos de outros setores, tendo em vista que o setor proporciona a ligação entre os mercados produtores e consumidores, bem como facilita o fluxo de insumos e produtos dentro do país (Trece, 2020; FGV, 2023; ABTLP, 2025).

Esse tipo de transporte é o meio para mais de 60% das cargas transportadas, sendo vital para a distribuição da produção agrícola e industrial e para abastecer o comércio (ANTT, 2019; ABTLP, 2025). A rodovia é também o principal meio de transporte utilizado pelas empresas que transportam bens até um ponto de exportação: 91,6% de todas as empresas exportadoras no Brasil utilizam rodovias para chegar ao ponto de despacho, destacando as dimensões geográficas do país na logística (CNI, 2018). Outra é sua flexibilidade, agilidade e alcance em regiões remotas, o que torna a integração das regiões e o abastecimento do mercado interno mais eficientes.

O setor de transporte rodoviário também está entre os maiores geradores de empregos no país, empregando diretamente mais de 1,2 milhão de pessoas e o setor criando consistentemente empregos, com saldo positivo de mais de 60 mil empregos apenas em 2024. Esta força de trabalho inclui desde motoristas até profissionais de logística, gestão e manutenção de frotas – e contribui para a inclusão social e desenvolvimento regional. O transporte rodoviário também combina modos de transporte, atuando como interface entre transporte ferroviário, marítimo e aeroportuário, otimizando assim a cadeia logística e limitando os custos operacionais. Essa dependência do transporte rodoviário é maior em cidades de médio porte e áreas rurais, onde o transporte rodoviário é um dos alicerces do crescimento econômico, da integração produtiva e do desenvolvimento da competitividade regional. Essa centralidade do transporte também é confirmada pela matriz de insumos neste estudo, que revela dependência de todos os setores da economia local do transporte, atingindo altos coeficientes nos setores estratégicos. Isso indica que um gargalo ou impulso na indústria causa facilmente efeitos em cadeia na economia, afetando custos, produtividade e entrada no mercado. Existem também desafios, como o processamento de investimentos em infraestrutura e manutenção de rodovias para incorporar o uso de novas tecnologias que permitem que as operações sejam eficientes e sustentáveis. Esses obstáculos devem ser superados para que o transporte rodoviário continue sendo o gerador de integração, desenvolvimento e competitividade no Brasil.

3. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE REDES INTERSETORIAIS BASEADA EM CNAE

Abaixo está uma descrição dos métodos utilizados, estruturados de acordo com o foco do estudo nas ligações do setor de transporte rodoviário:

- Atividades Econômicas Locais: Um levantamento e classificação. A coleta de dados sobre empresas ativas no município foi a primeira etapa, baseada em registros municipais e na RAIS. Todas as atividades econômicas foram incorporadas e codificadas usando a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), a fim de realizar uma padronização e detalhamento para a análise das relações intersetoriais.
- Relações Econômicas do Transporte Rodoviário Mapeadas: Na segunda fase, as ligações entre o setor de transporte rodoviário e outros setores econômicos na cidade são especificadas. Para isso, o software *MIPSystem* foi utilizado, permitindo o mapeamento e a quantificação das relações de apoio, dependência e fluxo entre as atividades econômicas, revelando a força e a direção de cada uma dessas relações.
- Construção e visualização da rede intersetorial: Com base nessas informações processadas, construímos uma rede intersetorial, onde cada nó é um setor econômico local e as arestas são as relações de apoio identificadas. A espessura de cada conexão foi fornecida à intensidade da relação, e a interdependência e o papel do transporte rodoviário na articulação entre as cadeias de produção municipais podem ser visualizados.
- Análise dos Resultados: Esta fase permitiu interpretar os resultados, focando nos setores que mais dependem do transporte para suas operações e na influência do transporte rodoviário na atividade econômica.

4. APLICAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A aplicação da análise de redes intersetoriais foi realizada na cidade de Posse, no estado de Goiás. Posse, situada na região nordeste de Goiás, é um centro regional significativo e uma poderosa capital sub-regional, sendo um fator chave para a dinâmica econômica da região. Tem uma população projetada entre 35 a 40 mil habitantes e a maior população na microrregião de Posse-Campos Belos, com um PIB de R$ 703,6 milhões, com predominância de serviços, seguido pela administração pública, agricultura e indústria (Caravela, 2025;

IBGE, 2019).

Sua economia variada apresenta forte comércio, um setor de serviços competitivo e uma agricultura próspera, com uma infraestrutura empresarial que pode atender às necessidades dos agricultores, pecuaristas e da população local. Localizado na fronteira com a Bahia, a oeste de Posse, aumentou a conexão econômica com o oeste da Bahia, uma das regiões de agronegócio de crescimento mais rápido do país, um ponto estratégico para logística, fluxo de mercadorias e ativado como suporte para o desenvolvimento do agronegócio interestadual (Okara, 2021).

Esta posição geográfica favorável fortalece Posse como uma ponte logística entre Goiás e o oeste da Bahia, contribuindo para aumentar sua importância no desenvolvimento agroindustrial das regiões do Cerrado do Centro-Oeste e Matopiba (Okara, 2021). A figura 1 mostra as relações econômicas do transporte rodoviário em Posse (GO) como um conector estrutural de maneira clara e gráfica.

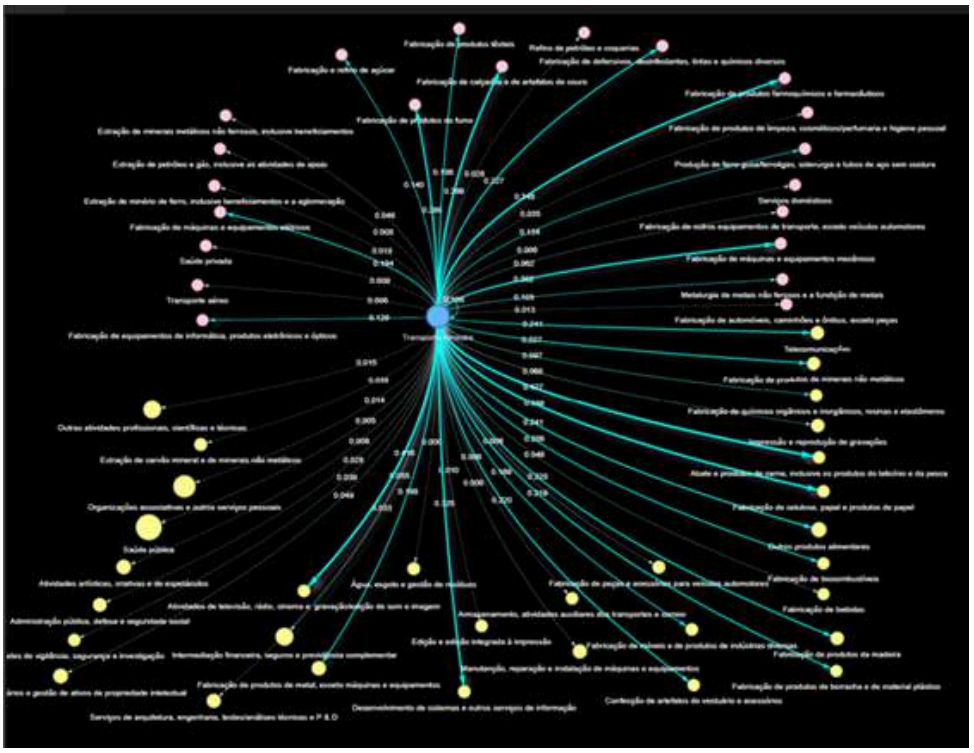


Figura 1: Representação visual das conexões do transporte com outros setores em Posse

Os resultados desta análise são apresentados a seguir, considerando sua função integradora e a dependência dos setores em relação ao transporte.

- Integração a partir do Transporte Rodoviário: A Figura 1 revela que todos os outros setores econômicos do município estão integrados ao setor de transporte rodoviário (nó central na Figura 1, em destaque), que possui ligações com quase todos os outros setores econômicos do município. As múltiplas linhas (arestas) que saem deste nó central ilustram a amplitude das ligações suportadas; isso traz a noção de que o transporte condiciona as dinâmicas produtivas e comerciais de Posse. Nesse sentido, essa configuração visual transmite a dependência sistêmica de outras atividades em relação ao transporte e a posição estratégica influenciada pelo sistema de transporte na forma como a economia local funciona. A Figura ainda demonstra que apesar da inexistência de alguns setores econômicos em Possi (círculo rosa) a relação com transportes existiria com diferentes intensidades.,
- Setores com Maior Dependência: Podem-se notar pelo número de conexões que os setores mais fortemente conectados ao transporte rodoviário são o comércio atacadista e varejista, a agrícola, as pequenas indústrias, os serviços de saúde e a educação. Isso significa que esses segmentos estão fortemente relacionados ao transporte no sentido de receber insumos e distribuir bens e serviços, ou que

estão em consonância com o perfil econômico local, no qual o comércio é a atividade principal e o município opera como um centro regional de abastecimento.

- Intensidade e Diversidade das Relações: As linhas azuis na figura são dimensionados de acordo com o fluxo econômico ou o número de vínculos de relacionamento. As linhas que partem do setor de transporte são mais grossas, indicando um maior impacto nos demais setores. Além disso, a grande quantidade de linhas interconectando os demais setores denota que o transporte é um dos principais elos de integração da matriz e também ilustra que nenhum setor opera isoladamente: a maioria depende diretamente da logística rodoviária para funcionar efetivamente.

Verifica-se que o agronegócio - toda a gama desde a produção agrícola, comércio e processamento de insumos; o comércio de bens de consumo com supermercados, lojas e atacadistas; serviços críticos, incluindo saúde, educação e serviços públicos - todos têm fortes ligações com o setor de transporte para funcionar. Em Posse, o transporte rodoviário não é apenas conectado, mas também sustenta a economia local, sendo essencial ao fluxo de mercadorias, insumos e pessoas. Tal situação é válida para as demandas por políticas públicas que sejam direcionadas à conservação e extensão das rodovias, e ao desenvolvimento de soluções logísticas que garantam a competitividade e o desenvolvimento sustentável do município. Como apresentado na Tabela 1, entre os setores mais impactados destacam-se: (i) Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca - (v1091: 0,4255); (ii) Fabricação e refino de açúcar (v1092: 0,2415); (iii) Fabricação de produtos do fumo - (v1200: 0,2978); (iv) Fabricação de calçados e de artefatos de couro (v1500: 0,3688); (v) Fabricação de celulose, papel e produtos de papel (v1700: 0,3875); (vi) Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos (v2800: 0,3524);

Tabela 1: Matriz de impactos nacionais do setor de Transporte Terrestre sobre os demais setores

Código 67	**Descrição 67**	**v0191**	**v0192**	**v0280**	**v0580**	**v0680**	**v0791**	**v0792**	**v1091**	**v1092**	**v1093**	**v1100**
4900	Transporte Terrestre	0,0030	0,0047	0,0012	0,0378	0,0076	0,0183	0,0455	0,4266	0,1396	0,2415	0,0485
-	**-**	**v1200**	**v1300**	**v1400**	**v1500**	**v1600**	**v1700**	**v1800**	**v1991**	**v1992**	**v2091**	**v2092**
-	-	0,2978	0,1860	0,2204	0,3688	0,2285	0,3875	0,0683	0,0283	0,2058	0,0967	0,2274
-	**-**	**v2093**	**v2100**	**v2200**	**v2300**	**v2491**	**v2492**	**v2500**	**v2600**	**v2700**	**v2800**	**v2991**
-	-	0,0355	0,3455	0,2191	0,2273	0,1341	0,1053	0,1978	0,1292	0,1936	0,3524	0,0135
-	**-**	**v2992**	**v3000**	**v3180**	**v3300**	**v3500**	**v3680**	**v4180**	**v4580**	**v4900**	**v5000**	**v5100**
-	-	0,0064	0,0618	0,1694	0,0060	0,0010	0,0055	0,0031	0,0014	0,1058	0,0018	0,0061
-	**-**	**v5280**	**v5500**	**v5600**	**v5800**	**v5980**	**v6100**	**v6280**	**v6480**	**v6800**	**v6980**	**v7180**
-	-	0,0056	0,0039	0,0042	0,0105	0,4159	0,2409	0,3248	0,0546	0,0034	0,0002	0,0332
-	**-**	**v7380**	**v7700**	**v7880**	**v8000**	**v8400**	**v8591**	**v8592**	**v8692**	**v9080**	**v9480**	**v9700**
-	-	0,0151	0,0489	0,0040	0,0386	0,0284	0,0017	0,0014	0,0093	0,0055	0,0136	0,00

A tabela 1 ilustra o impacto que demonstra quantitativamente que o setor de transporte terrestre (código 4900) é altamente interligado com quase todos os setores econômicos aqui considerados em nível nacional, que pode ser extrapolado para o cenário municipal. Os valores na matriz mostram coeficientes de relacionamento ou a intensidade do impacto do transporte em termos de outros setores, implicando que nenhum setor é independente do transporte e todos os setores têm uma certa dependência, com alguns valores superiores a 0,1 e até mais de 1,0 em alguns setores (Leontief 1986; Guilhoto et al., 2001). Este conseguiu ratificar o transporte como uma infraestrutura estratégica transversal para o funcionamento das cadeias de produção, comércio, agricultura, indústrias e serviços, entre outros. O transporte permite receber insumos e agilizar o produto acabado, além de facilitar a circulação de pessoas e mercadorias, o que é fundamental para a operação dos setores elementares (alimentação, saúde e educação), assim como para setores produtivos e comerciais (ABTLP, 2025; FGV, 2023).

A literatura apoia que o transporte é o que dá vida à economia, sendo o principal elemento de competitividade e desenvolvimento regional. O alto nível de interconexão fornecido na matriz mostra que gargalos, ou ineficiências ou mesmo melhorias no transporte, são rapidamente traduzidos para toda a estrutura econômica local, afetando custos, produtividade e acesso ao mercado. Assim, o transporte não apenas se mantém, mas também promove o desenvolvimento econômico, justificando esforços das políticas

públicas e os investimentos na construção da infraestrutura de transporte (Leontief, 1986; Guilhoto et al., 2001; ABTLP, 2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidencia altamente a posição estratégica estratégica do setor rodoviário nas dinâmicas econômicas (regional, local, nacional). A tabela de resultados indica que o setor de transporte terrestre tem uma forte conexão com praticamente todos os setores econômicos, com um coeficiente de ligação relativamente alto, geralmente acima de 0,1 em muitos benefícios, e muitas vezes muito superior a isso. Com esses dados, temos evidências de que o transporte rodoviário não é apenas articulado, mas também apoia o funcionamento das cadeias produtivas, o fornecimento do comércio, o fluxo da produção agrícola e serviços essenciais como saúde e educação. Além disso, o transporte rodoviário destaca-se como uma das principais fontes de emprego direta e indireta, fomentando a abertura de oportunidades ao longo do processo logístico em termos de manutenção, gestão de frotas, postos de serviço e centros de distribuição. A flexibilidade e o alcance do meio permitem o acesso mesmo às regiões mais remotas e ajudam a minimizar os desequilíbrios entre as regiões e promover a integração territorial e social. Os investimentos em estradas (expansão, modernização, etc.) têm efeitos multiplicadores sobre o PIB e a competitividade de conglomerados, mas também de pequenos empreendedores e produtores rurais. As descobertas ainda sustentam que quaisquer obstáculos ou ganhos obtidos no sistema de transporte são imediatamente transmitidos por toda a estrutura econômica, afetando os custos, a produtividade, a acessibilidade ao mercado e a qualidade de vida das pessoas.

Como resultado, as políticas públicas projetadas para modernizar, manter e expandir a infraestrutura de transporte rodoviário tornam-se primordiais e é um fator essencial para garantir o desenvolvimento sustentável, a resiliência econômica e a competitividade do Brasil em um cenário de integração e dinamismo, cujos níveis estão se elevando cada vez mais nos dias atuais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a empresa Nectere pelo cessão de uso do *Mipsytem* para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTLP. Importância do transporte rodoviário para a economia brasileira. Disponível em: https://www.abtlp.org.br/index.php/importancia-do-transporte-rodoviario-para-economia-brasileira/. Acesso em: mai. 2024.

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Dados do setor de transporte rodoviário de cargas no Brasil. 2019.

CARAVELA. Economia de Posse - GO. Disponível em: https://www.caravela.info/regional/posse---go. Acesso em: 3 jul. 2025.

FGV. Relação entre o transporte rodoviário de carga e PIB pode chegar a 29%, segundo cálculos FGV. Fundação Getulio Vargas, 2023. Disponível em: https://portal.fgv.br/noticias/relacao-entre-transporte-rodoviario-carga-e-pib-pode-chegar-29-segundo-calculos-fgv. Acesso em: mar. 2024.

IBGE. Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2007.

IBGE. Produto Interno Bruto dos Municípios Goianos – 2019. Disponível em: https://goias.gov.br/imb/wp-content/uploads/sites/29/2021/12/pibmun2019-c22.pdf. Acesso em: 3 jul. 2025.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO CENTRO-OESTE (ITCO). Elaboração do Plano Diretor de Posse-GO: Relatório da Leitura Técnica. Posse: Prefeitura Municipal de Posse, 2023. Disponível em: https://itco.org.br/plano-diretor/posse/media/Diagnostico_POSSE_V2.pdf. Acesso em: abril 2024.

IPTC. Instituto Paulista do Transporte de Cargas. Boletim de Conjuntura Econômica – Setembro de 2024.

LEONTIEF, W. Input-Output Economics. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1986.

OKARA. AGRONEGÓCIO E SUAS REPERCUSSÕES NO MATOPIBA. OKARA: Geografia em debate, v. 15, n. 2, p. 173-190, 2021. Disponível em: https://periodicos.ufpb.br/index.php/okara/article/download/58897/35581/182239. Acesso em: 3 jul. 2025.

TRECE, Juliana. O transporte rodoviário de carga é estimado em torno de 1,4 ponto percentual do PIB, analisando as contas nacionais entre 2010 e 2017. In: A importância do modal rodoviário de carga na economia brasileira.

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Rafael Oliveira (rafael@werf.com.br)

Avaliação Socioeconômica de Transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DA REDE DE TRANSPORTES TERRESTRES DO RIO GRANDE DO SUL FRENTE ÀS PROJEÇÕES DO PLANO ESTADUAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES

Giovana Denardi Parcianello, Vinicius da Rosa, Vanessa Teresinha Alves, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Esse estudo realiza uma análise da rede de transportes terrestres do Rio Grande do Sul e, comparando os cenários previstos no plano estadual de logística e transportes do estado (PELT-RS), visa identificar os impactos dos desastres climáticos ocorridos nos últimos anos nas estratégias de intervenção propostas pelo plano. A metodologia consistiu na análise documental do PELT-RS, no levantamento de dados por meios oficiais e na análise geoespacial dos dados obtidos através de softwares de geoprocessamento. Os resultados apontam que as infraestruturas mais afetadas pelos eventos disruptivos e suas consequências também são aquelas com maiores atrasos no desenvolvimento qualitativo e são as responsáveis por interligar as regiões do estado e com a capital. Assim, o estudo revela a precariedade da malha logística, descontinuando operações vitais para a competitividade regional, e um cenário preocupante de distanciamento do modelo multimodal, apontado pelo plano como ideal para o desenvolvimento harmônico do estado.

1. INTRODUÇÃO

Desde 1930, no Brasil, os investimentos em infraestrutura de transportes terrestres foram intensificados através da criação de órgãos de apoio e da priorização das rodovias e ferrovias nas estratégias de desenvolvimento. Durante o governo de Juscelino Kubitschek, entretanto, os interesses econômicos externos e o crescimento da indústria automobilística direcionaram o país para uma política rodoviarista, causando desequilíbrios na matriz de transportes, tanto a nível nacional quanto a nível estadual (Pereira e Lessa, 2011). No Rio Grande do Sul (RS), devido às seguidas crises do modo ferroviário no país, foram implantadas medidas de racionalização da operação ferroviária que acarretaram no fechamento de estações sem receita, na suspensão do tráfego e na erradicação dos ramais considerados antieconômicos (Zillmer e Zibordi, 2016). Com isso, a dependência do transporte rodoviário passou a representar um desafio ao desenvolvimento sustentável do estado. Nesse cenário, tornou-se fundamental planejar e diversificar os modos de locomoção para superar gargalos logísticos e garantir crescimento econômico com equidade regional e menor impacto ambiental, por meio da integração territorial, do escoamento eficiente da produção e da melhoria da mobilidade (Pereira e Lessa, 2011).

Diante disso, em 2014, a Secretaria dos Transportes do Estado do Rio Grande do Sul elaborou o Plano Estadual de Logística e Transporte do Rio Grande do Sul (PELT-RS), com o objetivo de definir a visão de futuro e as estratégias de intervenção no setor dos transportes e da logística para fomentar o crescimento da economia estadual. Para isso, o PELT-RS avaliou a viabilidade econômica da execução de 114 projetos de infraestrutura em dois cenários: o tendencial (priorizando ações no modo rodoviário) e o multimodal (incentivando a maior participação dos modos ferroviário e hidroviário no transporte de cargas). A realização desses projetos foi prevista em um horizonte de estudo compreendido entre os anos 2014 e 2039 e os investimentos totais propostos foram de R$36,8 bilhões. Como resultado, o plano definiu que o cenário que melhor configura o desenvolvimento harmônico do estado é o cenário de base multimodal, que se mostrou robusto mesmo quando submetido a condições extremas no que tange a custos e benefícios (Rio Grande do Sul, 2017).

Entretanto, ao decorrer do período de aplicação do PELT-RS, eventos climáticos extremos abalaram profundamente a rede estadual de transportes terrestres devido aos danos causados à infraestrutura. Em maio de 2024, a chuva intensa gerou pontos de alagamento e desmoronamento no estado, afetando 478 dos 497 municípios gaúchos e impactando mais de 2,4 milhões de pessoas, conforme dados divulgados pela Defesa Civil (Rio Grande do Sul, 2024). Na perspectiva do setor de transportes e logística do RS, em junho de 2024, foram registrados 64 trechos em 33 rodovias com bloqueios totais e parciais, conforme informações do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER, 2024). Além disso, vários trechos de ferrovias também foram interditados neste período em função de alagamentos, deslizamentos e erosões. Em junho de 2025, devido a outro evento climático extremo registrado no estado, alguns dos danos causados às infraestruturas foram agravados e novos pontos de bloqueio surgiram (DAER, 2025a). Assim, o colapso das infraestruturas impacta a rede e gera prejuízos à acessibilidade e à economia estadual (Waldow e Conte Filho, 2022).

Nesse contexto, o presente estudo busca analisar a infraestrutura da rede de transportes terrestres ativa no RS

em 2025 frente às projeções do PELT-RS para o ano de 2024. Sobre um campo de análise mais profundo, o estudo visa identificar os impactos dos desastres climáticos nas estratégias de intervenção propostas pelo plano, mapeando os pontos de bloqueio oriundos desses eventos. Assim, espera-se contribuir para a revisão das propostas de intervenção da rede logística estadual, com foco na resiliência e adaptabilidade da infraestrutura frente a cenários disruptivos.

2. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em 3 etapas principais apresentadas a seguir.

1) Análise documental do PELT-RS. Esta etapa destacou a infraestrutura da rede de transportes do ano base (2014) bem como as intervenções previstas nas malhas rodoviária e ferroviária do estado para os cenários tendencial e multimodal do ano de 2024 (Rio Grande do Sul, 2017). Além disso, buscou reunir informações históricas para contextualização do desenvolvimento do PELT-RS e seus objetivos.
2) Levantamento de dados secundários. Por meio da consulta de fontes oficiais, como o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER, 2025a; DAER, 2025b) e a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2025), foram extraídos dados referentes à atual infraestrutura de transportes terrestres do estado. As informações coletadas englobam a situação (pavimentada, implantada, em pavimentação, duplicada ou em duplicação) das rodovias, a situação das ferrovias (ativa ou inativa), assim como pontos de bloqueio (parcial ou total) oriundos dos eventos climáticos ocorridos em 2024 e 2025.
3) Análise geoespacial. A última etapa metodológica agrupou e espacializou as informações coletadas, através de softwares de geoprocessamento (GIS). Sendo assim, tornou-se possível realizar a análise geoespacial da infraestrutura de transportes terrestres do estado e fazer uma comparação temporal (2014, 2024, 2025) dos dados georreferenciados.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 aborda a relação entre a extensão das rodovias do RS de acordo com a situação (duplicada, em obras de duplicação, em obras de pavimentação, implantada e pavimentada) e o respectivo ano de análise (2014, projeção do PELT-RS para 2024 e real em 2025). Sob essa ótica, demonstra-se que, na projeção de 2024, a extensão das rodovias duplicadas representa 13,41% da extensão total prevista para o ano, enquanto em 2014 a mesma retrata 3,00% das infraestruturas existentes e, em 2025, caracteriza 3,94%. Essa pequena diferença percentual existente entre 2014 e 2025, percebida em todas as situações analisadas, reflete que, embora haja um aumento significativo na densidade da malha rodoviária estadual (superando inclusive a projeção estabelecida pelo PELT-RS para 2024), existe uma estagnação no desenvolvimento qualitativo dessas infraestruturas. Nesse sentido, salienta-se que, ao comparar a extensão de rodovias duplicadas prevista para o ano de 2024 com a existente em 2025, existe uma significativa diferença percentual de -70,33%.

Tabela 1: Relação Situação e extensão da malha rodoviária do RS nos respectivos cenários de análise.

Situação das rodovias	Extensão das rodovias (km)			Comparativo projeção
	Real 2014	Projeção 2024	Real 2025	2024 / real 2025
Duplicada	538,65 (3,00%)	2479,05 (13,55%)	735,60 (3,94%)	-70,33%
Em obras de duplicação	62,36 (0,35%)	43,06 (0,23%)	287,13 (1,54%)	+5,67%
Em obras de pavimentação	1046,78 (5,83%)	1009,34 (5,52%)	1112,09 (5,95%)	+10,18%
Implantada	2336,27 (13,01%)	2315,70 (12,65%)	2248,43 (12,03%)	-2,91%
Pavimentada	13967,61 (77,81%)	12451,74 (68,05%)	14301,39 (76,54%)	+14,85%
Total	17951,67 (100%)	18298,89 (100%)	18684,64 (100%)	+2,11%

Fonte: DAER, (2025b), Rio Grande do Sul, (2017)

De maneira complementar à Tabela 1, a Figura 1, que mostra a representação da malha de transportes terrestres, permitindo a análise geoespacial dos dados coletados, evidencia um atraso significativo na execução dos projetos de infraestrutura rodoviária com previsão de implantação para o ano de 2024. Os maiores atrasos são percebidos nos trechos responsáveis por interligar a região norte (abrangendo municípios como Passo Fundo, Erechim, Frederico Westphalen, Ijuí, Carazinho e Cruz Alta) e a região central (incluindo Santa Maria, Santa Cruz do Sul e Pantano Grande) à capital, Porto Alegre, e ao município (e porto) de Rio Grande, dois importantes polos comerciais do Estado. Ainda, em uma análise mais aprofundada, observa-se que, além do não cumprimento do cronograma das obras de infraestrutura, esses dois grandes eixos rodoviários também

foram severamente impactados pelos eventos climáticos extremos ocorridos em maio de 2024. Nota-se, também, que foi justamente nesses eixos que os danos às infraestruturas já existentes foram agravados e que novos pontos de bloqueio surgiram em decorrência das condições meteorológicas extremas de junho de 2025. Esse cenário evidencia a elevada vulnerabilidade da rede nessas regiões. Assim, parte desses danos ainda compromete o funcionamento da malha, seja de maneira parcial ou total, conforme ilustrado na Figura 1b, afetando diretamente seu desempenho.

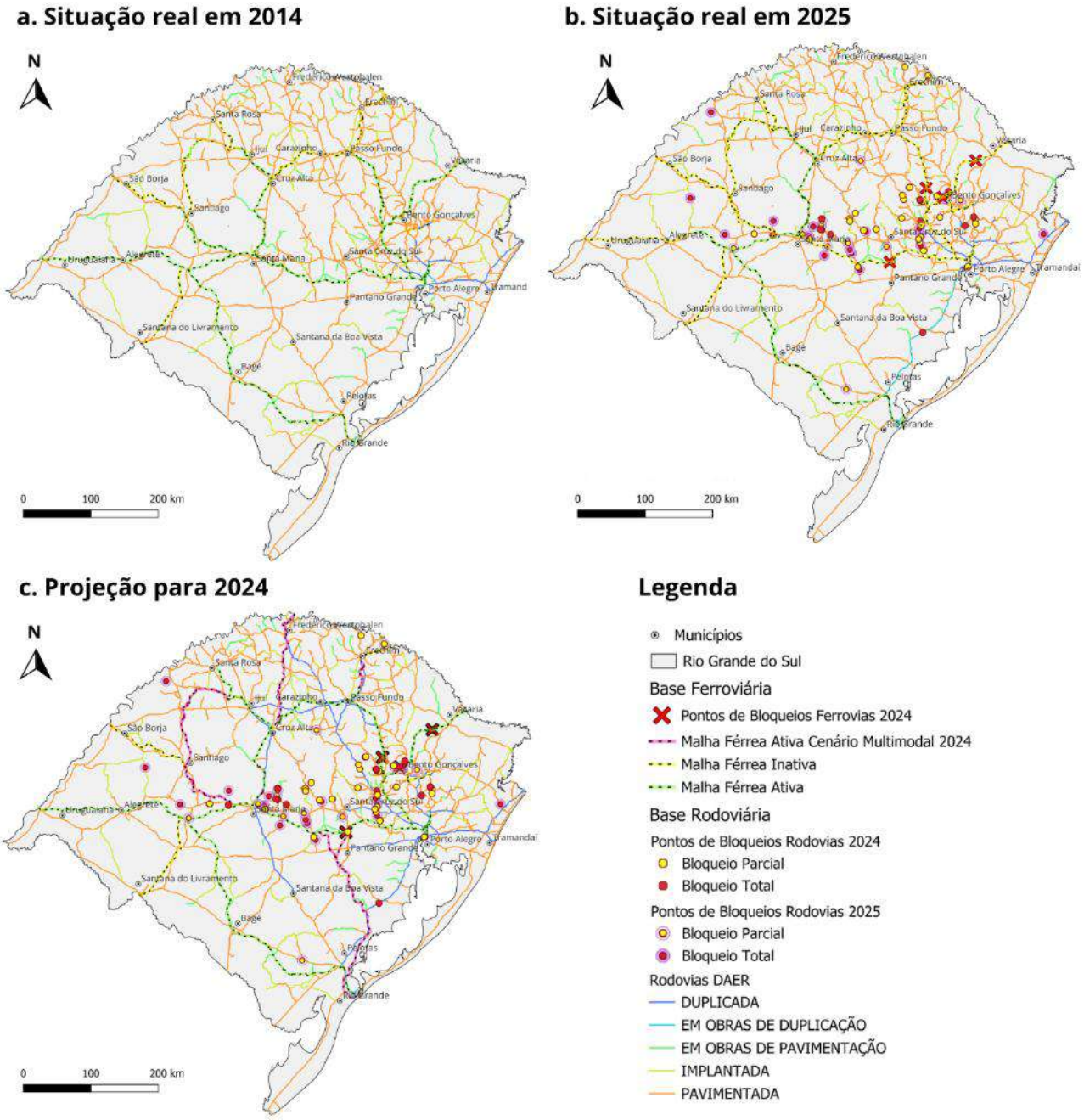


Figura 1: Rede de Transportes Terrestres do RS. Fonte: (DAER, 2025b), (Rio Grande do Sul, 2017)

Na perspectiva do modal ferroviário, percebe-se uma importante perda na malha ferroviária operada ao longo dos últimos 10 anos. Essa redução, que já havia ocorrido com a desativação das linhas que conectam Santa Maria às cidades de Uruguaiana e de Santiago, foi acentuada pelos eventos climáticos ocorridos em 2024. Na ocasião, a conexão ferroviária de Porto Alegre com às Regiões Norte e Central do Estado foi fortemente prejudicada, de modo que permanecem inativas mesmo após um ano completo deste evento, isolando a capital tanto em relação ao restante do país quanto ao próprio estado. Desse modo, a infraestrutura ferroviária ativa

em 2025 representa um recuo em relação ao cenário de 2014, ano que serviu de base para a formulação do PELT-RS. Ademais, quando comparada à projeção para 2024, a realidade de 2025 se mostra ainda mais distante, especialmente no que diz respeito à extensão da malha operada. Isso porque, enquanto o plano previa a ampliação da rede, por meio da reativação de ramais existentes ou da construção de novos trechos, o que se observa é um enfraquecimento do sistema, contrariando as expectativas estabelecidas.

Por fim, salienta-se que, para ambos os modos, as infraestruturas mais afetadas pelos danos oriundos de eventos disruptivos também são aquelas que enfrentam os maiores atrasos no desenvolvimento qualitativo. A exemplo disso, a conexão entre Santa Maria e Porto Alegre, que concentra a maioria dos bloqueios rodoviários, possui lentidão na execução da obra de duplicação da via. Igualmente, no eixo ferroviário, observa-se atraso no aumento de capacidade do trecho entre Porto Alegre e Uruguaiana. No cenário multimodal, destaca-se a inexecução da obra de construção da ferrovia que conectaria o entorno de Pantano Grande ao município de Rio Grande. Assim, um único ponto de bloqueio causado por um evento extremo foi capaz de impedir totalmente o fluxo de cargas via ferrovias entre a capital e o porto de Rio Grande, impactando gravemente a rede e prejudicando a economia. Logo, a partir da análise do atual estágio das intervenções previstas no PELT-RS, revela-se um cenário preocupante de distanciamento do modelo multimodal, apontado como ideal para o desenvolvimento harmônico do estado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de o Plano Estadual de Logística de Transportes (PELT-RS), desenvolvido em 2014, ter estabelecido diretrizes e metas claras para a diversificação e integração dos modos de transporte, observam-se atrasos na execução de projetos e, inclusive, a decadência das infraestruturas ferroviárias ativas. Adicionalmente, eventos disruptivos (como desastres climáticos e suas consequências) têm agravado ainda mais a precariedade da malha logística, comprometendo o funcionamento de trechos essenciais e descontinuando operações que seriam vitais para a competitividade regional. Essa realidade representa um retrocesso à multimodalidade no estado, contrariando diretamente o cenário de desenvolvimento sustentável proposto pelo PELT-RS.

Diante desse cenário, torna-se urgente revisar as intervenções previstas no PELT-RS, considerando a atual condição das infraestruturas. O replanejamento das atuações deve ir além da simples readequação de cronogramas e prioridades, incorporando também os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela nova realidade socioeconômica do estado. A superação dos gargalos logísticos identificados exige uma abordagem estratégica, que integre os diferentes modais e promova infraestruturas mais resilientes, capazes de resistir e se recuperar rapidamente frente a situações de estresse. Assim, a perspectiva futura deve direcionar o Rio Grande do Sul para uma logística eficiente, sustentável e articulada, orientada ao desenvolvimento econômico equilibrado do estado. Nesse contexto, considerando que um novo PELT-RS está em elaboração, recomenda-se a realização de uma avaliação crítica do plano, contemplando cronogramas, prioridades e intervenções atualizadas, bem como sua compatibilidade com os novos desafios e a realidade vigente, de modo a possibilitar a comparação com o plano analisado neste estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processo 305384/2025-2) e da FAPERGS (Processo 24/25510001005-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2025) Painel CNT do transporte: ferroviário. Brasília: CNT. Disponível em: https://www.cnt.org.br/painel-cnttransporte-ferroviario. Acesso em: 21 abr. 2025.

Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) (2024) Mapa interativo da malha rodoviária estadual: Pontos de Bloqueios Totais e Parciais em rodovias Estaduais e Federais: DAER, CRBM. Disponível em: https://daer.rs.gov.br/https-www-google-com-maps-d-u-0-viewer-mid-1zlka-gk8th-wy6mbdeqzltsiwao7q8-g-ep-caescjexljeyni4xmdmyacddyipildk0mja3oda1ldk0m. Acesso em: 3 jun. 2025.

Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) (2025a) Mapa interativo da malha rodoviária estadual: Pontos de Bloqueios Totais e Parciais em rodovias Estaduais e Federais: DAER, CRBM. Disponível em: https://www.daer.rs.gov.br/mapa-atualiza-bloqueios-em-rodovias-do-rs. Acesso em: 20 jun. 2025.

Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) (2025b) Mapas rodoviários. Porto Alegre: DAER. Disponível em: https://www.daer.rs.gov.br/mapas. Acesso em: 29 abr. 2025.

Pereira, L. A. G. e S. N. Lessa (2011) O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no

Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 12, n. 40, p. 26-45. https://doi.org/10.14393/RCG124016414

Rio Grande do Sul (2024) Casa Militar – Defesa Civil. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 29/5, 18h27min. Porto Alegre. Disponível em: https://defesacivil.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-29-5-9h. Acesso em: 10 jun. 2025.

Rio Grande do Sul (2017) Secretaria dos Transportes. Plano Estadual de Logística de Transportes (PELT-RS): relatório final. Porto Alegre: Secretaria dos Transportes. Disponível em: www.transportes.rs.gov.br/upload/arquivos/201902/13120149-relatorio-final.pdf. Acesso em: 21 abr. 2025.

Waldow, I. e C.G.O. Conte Filho (2022) O impacto do investimento público e da infraestrutura nas decisões de investimento privado. *Econ. e Desenv*., v. 34, e2, 2022. https://doi.org/10.5902/1414650971216

Zillmer, R. J. e A. F. G. Zibordi (2016) A questão ferroviária no estado do Rio Grande do Sul. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 5, n. 1, p. 36–69. https://doi.org/10.5902/2236499423928

Giovana Denardi Parcianello (giovana.denardi@acad.ufsm.br)
Vinicius da Rosa (vinicius.rosa@acad.ufsm.br)
Vanessa Teresinha Alves (vanessa.alves@ufsm.br)
Alejandro Ruiz-Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria,
Av. Roraima, n° 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

Avaliação Socioeconômica de Transportes

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

APLICAÇÃO INTEGRADA DOS MÉTODOS AHP E LCCA PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE DE GRANDES PROJETOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO NO RODOANEL DA RMBH

Matheus Guimarães Novais[1], **Victor de Souza Rezende** [2], **Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega**[1,2]
[1] Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, [2] Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
Esta pesquisa propõe um modelo de integração dos métodos AHP e LCCA para subsidiar decisões de investimento em infraestrutura rodoviária, conciliando critérios técnicos, ambientais, sociais e econômicos. O modelo é aplicado ao caso do Rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), com foco na definição de traçados alternativos para os trechos Norte e Oeste. A proposta considera dados geoespaciais, custos de ciclo de vida de pavimentos e um modelo de soma ponderada para hierarquização das alternativas. Resultados preliminares indicam trajetos alternativos distintos dos adotados pelo Governo de Minas Gerais, evidenciando o potencial da abordagem para decisões mais transparentes e sustentáveis.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

A complexidade dos grandes projetos de infraestrutura exige abordagens multicritério para conciliar variáveis técnicas, econômicas e socioambientais. A presente pesquisa busca adaptar e integrar os métodos AHP (Analytic Hierarchy Process com espacializado) e LCCA (Life Cycle Cost Analysis) para avaliação da viabilidade de alternativas de traçado viário. O modelo é aplicado ao Rodoanel Norte e Oeste da RMBH, infraestrutura concedida em regime de PPP, com mais de 70 km de extensão (Figura1).

A análise do ciclo de vida tem sido aplicada para otimizar decisões de pavimentação, embora enfrente desafios quanto à consideração de aspectos não-lineares e subjetivos. O método AHP tem sido amplamente utilizado com apoio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para integrar critérios multicritério. A literatura recente aponta vantagens na integração entre o geoprocessamento e modelos econômicos, como em Goh et al. (2019), especialmente para lidar com incertezas e considerar impactos sociais e ambientais no processo decisório. Assim, a hipótese assumida na pesquisa é que a combinação entre AHP e LCCA permite capturar tanto critérios qualitativos quanto quantitativos, promovendo avaliações mais robustas e realistas.



Figura 1: Ilustração do Rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte

O objetivo geral da pesquisa é adaptar um modelo integrado dos métodos AHP e LCCA para avaliação da viabilidade de alternativas de investimentos rodoviários. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver alternativas de traçado com base no modelo adaptado, usando SIG;
- Avaliar custos considerando ciclo de vida com diferentes tipos de pavimento;
- Comparar o modelo proposto ao método adotado pelo Estado de Minas Gerais.

2. PROPOSTA METODOLÓGICA

A metodologia é dividida em três macro etapas integradas, cada qual com suas fases elencadas a seguir:

- **Aplicação do AHP com suporte em SIG**
  - Definição da estrutura hierárquica de critérios: socioeconômicos, ambientais, biofísicos e

logísticos;
    - Coleta de dados secundários georreferenciados (governo estadual e concessionária);
    - Geração de mapas temáticos (raster) e pesos atribuídos com base em comparação par a par segundo a escala de Saaty.
    - Normalização e sobreposição das camadas para identificação de corredores viários preferenciais.
- **Aplicação do LCCA**
    - Avaliação comparativa entre pavimentos rígido e flexível nas alternativas melhor ranqueadas pelo AHP;
    - Estimativa dos custos da agência e dos usuários, conforme modelos HDM4 e teoria de filas.
- **Integração via modelo de soma ponderada (WSM)**
    - Normalização dos resultados AHP e LCCA;
    - Cálculo do escore final ponderado e análise de sensibilidade.

Serão desenvolvidos diferentes cenários resultantes da combinação de corredores de viabilidade e matrizes de ciclo de custo de vida de pavimentos distintos. Por fim, será realizada uma análise integrada dos resultados do modelo proposto e dos métodos usados no estudo de viabilidade da concessão (comparação crítica), entre os diferentes corredores de viabilidade resultantes da modelagem AHP + LCCA e o alinhamento do projeto do rodoanel da RMBH adotado pelo governo do Estado, etapa ainda não concluída da pesquisa.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A primeira etapa da metodologia foi implementada com foco na aplicação do método AHP com apoio de SIG. Foram definidos critérios e pesos, gerados mapas temáticos e processadas camadas geográficas para identificar os corredores viários mais adequados para os trechos Norte e Oeste do Rodoanel da RMBH. Foram produzidos mapas dos corredores com menor impacto relativo foram gerados para os trechos Norte e Oeste do Rodoanel, com base em critérios previamente definidos. Os resultados preliminares demonstram a robustez do método AHP para modelagem geográfica de corredores de viabilidade, contudo há ainda necessidade de refinamento dos pesos. Os corredores preliminares gerados mostram alternativas distintas daquelas previstas no contrato de concessão, o que evidencia o potencial do modelo proposto para apoiar decisões de traçado com base multicritério (Figura 2). Cabe ressaltar que os pesos atribuídos aos critérios ainda estão em processo de calibração, e as análises econômicas via LCCA estão previstas para as etapas seguintes.

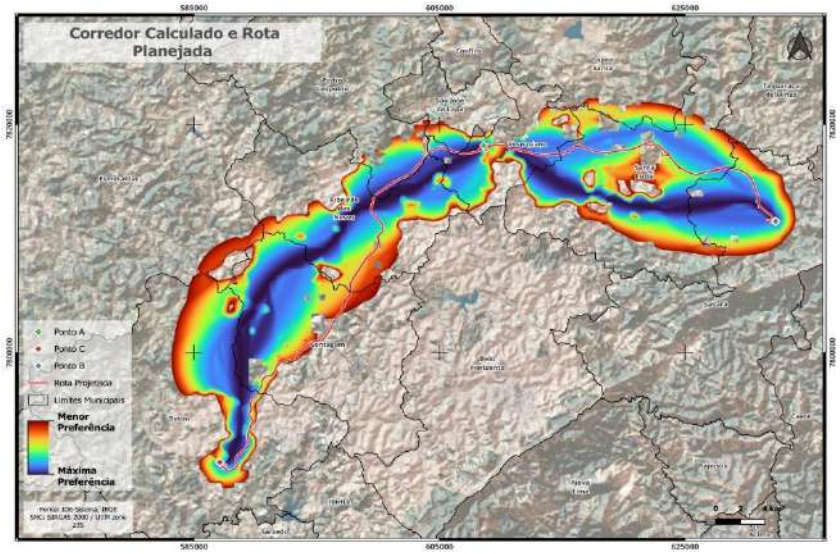


Figura 2: Exemplo de corredor de viabilidade calculado para o rodoanel da RMBH

Nota-se que os trajetos identificados divergem do traçado atualmente previsto na concessão (linha vermmelha), sinalizando potencial para reavaliação com base em critérios multicritério e evidência espacial. Os pesos atribuídos ainda estão em fase de calibração, e a aplicação do LCCA está programada para o segundo semestre de 2025.

4. INOVAÇÃO, VISIBILIDADE E INSERÇÃO SOCIAL DA PESQUISA

A pesquisa parte de métodos consolidados na literatura que na prática ainda apresentam fragilidades quando aplicados ao planejamento e à gestão de transportes. Ao incorporar o LCCA nas alternativas de corredores de viabilidade computador pela análise multicritérios, o trabalho inova na forma de avaliação dos impactos de longo prazo das decisões de investimento, algo essencial para grandes obras de infraestrutura. A escolha de um contorno metropolitano(trechos Norte e Oeste do Rodoanel da região metropolitana de Belo Horizonte) como estudo de caso assegura aplicabilidade prática e potencial de impacto. Todos os dados utilizados são reais, públicos e atualizados, demonstrando viabilidade e replicabilidade da metodologia proposta. A pesquisa impacta diretamente em temas como mobilidade urbana, planejamento territorial estratégico, justiça socioespacial e sustentabilidade, contemporâneos e de alta relevância na definição de políticas públicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 315631/2021-0) pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bagdatli, M. E. C. (2018) Fuzzy Logic–Based Life-Cycle Cost Analysis of Road Pavements. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, v. 144, n. 4, p. 04018050. DOI: 10.1061/JPEODX.0000053

Boardman, A. E.; D. H. Greenberg; A. R. Vining e D. L. Weimer (2018) Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice (4ª ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Bryce, J. M.; G. Flintsche R. P. Hall (2014) A multi criteria decision analysis technique for including environmental impacts in sustainable infrastructure management business practices. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 32, p. 435–445. DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.002

Chan, H. K.; X. Wang e A. Raffoni (2014) An integrated approach for green design: Life-cycle, fuzzy AHP and environmental management accounting. The British Accounting Review, v. 46, n. 4, p. 344–360. DOI: 10.1016/j.bar.2014.09.002

Chen, C. e G. W. Flintsch (2007) Fuzzy Logic Pavement Maintenance and Rehabilitation Triggering Approach for Probabilistic Life-Cycle Cost Analysis. Transportation Research Record, v. 1990, p. 80–91. DOI: 10.3141/1990-10

Dong, Y. H. e S. T. Ng (2016) A modeling framework to evaluate sustainability of building construction based on LCSA. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, n. 4, p. 555–568. DOI: 10.1007/s11367-016-1041-2

Gestão Ambiental (2009) Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT.

Goh, K. C.; H. H. Goh e H.-Y. Chong (2019) Integration Model of Fuzzy AHP and Life-Cycle Cost Analysis for Evaluating Highway Infrastructure Investments. Journal of Infrastructure Systems, v. 25, n. 1, p. 04018045. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000456

Gonzalez, A.; J. Chase; M. V. Elmendorf et al. (2016) Estimating local biodiversity change: a critique of papers claiming no net loss of local diversity. Ecology, v. 97, n. 8, p. 1949–1960. DOI: 10.1002/ecy.1448

Júnior, J. I. F. (2016) Modelagem de dados geográficos para a definição do corredor do rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte: o caso da Alça Sul. In Repositório Institucional da UFMG. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IGCM-AAYPFA. Acesso em: 22 maio 2024.

Kalyviotis, N. (2025) Life cycle assessment tools for road design: analysing linearity assumptions. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, p. 1–11. DOI: 10.1680/jensu.21.00058

Kendall, A.; G. A. Keoleian e G. E. Helfand (2008) Integrated Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis Model for Concrete Bridge Deck Applications. Journal of Infrastructure Systems, v. 14, n. 3, p. 214–222. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2008)14:3(214)

Kendall, H.; J. T. Harvey; J. Meijer; H. Ozer; I. L. Al-Qadi; A. Saboori e A. Kendall (2016) Pavement Life Cycle Assessment Framework. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324602143_Pavement_Life_Cycle_Assessment_Framework_Harvey_John_T_Joep_Meijer_Hasan_Ozer_Imad_L_Al-Qadi_Arash_Saboori_and_Alissa_Kendall. Acesso em: 22 jun. 2025.

Kumari, M.; P. Gupta e S. S. Deshwal (2022) Integrated Life Cycle Cost Comparison and Environment Impact Analysis of the Concrete and Asphalt Roads. Materials Today: Proceedings, v. 60, p. 345–350. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.017

Moins, B.; T. Gabet; P. Dauvergne et al. (2020) Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 133, p. 110284. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110284

Nóbrega, R. A. A.; L. H. F. Costa; P. C. Lima et al. (2009) Bridging decision-making process and environmental needs in corridor planning. Management of Environmental Quality: An International Journal, v. 20, n. 6, p. 622–637. DOI: 10.1108/14777830910981266

Nóbrega, R. A. de A.; J. I. F. Júnior; L. H. F. Costa; M. R. F. Ferreira e L. C. V. Silva (2016) Inteligência geográfica para avaliação de propostas de projeto de concessão de corredores ferroviários. Transportes, v. 24, n. 4, p. 75–84. DOI: 10.14295/transportes.v24i4.1168

Patil, A. R. e S. P. A. (s.d.) Life Cycle Cost Analysis of Flexible Pavements and Rigid Pavements in Urban Areas. International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT), v. 2, n. jun-2017, p. 48–54.

Ren, J.; G. Manzardo; A. Mazzi e S. Toniolo (2015) Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 20, n. 6, p. 842–853. DOI: 10.1007/s11367-015-0886-4

Saaty, R. W. (1987) The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. Mathematical Modelling, v. 9, n. 3–5, p. 161–176. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8

Sadasivuni, R.; R. Yapa; A. S. Jayasena e T. B. Edirisinghe (2009) A transportation corridor case study for multi-criteria decision analysis. In Proceedings of the 2009 International Conference on Sustainable Urban Transportation Systems, Colombo: University of Moratuwa.

Small, K. A.; C. Winston e J. Yan (2005) Uncovering the Distribution of Motorists' Preferences for Travel Time and Reliability. Econometrica, v. 73, n. 4, p. 1367–1382. DOI: 10.1111/j.1468-0262.2005.00619.x

Sreelekshmi, B. G.; V. S. Sanjay Kumar e P. Sabu (2023) Maintenance Prioritization of Roads Based on Asset Score Using GIS and AHP. In Recent Advances in Transportation Infrastructure. Cham: Springer, p. 115–126. DOI: 10.1007/978-3-031-37580-0_10

Triantaphyllou, E.; B. Shu; S. Nieto Sánchez e T. Ray (1997) Determining the most important criteria in maintenance decision making. Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 3, n. 1, p. 16–28. DOI: 10.1108/13552519710161517

Ugwu, O. O. e T. C. Haupt (2007) Key performance indicators and assessment methods for infrastructure sustainability—a South African construction industry perspective. Building and Environment, v. 42, n. 2, p. 665–680. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.10.018

US Department of Transportation (1998) Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design – In Search of Better Investment Decisions. Washington, D.C.: FHWA. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/lcca/013017.pdf. Acesso em: 28 jan. 2025.

US Department of Transportation (2002) Life-Cycle Cost Analysis Primer. Washington, D.C.: FHWA. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/lcca/010621.pdf. Acesso em: 28 jan. 2025.

Woodward, D. G. (1997) Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. International Journal of Project Management, v. 15, n. 6, p. 335–344. DOI: 10.1016/S0263-7863(96)00089-0

Zhang, H.; A. Kendall; J. Harvey et al. (2010) Dynamic Life-Cycle Modeling of Pavement Overlay Systems: Capturing the Impacts of Users, Construction, and Roadway Deterioration. In University of Michigan Research Repository. Disponível em: http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/94202. Acesso em: 29 jun. 2025.

Zhang, J.; P. Atkinson e M. F. Goodchild (2014) Scale in Spatial Information and Analysis. Boca Raton: CRC Press.

Matheus Guimarães Novais (mtg.novais@gmail.com)
Victor de Souza Rezende (victorsrgeo@gmail.com)
Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega (raanobrega@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes Gerais
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DA ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE EM FAVELAS

Kelly Cristina da Silva de Almeida[1], Luís Eduardo Santos Fortes[1, 2], Glaydston Mattos Ribeiro[1],
[1]Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro (PET/COPPE/UFRJ), [2]Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (CEFET/RJ)

RESUMO
Este relatório propõe um procedimento metodológico para analisar a acessibilidade e mobilidade em favelas marcadas por desigualdades socioespaciais. O objetivo é desenvolver uma abordagem replicável que permita compreender os padrões de deslocamento nesses territórios e subsidiar políticas públicas mais inclusivas. A metodologia é estruturada em quatro etapas: planejamento com caracterização territorial; coleta de dados primários, secundários e participativos; análise com geoprocessamento e dados qualitativos; e divulgação com recomendações. Levando-se em consideração um estudo de caso que envolve o Morro do Andaraí, localizado no Rio de Janeiro, os resultados preliminares demonstram a eficácia da integração entre técnicas quantitativas e qualitativas, evidenciando desigualdades no acesso ao transporte, especialmente em áreas com pouca cobertura formal. A fase atual da pesquisa foca no desenvolvimento da metodologia participativa, com oficinas de escuta ativa e mapeamento coletivo de necessidades. A principal contribuição do trabalho é oferecer um modelo de diagnóstico multiescala que valoriza o saber local e a participação comunitária, promovendo soluções adaptadas à realidade dos territórios populares.

1. INTRODUÇÃO

O rápido processo de urbanização no Brasil ocorreu de forma desarticulada e sem um planejamento urbano consistente, o que contribuiu para a formação de cidades com infraestrutura precária. Esse crescimento desordenado das áreas urbanas resultou na proliferação de assentamentos irregulares e moradias inadequadas, frequentemente desprovidas de acesso a serviços essenciais como saneamento e transporte, como as favelas (PAULO, 2018). Essa conjuntura reforça a necessidade de políticas públicas voltadas à promoção de um desenvolvimento urbano mais justo e sustentável, com foco na melhoria das condições de vida nessas localidades. Nas favelas do Rio de Janeiro, a acessibilidade envolve também dimensões culturais e sociais, cuja ausência aprofunda desigualdades. Diante disso, este estudo propõe um procedimento para analisar padrões de mobilidade e acessibilidade em territórios periféricos, com o objetivo de subsidiar políticas públicas mais inclusivas.

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) apresenta um cenário de mobilidade urbana marcado pela complexidade e constante transformação. A cidade do Rio de Janeiro passou por grandes intervenções em sua infraestrutura de transportes, especialmente em função dos megaeventos como a Copa do Mundo de 2014 e os Jogos Olímpicos de 2016, consolidando um sistema multimodal que abrange metrô, trem, ônibus, táxi, barcas, VLT, BRT e bicicletas compartilhadas, mas ainda enfrenta desafios de integração e equidade (LIMA, 2000). A acessibilidade ao transporte público influencia diretamente a configuração urbana e a redução das desigualdades (PAIVA NETO, 2005). Em áreas periféricas, destaca-se o transporte complementar “Cabritinho” que é uma modalidade de serviço complementar do transporte público de passageiros que atua em favelas ou comunidades urbanas no Município do Rio de Janeiro adaptado às condições locais e responsável por conectar favelas às redes formais (MARTINS, 2018).

Andrade e Linke (2017) defendem a prioridade ao pedestre como estratégia para cidades mais inclusivas e sustentáveis, destacando a caminhabilidade como resultado de acessibilidade, conforto e segurança. O Índice de Caminhabilidade 2.0 (ITDP, 2018) mede esse aspecto com base na extensão das quadras e na proximidade a pontos de transporte público. A metodologia usa dados georreferenciados e atribui notas de 0 a 3, considerando “ótimo” distâncias curtas e conexões diretas. Essa métrica orienta o planejamento urbano ao promover modos ativos e melhorar a qualidade de vida.
Streck *et al.* (2017), enfatizam a mobilidade inclusiva como fundamental para sistemas de transporte equitativos na América Latina, destacando a importância do acesso para grupos vulneráveis, como pessoas com deficiência, idosos e moradores de áreas periféricas, e defendendo a participação popular para superar modelos tradicionais e avançar rumo a um futuro urbano mais sustentável e democrático.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura destaca o papel da mobilidade como direito social e sua relação direta com a exclusão

socioespacial (Kwok, 2019; Portugal, 2017). Andrade e Cunha Linke (2017) reforçam a importância da caminhabilidade e do pedestre no centro do planejamento urbano, enquanto Singh, Jirón e Giucci (2023) introduzem o conceito de mobilidade inclusiva na América Latina. Em contextos informais, como as comunidades cariocas, estudos recentes (Costa, 2016; Martins, 2018) apontam o transporte alternativo como solução adaptada à morfologia urbana.

3. PROPOSTA DE PROCEDIMENTO

O procedimento proposto para analisar e compreender a acessibilidade e a mobilidade dos moradores de favelas, foi estruturado em quatro etapas principais, apresentadas na Figura 1.

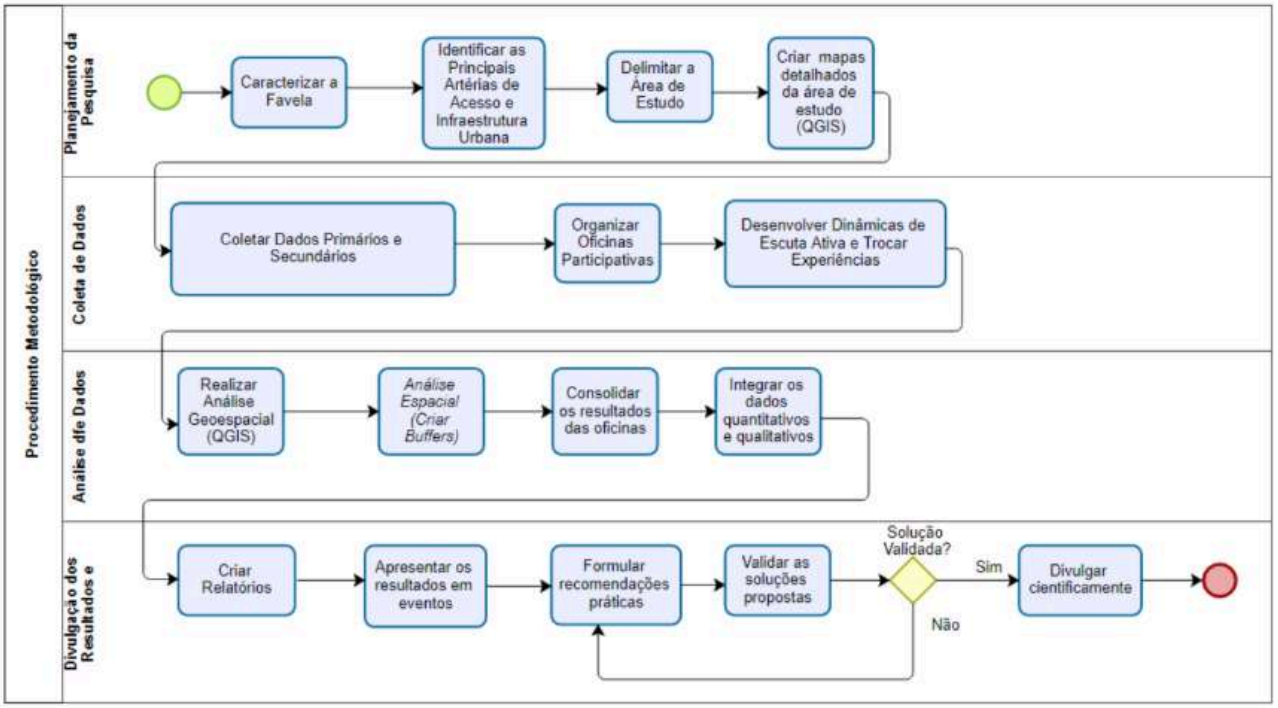


Figura 1: Procedimento para analisar e compreender a acessibilidade e a mobilidade dos moradores de favelas.

3.1 Etapa 1: Planejamento da pesquisa

O planejamento da pesquisa inicia com a caracterização da favela, considerando aspectos geográficos e demográficos, além da infraestrutura urbana e dos serviços essenciais. A delimitação territorial utiliza *QGIS*, imagens de satélite e bases como o *OpenStreetMap*, considerando a área de influência do transporte e a distribuição populacional. Identificam-se zonas com diferentes níveis de acessibilidade, formais e informais, gerando um diagnóstico preliminar que orienta as análises espaciais e socioeconômicas por meio de mapas temáticos.

3.2 Etapa 2: Coleta de dados

A coleta de dados articula três frentes complementares: levantamento primário, dados secundários e participação comunitária. O levantamento primário inclui visitas técnicas para mapear os serviços de transporte formal e informal, georreferenciar pontos de parada, itinerários e características operacionais, utilizando registros fotográficos, anotações de campo e entrevistas informais com moradores e lideranças locais. Simultaneamente, são coletados dados secundários de plataformas públicas, como a Data.Rio e o Censo Demográfico do IBGE, que oferecem informações sociodemográficas e espaciais, essenciais para a caracterização territorial. As oficinas participativas envolvem moradores e atores locais, permitindo identificar demandas, desafios e percepções sobre mobilidade. Essa abordagem integrada garante que o diagnóstico reflita tanto dados técnicos quanto o conhecimento e as vivências da população.

3.3 Etapa 3: Análise e processamento de dados

Nesta etapa, os dados coletados nas fases anteriores são integrados com foco na análise geoespacial,

utilizando o software *QGIS*. São elaborados mapas temáticos que evidenciam a distribuição dos serviços de transporte, a população absoluta, a configuração urbana e os níveis de acessibilidade. Aplicam-se ferramentas como a função *buffer* com raios de 500, 750 e 1.000 metros para avaliar a cobertura dos serviços e estimar a acessibilidade a pé, complementadas pelo *plugin Online Routing Mapper,* que calcula distâncias reais de caminhada com base na malha viária, como apresentados na Figura 2. Com isso, classificam-se os setores censitários como plenamente, parcialmente ou não atendidos, permitindo identificar lacunas no acesso ao transporte. Além da análise quantitativa, incorporam-se os dados qualitativos das oficinas participativas, enriquecendo o diagnóstico com as percepções e estratégias locais de mobilidade. Essa integração possibilita uma compreensão mais ampla dos desafios estruturais e vivenciais enfrentados pela favela.

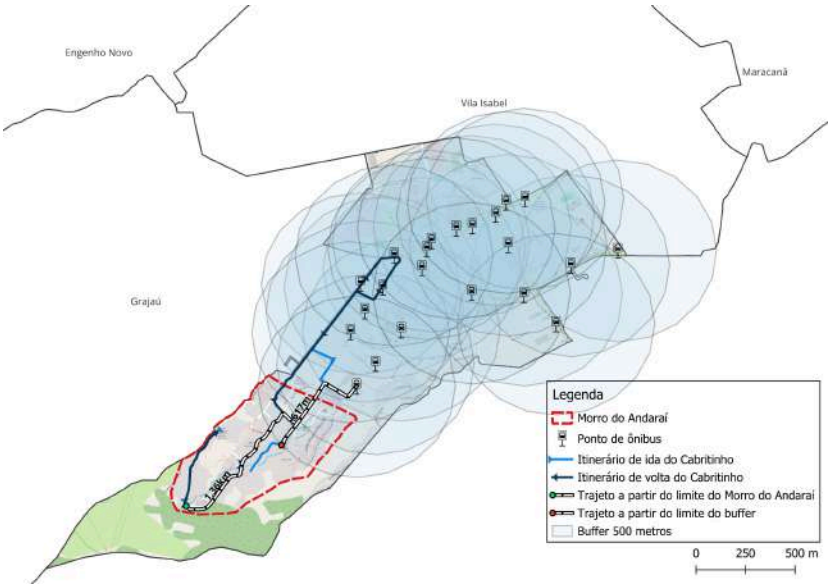


Figura 2: Análise espacial do território considerando o Morro do Andaraí como região a ser analisada.

3.4 Etapa 4: Divulgação dos Resultados e Recomendações

Esta etapa reúne os resultados da pesquisa em um relatório abrangente e os divulga por meio de eventos, artigos e relatórios técnicos voltados a gestores, especialistas e à comunidade. A partir das evidências, são formuladas recomendações práticas validadas em mesas redondas com especialistas, promovendo o alinhamento com as demandas locais. A divulgação científica fortalece o debate e contribui para políticas públicas mais eficazes e inclusivas em mobilidade urbana.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Os resultados preliminares para o Morro do Andaraí, localizado no Rio de Janeiro, apontam que o procedimento proposto tem se mostrado eficaz para construir um diagnóstico territorial, articulando dimensões técnicas, espaciais e sociais. A Etapa 1 gerou uma base cartográfica robusta com geoprocessamento e caracterização demográfica. A Etapa 2 estruturou a coleta de dados em frentes primária, secundária e participativa, revelando trajetos e serviços de transporte não oficiais e incorporando dados de plataformas públicas. A metodologia participativa, em desenvolvimento, tem captado percepções e demandas locais por meio de oficinas. A Etapa 3 revelou desigualdades no acesso ao transporte, com melhor cobertura em áreas centrais e lacunas em zonas periféricas, destacando a necessidade de soluções complementares. A Etapa 4 segue em desenvolvimento. As análises parciais evidenciam desigualdades internas no acesso aos serviços de transporte e ressaltam a relevância de modos informais e soluções adaptadas à realidade das favelas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, V.; CUNHA LINKE, C. (Org.). *Cidades de pedestres: a caminhabilidade no Brasil e no mundo*. Rio de Janeiro: Babilonia Cultura Editorial, 2017.

INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO – ITDP. *Índice de Caminhabilidade 2.0: Ferramenta.* Rio de Janeiro: ITDP Brasil, 2018. Disponível em: https://itdpbrasil.org/icam2/. Acesso em: 4 dez. 2024.

LIMA, Iêda Maria de Oliveira. *Retrospectiva do Transporte Brasileiro: As Conquistas e os Entraves na Transição dos Séculos XX e XXI.* 2000.

MARTINS, M. O. *Acessibilidade na periferia do transporte: o caso de Santa Cruz.* 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PAULO, Rodolfo Fares. *Crescimento urbano desordenado: o papel do Estado e da sociedade diante dos impactos socioambientais.* Porto 1 Alegre, RS: Editora Fi, 2018. 173 p. ISBN 978-85-5696-487-8.

PAIVA NETO, José Brandão de. *A Rede de Transporte Público como Estruturadora de Centralidades: Análise da Cidade do Rio de Janeiro.* 2005. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

STRECK, D. R.; PITANO, S. D. C.; MORETTI, C. Z. *Educar pela participação, democratizar o poder: o legado freireano na gestão pública.* Educação em Revista, v. 33, 2017.

Transporte e Inclusão Social

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

A ÚLTIMA MILHA COMO DESAFIO DE EQUIDADE: ESTUDO DO SERVIÇO DE TRANSPORTE EM VILAS E FAVELAS DE BELO HORIZONTE – MG

Pedro de Souza Coelho[1, 2], **Walysson Tangrins Martins**[1], **Kamilla Oliveira Silva**[1, 2], **Luís Otávio Rocha Castilho**[1, 2, 3], **Rafael Murta Resende**[1], **Matheus de Souza Coelho**[3]

[1]Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte (SUMOB), [2]Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), [3]Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG)

RESUMO

Este artigo discute a importância da equidade no acesso ao transporte público, analisando se as soluções de primeira e última milha promovem a redução das desigualdades no serviço. Para tal, o estudo avalia o impacto das linhas gratuitas de miniônibus (Vilas e Favelas) do município de Belo Horizonte, que conectam comunidades em áreas de vulnerabilidade social ao sistema estrutural. Utilizando mapeamento de *buffers* ajustados à declividade do terreno, compara-se a cobertura do transporte com e sem essas linhas. Os resultados mostram que, sem o serviço, o tempo de deslocamento a pé aumenta drasticamente nessas áreas, enquanto as linhas garantem acesso rápido e inclusivo aos moradores. Diferente de soluções tecnológicas de mercado, o modelo de Belo Horizonte demonstra que serviços públicos adaptados podem promover a equidade no transporte. O estudo é relevante para cidades latino-americanas com desafios similares de informalidade e exclusão, destacando a necessidade de soluções territorialmente sensíveis para uma mobilidade justa.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, as discussões sobre mobilidade urbana passaram a incorporar o conceito de "última milha" como um dos principais desafios para a efetivação do direito à cidade. A ideia de facilitar o deslocamento entre a residência do usuário e a infraestrutura estruturante do transporte público deu origem a uma série de propostas contemporâneas, por compartilhamento de bicicletas (Guo *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2022, 2024; Siqueira; Loureiro; De Oliveira Neto, 2024; Yan; Chen, 2024; Zuo *et al.*, 2020), patinetes compartilhados e e-scooters (Bieliński; Ważna, 2020; Hosseinzadeh *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2024; Zuniga-Garcia et al., 2022), modais sob demanda e tecnologias embarcadas em plataformas digitais (Chee; Susilo; Wong, 2021; Fidanoglu; Gokasar; Deveci, 2023; Scheltes; De Almeida Correia, 2017; Shehadeh; Wang; Zhang, 2021), que prometem ampliar a conectividade urbana e reduzir os tempos de deslocamento.

Entretanto, as soluções de última milha têm sido pensadas e implantadas com base em lógicas urbanas que frequentemente ignoram as desigualdades territoriais, econômicas e topográficas das cidades latino-americanas. Nas favelas, por exemplo, frequentemente situadas em terrenos íngremes e dotadas de infraestrutura deficiente, a oferta de transporte é escassa, comprometendo o acesso equitativo ao sistema público (Cerqueira; Diniz, 2024; Coelho; Oliveira; Nobrega, 2025). Nesse contexto, surge a questão central desta pesquisa: "Em que medida as soluções de primeira e última milha promovem, de fato, a equidade no acesso ao transporte público?"

Este artigo reflete criticamente sobre os limites das soluções tecnológicas de mobilidade, que, desconectadas da realidade territorial, acabam reforçando exclusões. Como alternativa, apresentamos o modelo gratuito de miniônibus de Belo Horizonte, através das linhas de vilas e favelas (Belo Horizonte, 2017), que conectam algumas comunidades ao transporte coletivo de forma inclusiva, apontando caminhos para promover a equidade na primeira e última milha.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A ausência de soluções adequadas e os desafios relacionados ao acesso à primeira e à última milha do transporte público tem afetado significativamente sua demanda, mesmo quando o sistema principal oferece um serviço de alta qualidade (Brons; Givoni; Rietveld, 2009; Cervero, 2001; Hussin *et al.*, 2021; Rahman; Akther; Recker, 2022; Tilahun *et al.*, 2016).

Historicamente, a maioria dos usuários de transporte público caminha até a parada/estação no início ou fim de uma viagem (Reck; Axhausen, 2020). Embora soluções de micromobilidade tenham sido propostas como alternativas para esse trecho, poucos estudos investigaram se essas opções são, de fato, acessíveis e equitativamente distribuídas entre a população (Aman; Zakhem; Smith-Colin, 2021). Preocupações com a equidade emergiram a partir da constatação de que os usuários de bicicletas compartilhadas são desproporcionalmente brancos, de alta renda e com elevado nível de escolaridade, evidenciando barreiras significativas ao acesso por populações marginalizadas (Beale; Kapatsila; Grisé, 2023). Nesse contexto, estudos voltados à promoção da equidade no acesso ao transporte público ganharam destaque, com objetivo

de melhorar o acesso a quem mais necessita e buscar soluções mais eficientes. Levine (2024) discute como os planejadores podem promover uma inclusão mais efetiva de pessoas com deficiência, visando aprimorar a acessibilidade nos trechos de primeira e última milha. No trabalho de Hussin *et al*. (2021), os autores exploram abordagens de planejamento de um sistema de mobilidade integrado em países em desenvolvimento, buscando melhores soluções, combinando transporte público com outros modos.

Já no estudo de Rahmana *et al*. (2022), evidencia-se que a ausência de soluções direcionadas a esse público ignora a relevância dos transportes informais para o acesso ao sistema principal de transporte público. Os autores demonstram que modos alternativos como "*Paratransit*" (transportador humano ou mototriciclo/"*tuk tuk*" compartilhado) garantem maior eficiência na alimentação do sistema e reduzem os tempos de deslocamento. Além disso, destacam, que um número significativo de usuários ainda depende desses modos informais, e que restringi-los não se justifica sob o argumento de equidade. Isso porque qualquer regulamentação deve considerar não apenas a segurança, mas também a acessibilidade e a sensibilidade aos custos para os passageiros.

Portanto, as discussões indicam que, para melhorar a qualidade de vida e promover uma transição efetiva para transportes regulamentados e seguros, é essencial desenvolver alternativas viáveis, em vez de apenas proibir os serviços informais ou focar em soluções voltadas a bairros ricos e bem estruturados. Medidas restritivas, sem a oferta de opções adequadas, não contribuirão para ampliar o acesso da população mais vulnerável às oportunidades.

Partindo para uma investigação no contexto latino-americano, um dos principais desafios das cidades é ampliar as oportunidades e o acesso para a população de baixa renda, especialmente aquelas que vivem em aglomerados, vilas e favelas. As regiões denominadas favelas são áreas urbanas relativamente pobres e altamente radicalizadas, historicamente associadas à criminalidade violenta (Freire-Medeiros *et al*., 2020), além de frequentemente, na América Latina, estarem localizadas em encostas íngremes, com baixa infraestrutura viária e acesso precário a serviços públicos (Libertun de Duren; Rivas; Perlman, 2021; Niembro; Guevara; Cavanagh, 2021; Ronchi; Arcidiacono, 2019). Pela complexidade de atendimento a estas comunidades e a falta de soluções práticas, percebe-se na literatura corrente uma presença massiva de transporte clandestinos e informais, que surgem em resposta à exclusão socioespacial (Avellaneda; Lazo, 2011; Ibarra; Castro, 2016; Peixoto *et al.*, 2011).

Em alternativa às soluções comumente difundidas e considerando a realidade da área em análise, o presente estudo analisa o sistema de transporte público de Belo Horizonte, com ênfase nas ações adotadas para aprimorar o atendimento e promover maior equidade e qualidade na prestação do serviço, especialmente na primeira e última milha nos aglomerados urbanos da capital mineira.

3. ÁREA DE ESTUDO E O SERVIÇO DE VILAS E FAVELAS EM BELO HORIZONTE

Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, apresenta uma configuração territorial marcada por relevo acidentado, com predominância de morros e montanhas, no qual a declividade é um fator-chave frequentemente considerado na escolha do modo de transporte, tornando-se relevante para a compreensão de como a topografia impacta a qualidade e a oferta do transporte público (De Souza Coelho *et al.*, 2025). A cidade é formada por 487 bairros distribuídos em dez regionais administrativas, com distintas características sociodemográficas e níveis de renda, entre os quais se destacam 218 favelas, marcadas por precariedade habitacional e deficiências na infraestrutura urbana (Nóbrega; Nero, 2024; Oliveira; Nobrega; Coelho, 2023; Belo Horizonte, 2025).

Visando aprimorar o atendimento e a acessibilidade nestas regiões, os gestores do município criaram linhas de vilas e favelas integradas à rede de transporte coletivo. Estas linhas caracterizam-se pelo atendimento a aglomerados urbanos e operação com veículos de menor capacidade, visando atender a demanda local e possibilitando a integração com as demais linhas da cidade (Belo Horizonte, 2008). A utilização de veículos de menor capacidade e, portanto, de menores dimensões, permite melhor capilaridade da rede de linhas de vilas e favelas, alcançando o maior número de pessoas que vivem em situação de vulnerabilidade urbana, conectando a primeira e última milha destes cidadãos ao sistema principal.

Em 2023, como parte da política de implementação de subsídios ao transporte coletivo local, a Prefeitura de Belo Horizonte implementou a política de Tarifa Zero em todas as linhas de vilas e favelas (Belo Horizonte, 2023), tornando todas as viagens do serviço gratuitas à população. Além disso, ocorreram investimentos na expansão do serviço, através da incorporação de novos veículos e da inclusão de novos horários de atendimento (*Ibid*, 2025). Esse tipo de subsídio integra o transporte de primeira e última milha ao sistema, oferecendo uma abordagem mais equitativa (Reck e Axhausen, 2020).

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste artigo fundamenta-se na análise da cobertura espacial do sistema de transporte público por ônibus por meio da comparação entre dois cenários: um que desconsidera o atendimento às vilas e favelas, e outro que o incorpora. Para tanto, foram mapeadas áreas de influência (*buffers*) das linhas de ônibus, permitindo avaliar o impacto da presença ou ausência desses serviços na acessibilidade territorial.

O mapeamento seguiu a abordagem metodológica proposta por Coelho, Oliveira e Nóbrega (2025), a qual se baseia nos critérios estabelecidos pelo contrato de concessão do município de Belo Horizonte. Essa abordagem incorpora a ponderação de limites máximos de cobertura conforme a declividade do terreno, de modo que os *buffers* gerados não são equidistantes, mas ajustados ao esforço físico exigido dos usuários para o deslocamento, refletindo assim condições mais realistas de acessibilidade.

Essa metodologia mostrou-se especialmente adequada, uma vez que as vilas e favelas estão, em sua maioria, localizadas em áreas com elevada inclinação do terreno, o que acentua os desafios de acessibilidade e reforça a importância da abordagem adotada. Cabe destacar que a metodologia proposta pelos autores tem como princípio orientar as análises a partir da equidade no acesso ao transporte, alinhando-se aos objetivos do serviço público avaliado neste estudo.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

No total, doze linhas compõem o serviço de vilas e favelas na capital mineira, operando em cinco das dez regionais administrativas da cidade. A capital mineira adota as linhas de vilas e favelas como uma estratégia específica de inclusão territorial e social, voltada à integração dos aglomerados urbanos ao sistema estrutural de mobilidade. Abaixo, apresentam-se os mapas comparativos da rede de transporte municipal e a acessibilidade dos cidadãos considerando a existência do serviço.

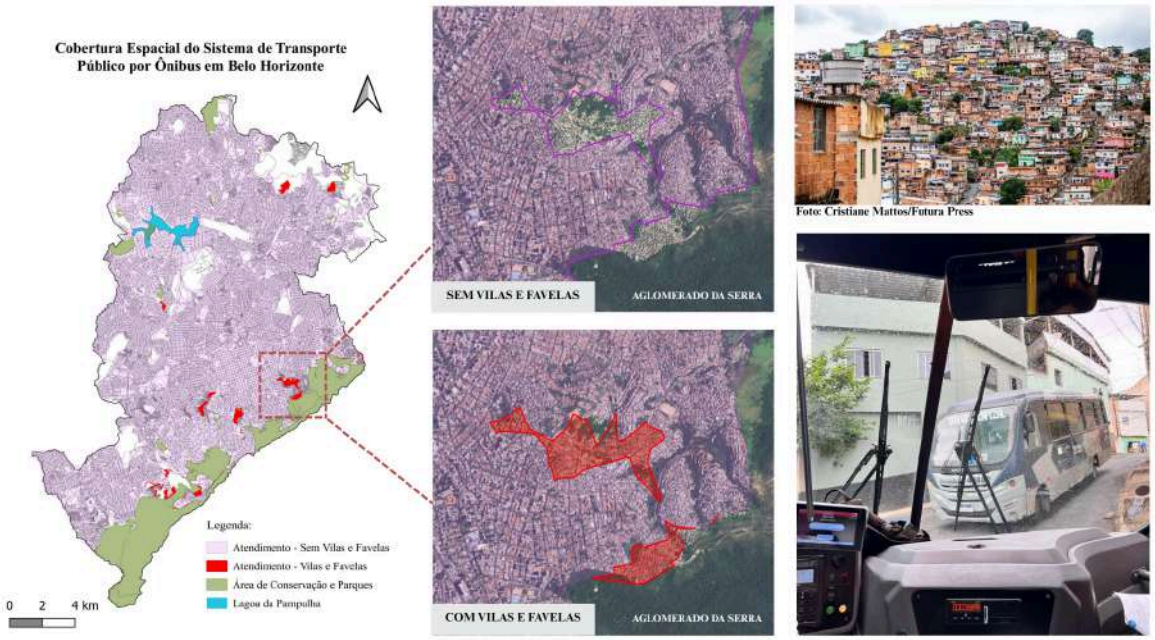


Figura 1: Cobertura espacial do sistema de transporte público por ônibus em Belo Horizonte e recorte do Aglomerado da Serra

A análise espacial desenvolvida nesta pesquisa, por meio da sobreposição de mapas de isócronas (tempo de caminhamento até o transporte coletivo), com e sem a presença dessas linhas, evidencia a relevância desse serviço na promoção da equidade no acesso às oportunidades urbanas, como emprego, saúde e educação.

Os resultados mostram que, na ausência das linhas de vilas e favelas, o tempo de deslocamento a pé até os pontos de ônibus mais próximos aumenta significativamente, a um patamar que compromete a acessibilidade em áreas de alta vulnerabilidade socioeconômica. Com a presença das linhas, o tempo de caminhamento é reduzido garantindo maior aderência ao conceito de justiça espacial e mobilidade cidadã. A equidade, neste contexto, refere-se à distribuição justa das oportunidades a partir do tempo e esforço para alcançá-las, especialmente para moradores de áreas historicamente marginalizadas.

Diferentemente das soluções pontuais e voltadas ao mercado encontradas na literatura, como bicicletas e patinetes elétricos compartilhados, que, além de serem financeiramente inacessíveis a uma parcela significativa da população, carecem de infraestrutura segura e continuidade territorial, o serviço público estruturado oferece cobertura mais abrangente e custo reduzido ao usuário, compensando desigualdades estruturais ao conectar periferias informais à malha principal de transporte.

Destarte, a replicação desse modelo em outras cidades da América Latina pode representar um avanço relevante na promoção da equidade e da justiça urbana, dado que grande parte das cidades latino-americanas compartilham problemas semelhantes de urbanização informal, segregação socioespacial e exclusão do transporte formal. Em suma, a adoção de serviços acessíveis direcionados às periferias informais pode gerar impactos positivos na qualidade de vida urbana, contribuindo para cidades mais integradas e justas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aman, J. J. C.; Zakhem, M. e Smith-Colin, J.. *Towards Equity in Micromobility: Spatial Analysis of Access to Bikes and Scooters amongst Disadvantaged Populations*. Sustainability, v. 13, n. 21, p. 11856, jan. 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/su132111856

Avellaneda, P. e Lazo, A. *Aproximación a la movilidad cotidiana en la periferia de dos ciudades latinoamericanas. Los casos de Lima y Santiago de Chile*. Revista Transporte y Territorio, n. 4, p. 47–58, 2011. DOI: https://doi.org/10.34096/rtt.i4.256

Beale, K.; Kapatsila, B. e Grisé, E.. *Integrating Public Transit and Shared Micromobility Payments to Improve Transportation Equity in Seattle, WA*. Transportation Research Record, v. 2677, n. 1, p. 968–980, 1 jan. 2023. DOI: https://doi.org/10.1177/03611981221103233

Belo Horizonte. BH Map. Camada Regional. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo

Belo Horizonte. Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte - BHTRANS S/A. Anexo X - Glossário. Edital de Concorrência Pública nº 131/2008. Belo Horizonte. 2008

Belo Horizonte. Gabinete do Prefeito. LEI Nº 11.458, DE 17 DE MARÇO DE 2023. Dispõe sobre o controle, a gestão e a transparência dos valores arrecadados para custeio da prestação de serviços de transporte público coletivo de passageiros por ônibus no Município no âmbito dos contratos de concessão e permissão vigentes. Belo Horizonte, 2023. Disponível em: https://dom-web.pbh.gov.br/visualizacao/edicao/6904.

Belo Horizonte. Rede de Transporte por ônibus. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transportes/onibus/rede-de-transporte.

Belo Horizonte. Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte. Relatórios internos. 2025.

Bieliński, T. e Ważna, A.. *Electric Scooter Sharing and Bike Sharing User Behaviour and Characteristics*. Sustainability, v. 12, n. 22, p. 9640, jan. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12229640

Brons, M.; Givoni, M. e Rietveld, P.. *Access to railway stations and its potential in increasing rail use*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 43, n. 2, p. 136–149, 1 fev. 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.08.002

Cerqueira, E. D. V. e Diniz, A. M. A.. *Inequalities in accessibility to daily opportunities in the metropolitan region of Belo Horizonte (Brazil)*. Latin American Transport Studies, v. 2, p. 100016, 1 dez. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.latran.2024.100016

Cervero, R.. *Walk-and-Ride: Factors Influencing Pedestrian Access to Transit*. Journal of Public Transportation, v. 3, n. 4, 1 jan. 2001. DOI: https://doi.org/10.5038/2375-0901.3.4.1

Chee, P. N. E.r; Susilo, Y. O. e Wong, Y. D.. *Longitudinal interactions between experienced users' service valuations and willingness-to-use a first-/last-mile automated bus service*. Travel Behaviour and Society, v. 22, p. 252–261, 1 jan. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tbs.2020.10.004

Coelho, P. de S.; Oliveira, L. K. de e Nobrega, R. A. de A.. *Influence of slope on pedestrian access to public transportation systems*. Latin American Transport Studies, v. 3, p. 100029, 1 dez. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.latran.2025.100029

De Souza Coelho, P.; De Albuquerque Nobrega; R.A., de Oliveira; L.K. e Humberto, M.. *The trade-off between equity and quality in public transportation: lessons from a Brazilian case study*. npj Sustainable Mobility and Transport, v. 2, n. 1, p. 22, 24 maio 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s44333-025-00039-3

Fidanoglu, A.; Gokasar, I. e Deveci, M.. *Integrating shared autonomous vehicles in Last-Mile public transportation*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 57, p. 103214, 1 jun. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103214

Freire-Medeiros, B., De Mattos-Rocha, L., Farias, J. e Name, L. *Of cable-cars and helicopters: mobility regimes and the politics of visibility in the favelas of Rio de Janeiro*. Visual Studies, v. 35, n. 5, p. 478–488, 19 out. 2020. DOI: https://doi.org/10.1080/1472586X.2020.1840099

Guo, Y.; Yang, L.; Lu, Y. e Rui, Z.. *Dockless bike-sharing as a feeder mode of metro commute? The role of the feeder-related built environment: Analytical framework and empirical evidence*. Sustainable Cities and Society, v. 65, p. 102594, 1 fev. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102594

Hosseinzadeh, A.; Majeed, A.; Robert, K.. e Li, Z.. *E-scooters and sustainability: Investigating the relationship between the density of E-scooter trips and characteristics of sustainable urban development*. Sustainable Cities and Society, v. 66, p. 102624, 1 mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102624

Hussin, H.; Osama, A.; El-Dorghamy, A. e Abdellatif, M. M.. *Towards an integrated mobility system: The first and last mile solutions in developing countries; the case study of New Cairo*. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, v. 12, p. 100469, 1 dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.10046.

Ibarra, L. F. B. e Castro, M. V.. *Mujer, espacio y poder: ciudad y transporte público como dispositivos de exclusión. Reflexiones desde la ciudad de Cali*. Estudios Socio-Jurídicos, v. 18, n. 02, p. 227–252, 23 jun. 2016. DOI: https://revistas.urosario.edu.co/xml/733/73346379008/index.html

Levine, K.. *"The bus is accessible, but how do you get to the bus": First and last mile experiences of disabled transit riders*. Journal of Public Transportation, v. 26, p. 100086, 1 jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2024.100086

Libertun De Duren, N. R. e Rivas, R. O.. Perlman, Janice. *Environmental and Social Sustainability of Urban Upgrading Programs: Lessons from Rio*. Cities, v. 119, p. 103416, 1 dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103416

Liu, X.; Fan, J.; Li, Y.; Shao, X. e Lai, Z.. *Analysis of integrated uses of dockless bike sharing and ridesourcing with metros: A case study of Shanghai, China*. Sustainable Cities and Society, v. 82, p. 103918, 1 jul. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103918

Liu, Z.; Fang, C.; Li, H.; Wu, J.; Zhou, L. e Werner, M.. *Efficiency and equality of the multimodal travel between public transit and bike-sharing accounting for multiscale*. Sustainable Cities and Society, v. 101, p. 105096, 1 fev. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105096

Niembro, A.; Guevara, T.s e Cavanagh, E.. *Urban segregation and infrastructure in Latin America: A neighborhood typology for Bariloche, Argentina*. Habitat International, v. 107, p. 102294, 1 jan. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102294

Nóbrega, R. A. de A. e Nero, A. M.. *Desenvolvimento e validação de um mapa de declividade de vias para o Município de Belo Horizonte-MG com fins de administração pública*. Cadernos do Leste, v. 24, n. 24, 6 nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.29327/248949.24.24-1

Oliveira, L. K. de; Nobrega, R. A. A. e Coelho, P. de S.. *Exploring the Transport Landscape in Belo Horizonte, Brazil*. Latin American Transport Studies, v. 1, p. 100001, 1 dez. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.latran.2023.100001

Peixoto, B.; de Souza, L; G., Batitucci, E. C. e da Cruz, M. V. G. *Reflexões sobre a atuação governamental na promoção da segurança pública*. Cadernos Metrópole, v. 13, n. 25, 2011. DOI: https://revistas.pucsp.br/metropole/article/view/5992

Rahman, M.; Akther, M. S.; Recker, W.. *The first-and-last-mile of public transportation: A study of access and egress travel characteristics of Dhaka's suburban commuters*. Journal of Public Transportation, v. 24, p. 100025, 1 jan. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2022.100025

Reck, D. J. e Axhausen, K. W. *Subsidized ridesourcing for the first/last mile: how valuable for whom?* European Journal of Transport and Infrastructure Research, v. 20, n. 4, p. 59–77, 1 out. 2020. DOI: https://doi.org/10.18757/ejtir.2020.20.4.5314

Ronchi, S. e Arcidiacono, A.. *Adopting an Ecosystem Services-Based Approach for Flood Resilient Strategies: The Case of Rocinha Favela (Brazil)*. Sustainability, v. 11, n. 1, p. 4, jan. 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/su11010004

Scheltes, A.; De Almeida Correia, G. H.. *Exploring the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model: An application to Delft, Netherlands*. International Journal of Transportation Science and Technology, Connected and Automated Vehicles: Effects on Traffic, Mobility an Urban Design. v. 6, n. 1, p. 28–41, 1 jun. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.05.004

Shehadeh, K. S.; Wang, H. e Zhang, P.. *Fleet sizing and allocation for on-demand last-mile transportation systems*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 132, p. 103387, 1 nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103387

Siqueira, M. F.; Loureiro, C. F. G. e De Oliveira Neto, F. M.. *Modeling choice determinants for bicycle-bus integration in developing countries: Case study in Fortaleza, Brazil*. Journal of Transport Geography, v. 118, p. 103919, 1 jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103919

Tilahun, N., Thakuriah, P. V., Li, M., Keita, Y.. *Transit use and the work commute: Analyzing the role of last mile issues*. Journal of Transport Geography, v. 54, p. 359–368, 1 jun. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.06.021

Yan, Y.; Chen, Q.. *Spatial heterogeneity and nonlinearity study of bike-sharing to subway connections from the perspective of built environment*. Sustainable Cities and Society, v. 114, p. 105766, 1 nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105766

Yin, Z., Rybarczyk, G., Zheng, A., Su, L., Sun, B., Yan, X. *Shared micromobility as a first- and last-mile transit solution? Spatiotemporal insights from a novel dataset*. Journal of Transport Geography, v. 114, p. 103778, 1 jan.

2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103778

Zuniga-Garcia, N., Tec, M., Scott, J. G., Machemehl, R. B.. *Evaluation of e-scooters as transit last-mile solution*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 139, p. 103660, 1 jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103660

Zuo, T., Wei, H., Chen, N., Zhang, C.. *First-and-last mile solution via bicycling to improving transit accessibility and advancing transportation equity.* Cities, v. 99, p. 102614, 1 abr. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102614

Pedro de Souza Coelho (pedrodesouza@pbh.gov.br)
Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte (SUMOB). Rua dos Goitacazes, nº 1451, Barro Preto, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.
*Walysson Tangrins Martins (*walysson.martins@pbh.gov.br*)*
Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte (SUMOB). Rua dos Goitacazes, nº 1451, Barro Preto, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Kamilla Oliveira Silva (kamillaoliveira@pbh.gov.br)
Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte (SUMOB). Rua dos Goitacazes, nº 1451, Barro Preto, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Luís Otávio Rocha Castilho (luis.castilho@pbh.gov.br)
Superintendência de Mobilidade do Município de Belo Horizonte (SUMOB). Rua dos Goitacazes, nº 1451, Barro Preto, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG). Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil.
Matheus de Souza Coelho (matheuscoelho060@gmail.com)
Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG). Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil.

A FUNÇÃO SOCIAL DA PROPRIEDADE NO BAIRRO ALTO DAS POMBAS: ANÁLISE DOS INSTRUMENTOS DO ESTATUTO DA CIDADE E SUA APLICAÇÃO

Islam Dávila Menezes Pitanga, Liedson Souza Dias, Ricardo Luiz dos Santos Junior
Escola de Administração da Universidade Federal da Bahia

RESUMO
Este estudo analisa a função social da propriedade no bairro Alto das Pombas, Salvador, Bahia, investigando a aplicação dos instrumentos do Estatuto da Cidade e a dinâmica social local. A metodologia empregada é um estudo de caso, baseando-se em pesquisas bibliográfica e documental, utilizando dados secundários. Os resultados revelam um bairro com população predominantemente feminina e composta por pessoas pretas e pardas. Embora as moradias sejam adequadas e localizadas em uma região nobre com acesso a diversos serviços, uma parcela significativa dos responsáveis por domicílios não possui rendimento ou não trabalha. A atuação do Grupo de Mulheres do Alto das Pombas (Grumap) exemplificam a participação e a gestão social no bairro. Assim, esta análise evidencia os desafios persistentes, como a regularização fundiária e a infraestrutura urbana inadequada, apesar da localização estratégica, ressaltando a urgência de políticas públicas integradas para promover o direito à cidade e a inclusão social.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo representa uma das etapas avaliativas do componente curricular ADML41 - ACCS: QUALIDADE DO AMBIENTE URBANO NOS BAIRROS DE SALVADOR, oferecido no semestre 2024.2 pelo Departamento de Administração da Universidade Federal da Bahia (UFBA). A sigla ACCS representa a abreviação de Ação Curricular em Comunidade e em Sociedade, que é definida pela UFBA (2013), a partir da Resolução nº 01/2013 do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFBA, como um componente curricular no qual é desenvolvida ação de extensão universitária com o intuito de promover o intercâmbio, a reelaboração e a produção de conhecimento da realidade com perspectiva de transformação a partir de uma relação multidirecional com grupos da sociedade. No semestre acadêmico de 2024.2, essa relação foi estabelecida com o Grupo de Mulheres do Alto das Pombas (Grumap), visando a caracterização e problematização da realidade local, considerando as desigualdades de gênero, raça e classe social.

O bairro do Alto das Pombas, localizado em Salvador, Bahia, apresenta uma realidade socioeconômica complexa e desafiadora, embora localize-se em uma região nobre da cidade. Com uma população de 4.985 habitantes em 2022, majoritariamente feminina e composta por pessoas pretas e pardas, o bairro apresentou um crescimento populacional entre 2010 e 2022, na contramão da queda populacional em Salvador. Apesar de suas moradias demonstrarem boa qualidade construtiva, dados da pesquisa QUALISalvador (2022) revelam que 15,9% dos responsáveis por domicílios não possuem rendimento e 50% não trabalham, sendo a maioria (74,1%) mulheres. Classificado hoje como Zona Especial de Interesse Social (ZEIS), o bairro também é um exemplo de gestão democrática e participação comunitária, destacando-se a atuação do Grumap, que articula a luta por direitos e o empoderamento feminino.

A Constituição Federal de 1988 trouxe um marco legal transformador para o desenvolvimento urbano no Brasil. Ela estabeleceu diretrizes fundamentais para a política urbana, condicionando o direito de propriedade ao cumprimento de sua função social (Brasil, 1988). Em conformidade com esses princípios constitucionais, a Lei nº 10.257/2001, conhecida como Estatuto da Cidade, consolidou avanços significativos ao regulamentar os artigos 182 e 183 da Carta Magna. Essa legislação introduziu instrumentos e diretrizes voltados para a promoção do direito à cidade, a gestão democrática e o planejamento urbano sustentável (Brasil, 2001).

O Estatuto da Cidade, segundo Brasil (2001), adota como pilares conceitos como o direito à cidade, assegurando o acesso equitativo aos bens e serviços urbanos, e a função social da propriedade, requerendo que o uso da terra e dos imóveis atendam aos interesses coletivos. Além disso, a gestão democrática, um dos fundamentos da lei, incentiva a participação ativa da sociedade civil no processo de tomada de decisões sobre o futuro das cidades. Assim, este artigo tem como objetivo analisar o uso da propriedade e a dinâmica social no bairro do Alto das Pombas, tendo em vista o atingimento de sua função social.

Esta pesquisa se justifica pela imperatividade de analisar a aplicação dos marcos legais da política urbana brasileira em realidades complexas como a do Alto das Pombas. Sua relevância emerge da capacidade de evidenciar os desafios e as potencialidades de um bairro que, embora popular, está inserido em uma área nobre

de Salvador, destacando a persistência de questões como a regularização fundiária, a infraestrutura urbana inadequada e o desemprego, apesar de sua localização estratégica. A contribuição teórica da pesquisa reside na aplicação e análise de conceitos e instrumentos fundamentais da Constituição Federal de 1988 e do Estatuto da Cidade, como a função social da propriedade, o direito à cidade e a gestão democrática.

Este artigo conta com cinco seções: I) introdução, que apresentou a origem dos conceitos mobilizados para a realização das análises; II) metodologia, que apresenta os tipos de pesquisas utilizados para a realização deste estudo de caso; III) resultados, que apresenta as análises dados socioeconômicos, breve histórico e a (não) aplicação de instrumentos do Estatuto da Cidade no bairro; IV) conclusão e V) referências bibliográficas.

2. METODOLOGIA

Este artigo é um estudo de caso que adota uma metodologia baseada nas pesquisas bibliográfica e documental, utilizando de dados secundários para a viabilidade da pesquisa. A partir da pesquisa bibliográfica, o trabalho de Pellegrino (2015) contribui significativamente com informações sobre as características do bairro, sua natureza essencialmente residencial, a localização de estabelecimentos comerciais, a disponibilidade de serviços públicos, a delimitação de suas divisas e a história do seu nome. Além disso, o autor também é fonte para a situação fundiária do terreno, indicando a permuta entre a Santa Casa de Misericórdia, antiga proprietária, e a prefeitura, bem como a evolução das classificações urbanísticas do bairro.

Em relação à pesquisa documental, a base da análise é fornecida por um conjunto robusto de fontes de dados. Dados demográficos e socioeconômicos foram extraídos do Censo Demográfico de 2010 e 2022 do IBGE, que detalham a população do bairro, sua composição por gênero e raça, e tendências de crescimento populacional. Para a caracterização da renda e das condições domiciliares, o artigo utiliza a Pesquisa QUALISalvador (2022), que aplicou 340 questionários no bairro do Alto das Pombas. Essa pesquisa específica forneceu dados sobre a distribuição da renda do responsável pelo domicílio, o tempo de deslocamento casa-trabalho e a qualidade física dos imóveis (material predominante, revestimento, acesso a banheiro completo).

A partir desses dados, são aplicados princípios e instrumentos legais da Constituição Federal de 1988 e do Estatuto da Cidade – como o direito à cidade, a função social da propriedade e a gestão democrática – para avaliar a realidade do bairro e propor reflexões sobre os desafios e potencialidades urbanas. O método utilizado permitiu uma abordagem interpretativa e contextualizada, sem a necessidade de coleta de dados primários. Em suma, a metodologia empregada no artigo caracteriza-se pela compilação e análise de informações de fontes secundárias para construir um panorama abrangente do bairro Alto das Pombas.

3. RESULTADOS

O bairro Alto das Pombas, localizado em Salvador, Bahia, Brasil, ilustra uma realidade socioeconômica marcada por desafios significativos. Consoante dados do Censo 2022 do IBGE, o bairro abriga uma população de 4.985 habitantes, sendo 54,3% mulheres e 45,6% homens, composta majoritariamente por pessoas pretas (49,03%) e pardas (42,74%) (Brasil, 2022). Comparada ao Censo 2010, a população aumentou 30,4%, contrariando a tendência de queda populacional em Salvador que foi de 9,6%, maior taxa de redução entre as capitais do país (Brasil, 2022). Nesse sentido, o Censo 2010 apontava que o bairro abrigava uma população de 3.823 habitantes, composta majoritariamente por pessoas pardas (46.56%) e pretas (43,5%) (Brasil, 2010).

Em se tratando da renda dessa população, dados do Censo de 2010 indicam que a renda média na época era de R$ 1.048,00 (Brasil, 2010). Em janeiro de 2010, o salário-mínimo tinha o valor de R$ 510,00. Posteriormente, a Pesquisa QUALISalvador aplicou 340 questionários no bairro da Alto das Pombas, sendo a faixa da renda do(a) responsável pelo domicílio uma das 62 duas questões realizadas (QUALISalvador, 2022). O mês de referência adotado para a pesquisa foi o de janeiro de 2018, sendo o salário-mínimo de R$ 954,00. A Figura 1 apresenta a distribuição das respostas por faixa de renda. Assim, das 340 pessoas que participaram da pesquisa QUALISalvador no referido bairro, 200 responsáveis pelos domicílios, 58% da amostra, pertenciam a duas faixas de renda, que variam entre R$ 477,01 e R$ 1908,00. Acima dessas faixas, 21,5% dos lares têm seu responsável com renda superior a R$ 1908,01. Entretanto, 15,9% dos entrevistados declararam que o responsável pelo domicílio não aufere rendimento.



Figura 1: Renda no bairro Alto das Pombas
Fonte: QUALISalvador (2022)

Pellegrino (2015) indica que o bairro é essencialmente residencial e que concentra estabelecimentos comerciais na via principal, Rua Teixeira Mendes. Entre os serviços públicos disponíveis estão a Unidade de Saúde e as escolas municipais Tertuliano de Góes e Senhora de Fátima. Ele faz divisa com a Federação e o Calabar e se destaca como uma área popular localizada em uma região nobre da cidade, circundada pelo Jardim Apipema, Centenário, Ondina, vizinhança apresentada na Figura 2. O nome do bairro surgiu porque muitos caçadores frequentavam a área elevada para caçar pombos. O bairro tem uma única entrada para veículos, enquanto as outras vias levam ao Calabar e à Rua Sabino Silva, sendo acessíveis apenas para pedestres. O largo do Alto das Pombas é conhecido por ser um espaço de lazer, especialmente para rodas de samba, além de atividades culinárias e ações políticas organizadas por entidades comunitárias (Pellegrino, 2015).

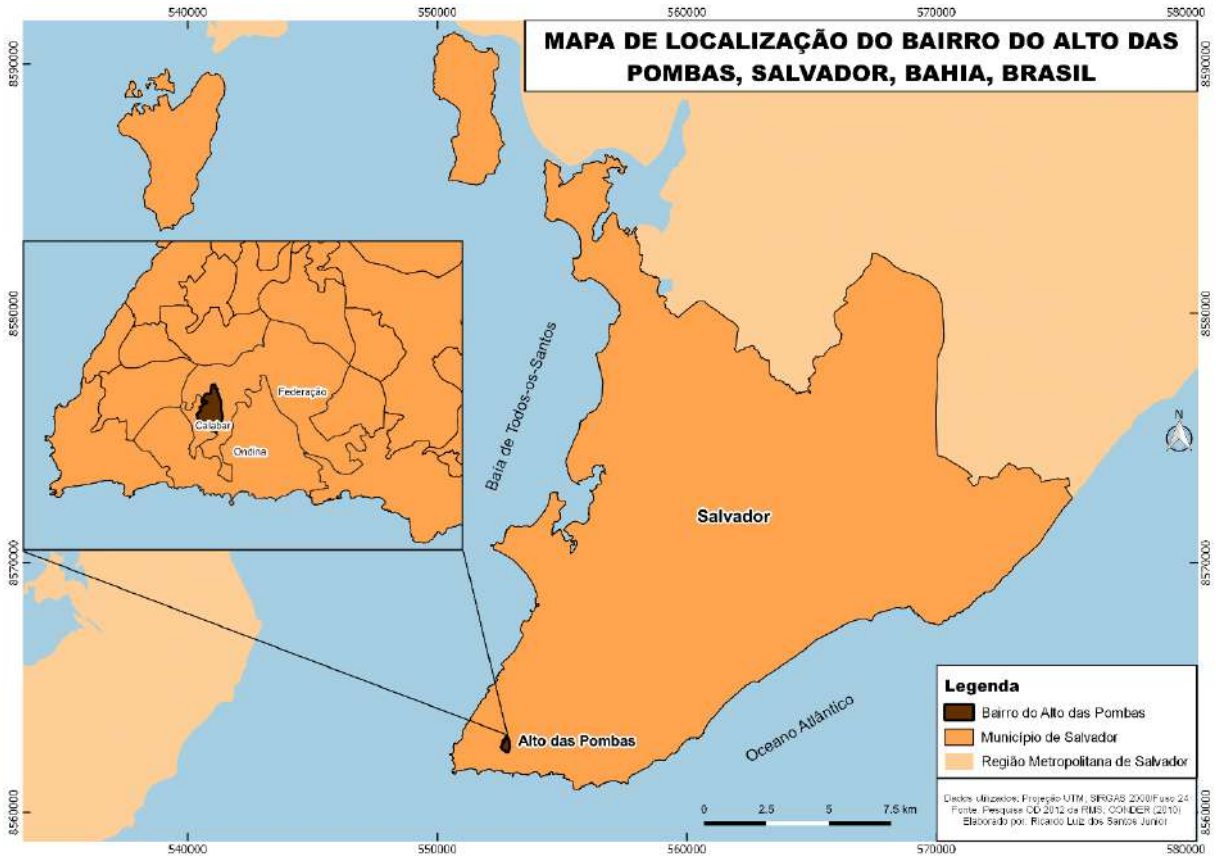


Figura 2: Localização do bairro do Alto das Pombas

A regularização fundiária, aspecto crucial para a efetivação do direito à cidade, garante a segurança da posse e o acesso a serviços públicos. Assim, ela contribui para a melhoria das condições de vida da população e a integração do bairro à cidade formal. De acordo com Pellegrino (2015), a comunidade Alto das Pombas, situada no centro de Salvador, foi considerada pela Lei de Ordenamento do Uso e Ocupação do Solo de 1984 (LOUOS - Lei 3377/84) em área designada como Área de Proteção Socioecológica (APSE). Contudo, essa classificação foi modificada pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de 2008 (PDDU - Lei 7400/08),

passando a ser reconhecida como ZEIS – Zona Especial de Interesse Social. Uma pequena parte próxima ao Cemitério do Campo Santo, porém, é categorizada como ZPR – Zona Predominantemente Residencial, paradoxalmente abrigando a porção mais comercial e de serviço. Sobre o título de propriedade do terreno:

> A situação fundiária atual, segundo pesquisa feita pela Prefeitura de Salvador (através da CRF - Coordenadoria de Regularização Fundiária - da SINDEC - Secretaria de Infraestrutura e Defesa Civil), indica que o terreno onde se insere a comunidade é de propriedade da Santa Casa de Misericórdia, sendo permutado com a prefeitura, a partir de dezembro 2014, para programa de regularização fundiária para a região (Pellegrino, 2015, p. 17).

Outro conceito estabelecido pelo Estatuto da Cidade, em seu artigo 5º, é o da função social da propriedade, condicionando o direito de propriedade ao atendimento das necessidades coletivas, promovendo o bem-estar da comunidade e o desenvolvimento urbano sustentável. Para o referido autor, o bairro tem sua ocupação predominantemente usada para a habitação, sendo a sua localização um diferencial para o acesso dos moradores aos diversos serviços públicos, áreas de lazer, espaços culturais e praias presentes tanto no Centro Tradicional da Cidade como na Orla Atlântica. Considerando o QUALISalvador (2022), 34,7% dos responsáveis pelo domicílio no bairro se deslocam em até 45 minutos de casa até o trabalho e 15,3% levam entre 46 minutos e 2 horas para realizar o mesmo trecho, reforçando a centralidade do bairro, ver Figura 3. Entretanto, um dado alarmante dessa pesquisa de tempo de deslocamento casa-trabalho dos responsáveis pelo domicílio é que 50% desses responsáveis não trabalham, 126 mulheres (74,1%) e 44 homens (25,9%).

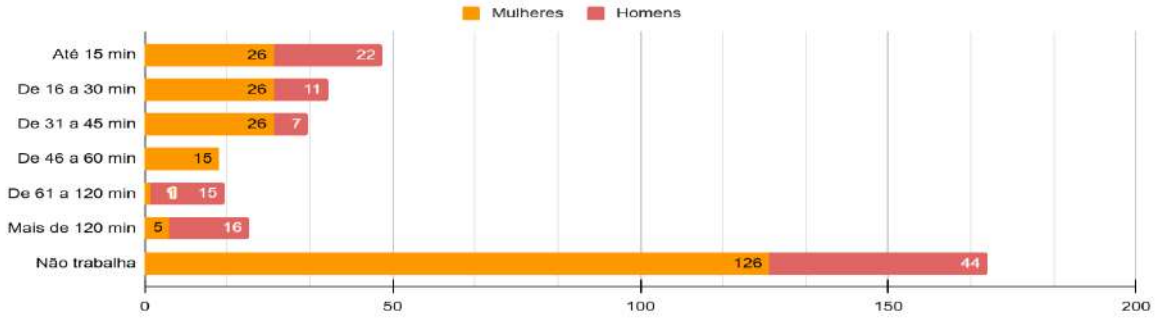


Figura 3: Tempo de deslocamento do domicílio até o trabalho
Fonte: QUALISalvador (2022)

Segundo o QUALISalvador (2022), o bairro é caracterizado por possuir 97,1% dos domicílios com material predominante de blocos; 91,2% possuem revestimento/reboco por fora e por dentro do imóvel e 98,5% possuem banheiro com vaso sanitário, pia e chuveiro. Essas taxas elevadas representam ótimos resultados para um bairro considerado popular, pois, em consonância com IBGE (2020), esses tipos de estrutura física representam os critérios para classificar os imóveis como adequados ou inadequados. No Brasil, A Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) 2017-2018 constatou que 23,5% da população não reside em moradias adequadas, sendo que 15,7% desses domicílios estavam na zona urbana e 7,8% na zona rural (IBGE, 2020).

Em se tratando da área comercial e de serviços, é possível verificar tipos como: açougue; frutaria; floricultura, mercadinho; padaria; oficina mecânica; barbearia; manicure; conserto de móveis; curso de artes e ofícios. Entretanto, esses estabelecimentos estão localizados na via de acesso do bairro, Rua Teixeira Mendes, além disso, esses pontos de comercialização não possuem estacionamento na edificação ou acima da calçada, através de recuos (Pellegrino, 2015). Nesse contexto de baixa infraestrutura para estacionamento de veículos, seja de consumidores como de moradores do bairro, os condutores dos automóveis acabam realizando suas paradas nas calçadas, dificultando assim a realização de viagens a pé. Particularmente, essa situação impacta mais nos deslocamentos de pessoas com deficiência, crianças (10,4% da população do bairro) e idosos (16,2% da população do bairro), porcentagens extraídas do Censo do IBGE 2022 (Brasil, 2022). Diante dessa caracterização Pellegrino (2015) conclui que o bairro apresenta poucos vazios urbanos.

A gestão democrática da cidade, conceito igualmente importante aos anteriores, por sua vez, preconiza a participação da sociedade civil no planejamento e na gestão urbana. De acordo com Gomes (2021), no Alto

das Pombas, o Grupo de Mulheres do Alto das Pombas (Grumap) tem desempenhado uma atuação política significativa, consolidando-se como um coletivo de resistência e transformação social em seu território. Com 39 anos de história, o grupo articula ações voltadas à garantia de direitos fundamentais, como saúde, educação e lazer, mobilizando estratégias inovadoras para manter o diálogo com a comunidade. Iniciativas como o podcast e o webdocumentário "Grumap Corpo e Memória" exemplificam o uso criativo de mídias para promover conscientização e fortalecer vínculos comunitários. Além disso, o coletivo protagoniza atividades que destacam o papel das mulheres negras na luta contra as desigualdades. Por meio de formações políticas, apoio emergencial e espaços de cuidado, o Grumap reafirma seu compromisso com o empoderamento feminino e o enfrentamento das desigualdades sociais (Gomes, 2021).

4. CONCLUSÃO

O bairro Alto das Pombas exemplifica os desafios e as potencialidades das áreas urbanas brasileiras em busca do cumprimento de sua função social. Apesar de sua localização privilegiada e da presença de iniciativas como a do Grumap, que fortalece os laços comunitários e promove a gestão democrática, persistem questões estruturais, como a regularização fundiária, a precariedade da infraestrutura urbana e a necessidade de ampliação do acesso a serviços essenciais. Tais fatores evidenciam a urgência de políticas públicas que articulem as diretrizes do Estatuto da Cidade com ações concretas e sustentáveis. Portanto, o estudo de caso do Alto das Pombas destaca a importância de uma abordagem integrada para promover o direito à cidade. É fundamental consolidar a participação ativa da comunidade no planejamento urbano, enquanto se enfrentam questões como o desemprego, a mobilidade urbana e a inclusão social. Somente assim será possível transformar o potencial do bairro em um exemplo de urbanização equitativa e sustentável, reafirmando o compromisso com os princípios constitucionais de justiça social e cidadania plena.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. [Constituição (1988)]. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal, 2016. 496 p.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE. 2010.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Censo Demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE. 2022.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. *Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências*. Brasília, DF: Presidência da República, 2001.

GOMES, Brenda. *Mulheres têm atuação forte no Alto das Pombas*. A TARDE, Salvador, 30 jul. 2021. Disponível em: https://atarde.com.br/bahia/bahiasalvador/mulheres-tem-atuacao-forte-no-alto-das-pombas-1165844?_=amp (acesso em 10/01/2025).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *POF 2017-2018*: cerca de ¼ da renda disponível das famílias brasileiras é não monetária. Agência Notícias IBGE, Estatísticas Sociais, Rio de Janeiro, 25 nov. 2020. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/29490-pof-2017-2018-cerca-de-da-renda-disponivel-das-familias-brasileiras-e-nao-monetaria#:~:text=A%20Renda%20Dispon%C3%ADvel%20Familiar%20Per,valor%20de%20aluguel%20sugerido%20pelo (acesso em 17/01/2025).

PELLEGRINO, Paolo Giovanni P. Diretrizes para ZEIS Calabar / Alto das Pombas – construção do Plano de Bairro. 2015. Monografia (Especialização em Assistência Técnica para Habitação e Direito à Cidade) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

QUALISALVADOR (Elisabete Santos … [et al.], organizadores). *QUALISalvador*: qualidade do ambiente urbano na cidade da Bahia. 2. ed. Salvador: Edufba, 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. Resolução nº 01/2013, de 25 de fevereiro de 2013, do Conselho Superior de Ensino, Pesquisa e Extensão. *Regulamenta o aproveitamento da Ação Curricular em Comunidade e em Sociedade (ACCS) para integralização curricular dos Cursos de Graduação e Pós Graduação da Universidade Federal da Bahia*. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2013.

Islam Dávila Menezes Pitanga (islam.ifba@gmail.com)
Universidade Federal da Bahia, Escola de Administração, Av. Reitor Miguel Calmon, s/n, Vale do Canela, 40110-903, Salvador, Bahia, Brasil
Liedson Souza Dias (liedsondias@ufba.br)
Universidade Federal da Bahia, Escola de Administração, Av. Reitor Miguel Calmon, s/n, Vale do Canela, 40110-903, Salvador, Bahia, Brasil
Ricardo Luiz dos Santos Junior (ricardo.luiz@ufba.br)
Universidade Federal da Bahia, Escola de Administração, Av. Reitor Miguel Calmon, s/n, Vale do Canela, 40110-903, Salvador, Bahia, Brasil

A QUALIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE SOB A PERSPECTIVA DE GEHL

Ketheleen Barbosa Silveira, Elisama Silva Lobo, Giovana de Campos Lima Bezerra Oliveira, Luan Castro Melo Santos, Andersonn Magalhães de Oliveira
Universidade Federal do Sul da Bahia

RESUMO
Este artigo analisa a qualidade de quatro equipamentos urbanos de transporte nas cidades de Itabuna e Ilhéus (BA) com base nos 12 critérios propostos por Jan Gehl, focados nas temáticas segurança, conforto e experiência do usuário. A metodologia adotada envolveu observação direta, atribuição de notas de 1 a 5 para cada critério e posterior análise comparativa por meio de gráficos e tabelas. Os resultados revelam diferenças significativas entre os equipamentos avaliados: o aeroporto de Ilhéus apresentou o melhor desempenho, enquanto o terminal urbano obteve a menor pontuação. As análises reforçam evidências da literatura sobre os impactos da infraestrutura urbana na percepção de segurança e bem-estar. Conclui-se que intervenções pontuais podem qualificar significativamente esses espaços. O estudo contribui para o debate sobre mobilidade urbana humanizada e sugere a adoção de abordagens qualitativas no planejamento de equipamentos de transporte.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A qualidade dos espaços urbanos e da infraestrutura é fundamental para garantir segurança, conforto e uma experiência positiva para os usuários. Como exemplo, entre os elementos que compõem essa qualidade, fachadas ativas se destacam por contribuírem com a vivacidade e a sociabilidade dos espaços, reforçando a sensação de segurança associada ao sentimento de familiaridade (HEFFERNAN et al., 2013; BRANDS et al., 2020). Essa sensação de pertencimento se fortalece ainda mais quando integrada a uma infraestrutura urbana ampla e funcional. Uma rede que articule moradia adequada, sistemas de transporte eficientes e acesso a áreas verdes favorece a saúde pública e estimula a mobilidade ativa, como caminhadas e ciclismo (RAEA et al., 2020; GÜNTHER e KREMS, 2022).

Quando essas condições não são atendidas de forma integrada, os espaços urbanos tendem a ser subutilizados e a perder qualidade. O desconforto causado por poluição, ausência de vegetação e clima adverso agrava essa situação (ELYAN, 2021). Soma-se a isso a insegurança percebida por pedestres, associada ao medo de acidentes, à má conservação da infraestrutura e à presença de criminalidade, agravada por fatores como iluminação inadequada, ausência de mobiliário urbano e excesso de ruído (FERREIRA et al., 2022; ZYSK, 2024). Diante desse conjunto de fatores, torna-se evidente a necessidade de integrar os aspectos físicos aos sociais no planejamento urbano, a fim de garantir espaços mais seguros, confortáveis e acolhedores para todos.

Diante da importância dessas dimensões nos espaços urbanos, os doze critérios de qualidade propostos por Jan Gehl (2013) têm sido amplamente utilizados para avaliar e qualificar ambientes urbanos sob a perspectiva da experiência humana. Focados em aspectos como conforto, segurança e estímulo à permanência dos pedestres, esses critérios têm sido aplicados com sucesso em diferentes contextos urbanos, como em São Paulo (MINUCCI e RIGHI, 2016) e no Cairo (MURSHED et al., 2021), contribuindo para melhorias na vitalidade e no desempenho dos espaços públicos. Sua relevância permanece mesmo em cenários recentes, como o pós-pandemia, em que estudos apontam sua eficácia para avaliar a atratividade e a adaptação dos espaços públicos às novas dinâmicas sociais (CHĘĆ-MAŁYSZEK, 2022).

Além disso, esses critérios têm se mostrado eficazes na avaliação de infraestrutura de transporte por priorizarem o design centrado no ser humano e a caminhabilidade, favorecendo cidades mais vivas e acessíveis (MATAN e NEWMAN, 2012). Ao valorizar a observação da vida pública, sua abordagem oferece suporte ao planejamento urbano orientado à experiência dos usuários (GEHL e SVARRE, 2013). Essa perspectiva está alinhada às novas diretrizes de mobilidade, que incorporam metas de coesão social, sustentabilidade e qualidade ambiental (SUÁREZ, 2011).

Dado o contexto, este estudo parte do reconhecimento de que a qualidade dos equipamentos urbanos de transporte pode comprometer a experiência dos usuários e seu potencial de permanência nesses locais. Sendo assim, a pergunta que orienta a investigação é: como a qualidade desses equipamentos se diferencia quanto ao atendimento dos 12 critérios de Jan Gehl? Para isso, o estudo tem como objetivo avaliar e comparar a qualidade dos equipamentos urbanos de transporte, utilizando como referência os critérios de Gehl, e tomando como área de ensaio as cidades de Itabuna e Ilhéus no sul da Bahia. A metodologia adotada envolve a atribuição de pesos a cada critério, com base na relevância percebida, seguida de uma avaliação comparativa entre os equipamentos por meio de pontuações e representações gráficas, permitindo a visualização de padrões e a identificação de fragilidades nos espaços analisados.

1.1. Princípios e Critérios de Qualidade de Gehl

Jan Gehl defende a construção de cidades em escala humana que priorizem pedestres e promovam interações sociais (GEHL, 2015). Ele critica o planejamento urbano centrado no automóvel e propõe ambientes urbanos habitáveis, seguros, sustentáveis e saudáveis (GEHL, 2013, 2016). A sua abordagem valoriza a experiência dos espaços urbanos na velocidade da caminhada, integrando funções em vez de segregá-las e criando ambientes convidativos que atraem as pessoas, em oposição a espaços que as repelem (GEHL, 2015; 2016).
Esses métodos baseiam-se em observações detalhadas da dinâmica urbana para desenvolver estratégias que transformem paisagens disfuncionais em ambientes mais humanos e acolhedores (GEHL, 2016). Ele destaca a importância dos espaços públicos, da altura adequada dos edifícios e da redução de obstáculos para pedestres e ciclistas (GEHL, 2013).
Para isso, Gehl propõe cinco passos essenciais para um urbanismo eficiente: distribuir funções para garantir menores distâncias e massa crítica; integrar usos para versatilidade e segurança; projetar ambientes convidativos; criar espaços de transição que conectem edifícios e áreas; e reforçar convites à permanência, aumentando a vitalidade dos espaços públicos (GEHL, 2013).
No âmbito dessa visão humanizada do espaço urbano, os 12 Critérios de Qualidade de Gehl (2013) avaliam o ambiente ao nível dos olhos, garantindo conforto e incentivando atividades como caminhar, permanecer, sentar-se, observar, conversar e ouvir. Estes critérios se dividem em três áreas principais, onde:

- Proteção: Abrange segurança contra tráfego, crime e condições sensoriais adversas;
- Conforto: envolve condições para caminhar, permanecer em pé, sentar-se, observar, ouvir e praticar atividades físicas;
- Lazer: Considera aspectos como a escala humana dos edifícios, aproveitamento climático e experiências sensoriais positivas.

Esses critérios são fundamentais para projetar espaços urbanos que favoreçam experiências positivas e promovam a qualidade de vida das pessoas.

2. METODOLOGIA

A metodologia partiu da seleção dos equipamentos urbanos de transporte avaliados: rodoviária de Itabuna, rodoviária de Ilhéus, aeroporto de Ilhéus e terminal urbano de Ilhéus. A escolha recaiu sobre esses espaços por representarem os principais pontos de conexão e circulação nas duas cidades, sendo estratégicos para observar aspectos de conforto, segurança e permanência.
Na etapa seguinte, realizou-se a visita a campo, com observação direta das condições físicas e funcionais de cada equipamento. A partir dessa observação, os autores preencheram fichas descritivas baseadas nos 12 critérios de qualidade de Gehl (2013). Para cada critério, atribuiu-se uma nota de 1 a 5, sendo 1 quando o espaço não atende ao critério, 3 quando apresenta condição neutra ou indiferente, e 5 quando atende plenamente ao aspecto avaliado. Sendo os pesos 2 e 4 intermediários. Os autores são usuários desses espaços e fizeram essas avaliações no contexto de uma prática numa ação de extensão universitária.
Embora que aeroportos em geral possuírem critérios de segurança e conforto mais elevados que terminais rodoviários, se decidiu considerar o aeroporto de Ilhéus na análise apenas utilizar seus resultados como parâmetro.
Com base nas notas atribuídas, gerou-se a tabela com as pontuações ponderadas e, posteriormente, o diagrama do tipo radar para resumir cada equipamento. Esse gráfico permite comparar os espaços de forma visual e sintética, destacando convergências e disparidades no atendimento aos critérios de qualidade desses espaços.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as notas atribuídas aos quatro equipamentos urbanos de transporte das cidades de Itabuna e Ilhéus, com base na aplicação dos 12 critérios propostos por Gehl (2013). O Aeroporto de Ilhéus obteve a maior pontuação total (47), seguido pela Rodoviária de Itabuna (34), Rodoviária de Ilhéus (30) e, por último, o Terminal Urbano de Ilhéus (20). Esses resultados indicam diferentes padrões de qualidade e sugerem variações importantes na experiência proporcionada por cada espaço.

Tabela 1: Pontuações dos equipamentos urbanos de transporte com base nos critérios de Gehl.

12 CRITERIO DE GEHL	RODOVIÁRIA ITABUNA	RODOVIÁRIA ILHÉUS	TERMINAL URB. ILHEUS	AEROPORTO ILHÉUS
1- Proteção Contra o Tráfego e Acidentes	4	4	2	5

2- Proteção Contra o Crime e a Violência	3	2	2	5
3- Proteção Contra Experiências Sensoriais Desconfortáveis	3	2	1	5
4- Oportunidades de Caminhar	4	3	1	4
5- Oportunidades para Permanecer em Pé	2	2	1	3
6- Oportunidades para Sentar-se	3	2	1	4
7- Oportunidades para Ver	2	1	1	4
8- Oportunidades para Ouvir e Conversar	2	3	2	4
9- Oportunidades para Brincar e Praticar Atividades Física	1	1	1	1
10- Escala	4	4	3	5
11- Oportunidades de Aproveitar os aspectos positivos do Clima	3	3	4	2
12- Experiências Sensoriais positivas e desconfortáveis	3	3	1	5
Somatório	**34**	**30**	**20**	**47**

A Figura 1 apresenta o gráfico radar com as pontuações distribuídas pelos 12 critérios, permitindo visualizar os contrastes entre os equipamentos. O aeroporto destaca-se com altos índices em quase todos os critérios, sobretudo nos relacionados à proteção (contra tráfego, criminalidade e desconforto sensorial) e conforto (escala, oportunidades de caminhar e se sentar). Por outro lado, o Terminal Urbano de Ilhéus apresenta desempenhos consistentemente baixos, indicando fragilidade em aspectos fundamentais para a permanência e bem-estar dos usuários.

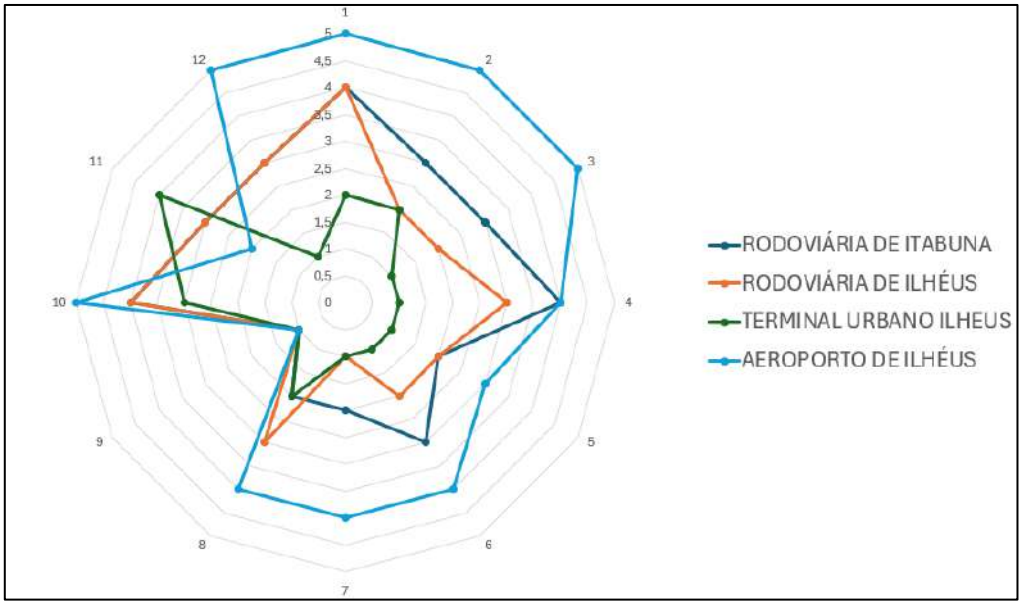


Figura 1: Gráfico radar comparativo dos quatro equipamentos urbanos de transporte segundo os critérios de Gehl.

Ao desagregar os resultados, observa-se que os critérios relacionados à proteção (itens 1 a 3) foram melhor atendidos pelo aeroporto, especialmente quanto à segurança contra tráfego (nota 5) e conforto sensorial (nota 5), corroborando as observações de Günther e Krems (2022) sobre o impacto positivo da infraestrutura bem mantida na percepção ambiental. Já o Terminal Urbano de Ilhéus apresentou notas mínimas nesses mesmos itens, refletindo problemas como má iluminação, poluição visual e baixa segurança, como discutido por Ferreira et al. (2022).

Nos critérios de oportunidade de permanência (itens 4 a 8), os desempenhos foram medianos na maioria dos equipamentos, com exceção do Terminal Urbano, que teve notas mínimas. O Aeroporto novamente se sobressai, com notas 4 ou 5 na maioria dos subitens. Essa tendência sugere que espaços com boa manutenção e ambiente controlado favorecem a permanência, alinhando-se às ideias de Heffernan et al. (2013) e Brands et al. (2020) sobre a importância do sentimento de segurança e pertencimento.

Nos critérios de lazer e conforto ambiental (itens 9 a 12), todos os equipamentos tiveram nota 1 no critério

"Brincar e praticar atividades físicas", evidenciando ausência de espaços que estimulem usos recreativos, o que reforça a crítica de Elyan (2021) sobre a subutilização de espaços urbanos mal adaptados às necessidades humanas. O aeroporto obteve o melhor desempenho em conforto climático e experiências sensoriais positivas, enquanto o terminal urbano foi o único a alcançar nota 4 no aproveitamento do clima, possivelmente relacionado à sua ventilação natural e posição urbana.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar a qualidade dos equipamentos urbanos de transporte das cidades de Itabuna e Ilhéus com base nos 12 critérios de Jan Gehl (2013), que priorizam o conforto, a segurança e a permanência dos usuários. A metodologia adotada, pautada em observações diretas e atribuição de notas, permitiu captar nuances relevantes na experiência proporcionada por cada espaço e atendeu plenamente à pergunta de pesquisa ao evidenciar diferenças expressivas entre os equipamentos analisados.

Os resultados confirmam a hipótese inicial de que a qualidade desses espaços influencia diretamente a experiência dos usuários. O Aeroporto de Ilhéus, com a maior pontuação geral, apresentou melhor desempenho nos critérios relacionados à proteção, conforto sensorial e escala, corroborando estudos que indicam a importância de uma infraestrutura bem mantida na percepção ambiental e na segurança (GÜNTHER e KREMS, 2022; FERREIRA et al., 2022). Em contraste, o Terminal Urbano de Ilhéus obteve os menores índices em quase todos os critérios, ilustrando como a precariedade da infraestrutura pode comprometer a vivacidade urbana e levar à subutilização desses espaços (ELYAN, 2021).

Além disso, os resultados alinham-se às evidências de HEFFERNAN et al. (2013) e BRANDS et al. (2020), ao demonstrar que locais com melhores condições físicas tendem a promover maior sensação de segurança e pertencimento. Por fim, a abordagem metodológica adotada, baseada na sistematização dos critérios de Gehl, mostrou-se eficaz na avaliação integrada de equipamentos urbanos de transporte, o que pode oferecer subsídios técnicos e conceituais para gestores e planejadores urbanos orientarem intervenções com foco na qualidade da experiência humana nesses espaços públicos.

A melhoria da qualidade ambiental e funcional desses espaços estudados exige ações como requalificação dos pontos de permanência, como bancos, áreas sombreadas e mobiliário urbano, reforço da segurança por meio de iluminação, monitoramento e presença institucional, e estratégias de ordenamento urbano, como a retirada de obstáculos e a organização do comércio informal. Além disso, a criação de elementos paisagísticos e sensoriais, como vegetação, sinalização clara e espaços para descanso, pode ampliar o conforto e estimular o uso desses ambientes, alinhando-os às recomendações de Gehl (2013) e às evidências apontadas por autores como Elyan (2021) e Günther e Krems (2022).

Por fim, cabe destacar que o presente estudo se limita a uma análise pontual, com base na observação direta e na aplicação de critérios qualitativos, o que pode restringir a generalização dos resultados. Recomenda-se que estudos futuros ampliem a amostra, incorporem métodos participativos com usuários e aprofundem a análise sensorial e comportamental nos equipamentos urbanos. A combinação de abordagens qualitativas e quantitativas poderá enriquecer o diagnóstico e apoiar essas decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDS, Jelle; DOORN, Janne van; SPITHOVEN, Remco. Supplemental safety? Exploring experienced safety in relation to other qualities of successful public spaces. Journal of Urban Design, v. 26, n. 1, p. 59-74, 2021.

CHĘĆ-MAŁYSZEK, Agnieszka. Criteria of livable public spaces quality. Case study analysis on the example of selected public spaces Lublin, Poland. Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych, v. 17, n. 2, p. 55-75, 2021.

ELYAN, Sameh Mohamed Hamed. Urban Spaces and Its Impact on Social Activities. Urban and Regional Planning, 6(4), 123-134. 2021. https://doi.org/10.11648/j.urp.20210604.14

FERREIRA, M. C.; COSTA, P. D.; ABRANTES, D.; HORA, J.; FELICIO, S.; COIMBRA, M.; DIAS, T. G. Identifying the determinants and understanding their effect on the perception of safety, security, and comfort by pedestrians and cyclists: A systematic review. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, v. 91, 2022.

GEHL, Jan. Cidades para pessoas. São Paulo: Perspectiva, 2013.

GEHL, Jan. Städte für Menschen. Berlin, Germany: jovis, 2016.

GEHL, Jan. Three Types of Outdoor Activities,"“Life Between Buildings," and “Outdoor Activities and the Quality of Outdoor Space. In: The city reader. Routledge, p. 652-661. 2015.

GEHL, Jan; SVARRE, Birgitte. How to study public life. Washington, DC: Island press, 2013.

GÜNTHER, Madlen; KREMS, Josef. The Liveable City-How Effective Planning for Infrastructure and Personal Mobility Can Improve People's Experiences of Urban Life. Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure, v. 58, n. 58, 2022.

HEFFERNAN, Emma; HEFFERNAN, Troy; PAN, Wei. The relationship between the quality of active frontages and public perceptions of public spaces. Urban Design International, v. 19, p. 92-102, 2014.

MATAN, Annie; NEWMAN, Peter. Jan Gehl and new visions for walkable Australian cities. World Transport Policy & Practice, v. 17, n. 4, p. 30-41, 2012.

MINUCCI, Ana Maria Sala; RIGHI, Roberto. Evaluating the quality standard of Oscar Freire Street public space, in São Paulo, Brazil. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). v. 3 n. 4, 2016.

MURSHED, Sally M.; OUF, Ahmed M.; ZAFARANY, Abbas F. Enabling quality of urban spaces in Cairo's new suburban settlements: a community character approach for New Cairo, Egypt. Journal of Engineering and Applied Science, v. 68, n. 1, p. 28, 2021.

RAEA, Salem Mohammad et al. Designing healthy cities: linking infrastructure to quality of life. International journal of health sciences, v. 4, p. 509-529, 2020.

SUÁREZ, Elena López. Assessment of Transport Infrastructure Plans: a Strategic Approach integrating efficiency, cohesion and environmental aspects. Madrid University of Politics, Madrid, Spain, 2007.

ZYSK, Elżbieta. Identification of Determinants That Reduce Women's Safety and Comfort in Urban Public Spaces (UPS). Sustainability, v. 16, n. 22, p. 10075, 2024.

Ketheleen Barbosa Silveira (ketheleenbs@gmail.com), *Elisama Silva Lobo* (samalobo188@gmail.com), *Giovana de Campos Lima Bezerra Oliveira* (giovanac915@gmail.com), *Luan Castro Melo Santos* (luan.castro@gfe.ufsb.edu.br), *Andersonn Magalhães de Oliveira* (andersonn.magalhaes@ufsb.edu.br)
Universidade Federal do Sul da Bahia – Centro de Formação em Tecno-Ciências e Inovação (CFTCI) - UFSB – CJA.

ASSOCIAÇÃO ENTRE ACESSIBILIDADE E POBREZA: UM ESTUDO COM MODELAGEM DE EQUAÇÕES ESTRUTURAIS

Cesario Belo Torres Junior, Francisco Gildemir F. Silva
Universidade Federal do Ceará – UFC, Universidade Federal do Ceará – UFC/Universidade de Brasília – UnB

RESUMO
Em contextos marcados por forte segregação territorial, a restrição ao acesso pode aprofundar condições de vulnerabilidade e limitar a ascensão socioeconômica de populações mais pobres. Neste estudo, investigou-se a associação entre acessibilidade e pobreza por meio da elaboração de um *path diagram* (diagrama de trajetórias) e da aplicação da Modelagem de Equações Estruturais (Structural Equation Modeling – SEM). A acessibilidade foi observada com base na métrica T_OCU, enquanto a pobreza foi avaliada a partir de um índice sintético P, controlado por variáveis de desenvolvimento AS. A análise demonstrou que a T_OCU exerce influência negativa sobre os Indices de Desenvolvimento Humano, indicando que maiores restrições à acessibilidade estão associadas a menores níveis de desenvolvimento humano e consequentemente maiores índices de pobreza. O objetivo foi contribuir para o entendimento dos efeitos estruturais da acessibilidade sobre a dinâmica da pobreza.

1. INTRODUÇÃO

Vários estudos referem-se ao problema da pobreza no transporte, incluindo aqueles escritos por Lucas (2016). As pesquisas em acessibilidade urbana têm revelado importantes lacunas no planejamento de transportes, especialmente no que se refere ao acesso equitativo a serviços e oportunidades e a desigualdade, a justiça e a exclusão social estão se tornando conceitos cada vez mais importantes na pesquisa relacionada ao transporte (Lucas, 2012). Outro tema central é a pobreza de transporte, que ocorre quando as alternativas de transporte disponíveis consomem desproporcionalmente muito tempo ou são onerosas (Lucas et al., 2016;).

Muitos estudos acadêmicos sugerem que os setores mais pobres da sociedade também não se beneficiam de maneira igual das melhorias de infraestrutura e serviços de transporte (lucas et al.,2016). Com isso os grupos populacionais mais pobres podem se tornar ainda mais marginalizados e empobrecidos pelas externalidades dessas grandes infraestruturas, devido à separação da comunidade e ao aumento de sinistros e mortes nas estradas, além dos efeitos do uso do solo resultantes desses investimentos, que podem afastá-los ainda mais das atividades econômicas tradicionais (Starkey e Hine, 2014).

A evolução do planejamento contemporâneo tem se voltado para o entendimento de como fatores estruturais influenciam a acessibilidade, revelando padrões de desigualdade espacial e social. Estudos nacionais e internacionais têm apontado para a concentração de deficiências de acessibilidade entre as camadas mais vulneráveis da população, evidenciando fenômenos como segregação socioespacial, desigualdade no acesso ao mercado de trabalho e padrões de viagem restritivos (Bertolini et al., 2005; Pereira et al., 2017; Garcia et al., 2018; Souza, 2019; Freire et al., 2020; Lima et al., 2021; van Wee, 2016; Geurs e van Wee, 2011).

Apesar desses avanços, ainda são escassas as investigações sobre os mecanismos causais que conectam a acessibilidade a pobreza, permanecendo ainda, pouco explorada sob abordagens que considerem seus efeitos estruturais. Nesse contexto, surge a necessidade de integrar abordagens que articulem acessibilidade e vulnerabilidade social, e como as restrições que o acesso a oportunidades pode reforçar ciclos de pobreza, como discutido por Sen (2000) e pelos estudos sobre armadilhas da pobreza (Azariadis e Stachurski, 2005). Starkey (2014) entende que é essencial que se reconheça plenamente e reflitam as conexões entre transporte sustentável e redução da pobreza e que se deve ter como objetivo integrar a redução da pobreza nas intervenções relacionadas ao transporte.

Diante disso, este trabalho investiga a relação entre acessibilidade e pobreza na região metropolitana de Fortaleza com foco na associação entre acessibilidade e pobreza. Para tanto, são utilizadas bases de dados do Censo 2010 aplicando-se Modelagem de Equações Estruturais (SEM) utilizando de índices sintéticos de pobreza (P) e acessibilidade (AS), além da métrica T_OCU (Percentual de pessoas em domicílios vulneráveis à pobreza e que gastam mais de uma hora até o trabalho no total de pessoas ocupadas), que é por definição Razão entre as pessoas que vivem em domicílios vulneráveis à pobreza (com renda per capita inferior a 1/2

salário mínimo de agosto de 2010) e que gastam mais de uma hora em deslocamento até o local de trabalho e o total de pessoas ocupadas, multiplicada por 100 sendo considerados apenas os domicílios particulares permanentes e as pessoas com 10 anos de idade ou mais, como indicador de restrição de acessibilidade.

A inovação metodológica reside na aplicação de Modelagem de Equações Estruturais (SEM), permitindo analisar as inter-relações entre acessibilidade e pobreza de forma integrada. Assim, busca-se contribuir para o entendimento dos efeitos estruturais da acessibilidade sobre a pobreza e subsidiar estratégias de planejamento urbano mais justas e eficazes.

2. MODELOS, DADOS E ESTRATÉGIA DE COMPARAÇÃO

Para fins desse trabalho, será utilizada a base de dados do Censo 2010 da Região Metropolitana de Fortaleza, foram usados dados de IDHM_E (índice de desenvolvimento humano municipal – dimensão educação), IDHM_L (índice de desenvolvimento humano municipal – dimensão longevidade), IDHM_R (índice de desenvolvimento humano municipal – dimensão renda), um índice sintético de desenvolvimento com dimensão acessibilidade será gerado a partir desses índices (AS), supondo que o desenvolvimento dimensão acessibilidade (AS) afeta reduzindo a pobreza será também criado um índice sintético para pobreza (P) a partir do PMPOB (percentual de pobre), PPOB (proporção de vulneráveis a pobreza), e do PIND (proporção de extremamente pobres), será observado como o percentual de vulneráveis a pobreza que se deslocam mais de uma hora para o trabalho (T_OCU) afeta os IDHM_L, IDHM_E e IDHM_R, a fim de se observar como uma medida de restrição a acessibilidade como o T_OCU afeta o índice sintético de desenvolvimento dimensão acessibilidade afeta a pobreza.

A tabela abaixo resume os índices, os descreve e informa a base de dados a qual pertencem:

Tabela 1: Índices, descrição e Bases de dados

Índices	Descrição	Base da dados
IDHM_L / IDHM_E / IDHM_R	Métricas desenvolvimento humano como variável de controle para isolar o efeito da acessibilidade	CENSO 2010
T_OCU	Métricas de proporção de pobres com restrição de deslocamento (leva mais de uma hora no deslocamento para o trabalho)	CENSO 2010
PMPOB / PPOB / PIND	Métricas de pobreza	CENSO 2010
P / AS	Índices sintéticos de pobreza e desenvolvimento (dimensão acessibilidade)	autor

A partir da tabela será realizado uma análise comparada entre as métricas de acessibilidade e pobreza utilizando dados do censo 2010, utilizando o software gratuito jamovi (version 2.3), usando a sintaxe do lavaan do R, para observar se restrições a acessibilidade afeta a pobreza. Foram criados dois índices sintéticos, primeiramente a partir dos indicadores de pobreza foi criado o índice P (pobreza) que sintetiza três indicadores de pobreza observados pelo Censo, na sequência foi criado o índice AS (desenvolvimento dimensão acessibilidade) que cria um indicador sintético do desenvolvimento da região a partir de indicadores de desenvolvimento humano, e observando como o percentual de vulneráveis a pobreza que levam mais de uma hora para se deslocarem ao trabalho (T_OCU), afetam o indicador AS e como o desenvolvimento dimensão acessibilidade (AS) afeta a pobreza P.

3. RESULTADOS

Para investigar a relação entre acessibilidade e pobreza, foi elaborado um path diagram (diagrama de trajetórias – Figura 1) que representa graficamente as interações entre as variáveis e seus respectivos indicadores observáveis. A partir desse modelo conceitual, foi aplicada a metodologia de Modelagem de Equações Estruturais (Structural Equation Modeling – SEM), que permite a análise simultânea de múltiplas relações entre variáveis latentes e observadas. Essa abordagem é particularmente adequada para investigar fenômenos complexos, como a influência da acessibilidade (observada aqui através da métrica de restrição a acessibilidade (T_OCU) sobre os níveis de pobreza, usando dois índices sintéticos que visaram controlar a influência do desenvolvimento da região na própria acessibilidade e na pobreza.

O uso do SEM possibilitou observar que a T_OCU influenciou os IDHM_L, IDHM_E e IDHM_R de maneira negativa, em -0,08, -0,09 e -0,06 respectivamente, demostrando uma convergência de sinal (afetando nos três casos negativamente os índices de desenvolvimento), já o índice sintético AS é afetado positivamente pelos índices (IDH_L, IDHM_E e IDHM_R). O índice AS influencia negativamente o índice sintético P em -0,36. Assim podemos associar que acessibilidade, observada no presente estudo pelo índice T_OCU afetou negativamente os IDHM e eles afetam negativamente a pobreza, indicando que existe associação entre a T_OCU e os índices de pobreza PMPOB, PPOB e PIND.

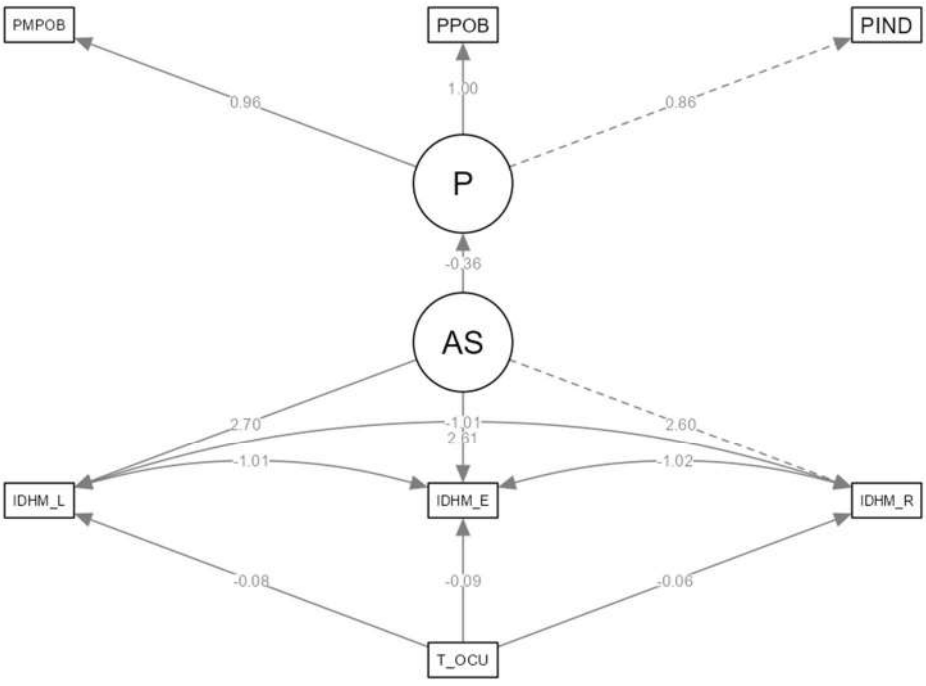


Figura 1: Path Diagram (diagrama de trajetórias)

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos por meio da Modelagem de Equações Estruturais (SEM) indicam a existência de uma associação entre acessibilidade e pobreza, mediada por indicadores sintéticos construídos com o intuito de controlar o efeito do nível de desenvolvimento. A elaboração do path diagram (figura 1) permitiu representar de forma estruturada as interações teóricas entre as variáveis, destacando o papel da métrica T_OCU como um indicador de restrição à acessibilidade. A análise demonstrou que a T_OCU exerce influência negativa sobre

o IDHM, indicando que maiores restrições à acessibilidade estão associadas a menores níveis de desenvolvimento humano e consequentemente maiores índices de pobreza.

Observou-se que o índice sintético de desenvolvimento dimensão acessibilidade (AS) impacta negativamente o índice sintético de pobreza (P), reforçando a hipótese de que melhorias na acessibilidade podem contribuir para a redução das condições de pobreza, podendo indicar que políticas públicas voltadas à promoção da acessibilidade não apenas favorecem a mobilidade urbana, mas também podem atuar como instrumento indutor de desenvolvimento social, ampliando oportunidades e mitigando desigualdades socioespaciais.

Uma limitação relevante desse estudo diz respeito ao uso do Censo demográfico de 2010, como única fonte de dados, portanto atualizações com bases de dados mais recentes e integração com outras fontes de dados podem contribuir para um melhor entendimento da associação entre acessibilidade e pobreza. Além disso, justifica-se a necessidade de mais investigações da relação entre Pobreza e Acessibilidade a fim de articular planejamento urbano e inclusão social considerando a acessibilidade como um elemento estratégico no combate à pobreza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azariadis, Costas; Stachurski, John. Poverty Traps. In: Aghion, Philippe; Durlauf, Steven N. (Ed.). *Handbook of Economic Growth*. Elsevier, v. 1, pt. A, p. 295-384, 2005. ISSN 1574-0684. ISBN 9780444520418. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S1574-0684(05)01005-1. Acesso em: 04 jun. 2024.

Bertolini, L.; F. le Clercq e L. Kapoen (2005) Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, v. 12, n. 3, p. 207–220. doi: 10.1016/j.tranpol.2005.01.006 Acesso em: 04 jun. 2024.

Campello, Tereza, editor. "RENDA, POBREZA E DESIGUALDADE: Por Um Desenvolvimento Com Inclusão." Faces Da Desigualdade No Brasil: Um Olhar Sobre Os Que Ficam Para Trás, CLACSO, 2017, pp. 62–67. JSTOR, https://doi.org/10.2307/j.ctvtxw2vg.11. Accessed 4 June 2024.

de Codes, Ana Luiza Machado (2008) : Métodos de estudo sobre pobreza: Abordagens tradicionais e a modelagem de equações estruturais, Texto para Discussão, No. 1345, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília

Duarte, Leandro Batista; Belmiro, Maria Orlândia de Melo. Utilização de dados em painel para analisar a relação entre a desigualdade de renda e educação nas regiões do Brasil. *Revista Debate Econômico*, v. 6, n. 2, p. 4-18, jul.-dez. 2018.

Epskamp S. , Stuber S., Nak J., Veenman M,, Jorgensen T.D. (2019). *semPlot: Path Diagrams and Visual Analysis of Various SEM Packages' Output*. [R Package]. Retrieved from https://CRAN.R-project.org/package=semPlot.

Fox, J., & Weisberg, S. (2020). *car: Companion to Applied Regression*. [R package]. Retrieved from https://cran.r-project.org/package=car.

Freire, R. M. C.; C.F.G. Loureiro; A. S. Lopes e F. F. L. M. Sousa (2020) Avaliação dos impactos do metrô na acessibilidade da população de baixa renda aos postos de trabalho em Fortaleza,*Transportes*,v.27,n.3,p.144–156.

Gallucci, M. (2020). *jAMM: jamovi Advanced Mediation Models*. [jamovi module]. Retrieved from https://jamovi-amm.github.io/.

Gallucci, M., Jentschke, S. (2021). *SEMLj: jamovi SEM Analysis*. [jamovi module]. For help please visit https://semlj.github.io/.

Garcia, C. S. H. F., R. Macário, E. D. A. G. Menezes e C. F. G. Loureiro (2018) Strategic Assessment of Lisbon's Accessibility and Mobility Problems from an Equity Perspective. Networks & Spatial Economics,v.18,p.415-439.

Lima, L. S.; C. F. G. Loureiro;F. F. L. M. Sousa e A. S. Lopes (2021) Espraiamento Urbano e seus Impactos nas Desigualdades Socioespaciais da Acessibilidade ao Trabalho em Fortaleza.Transportes,v.29,n.1,p.229-246.

Lucas, K., 2012. Transport and social exclusion: Where are we now? Transp. Policy Urban Transp. Initiatives 20, 105–113. https://doi.org/10.1016/j. tranpol.2012.01.013.

Lucas, K., Mattioli, G., Verlinghieri, E., Guzman, A., 2016. Transport poverty and its adverse social consequences. Proc. Inst. Civ. Eng. Transp. 169 (6), 353–365.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. *Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil*. Disponível em: http://www.atlasbrasil.org.br/. Acesso em: 4 jun. 2024.

Pedro, Antônio; Crepo, Albernaz; Gurovitz, Elaine. A pobreza como um fenômeno multidimensional. RAE eletrônica, v. 1, 2002. DOI: 10.1590/S1676-56482002000200003.

Pereira, R. H. M.; C. K. V. Braga; B. Serra e V. G. Nadalin (2019) Desigualdades socioespaciais de acesso a oportunidades nas cidades brasileiras. *Texto para Discussão IPEA*, v. 2535. Brasília, DF.

P Starkey, J Hine Poverty and Sustainable Transport: How Transport Affects Poor People with Policy Implications for Poverty Reduction. A Literature Review Poverty and Sustainable Transport: How Transport Affects Poor People

with Policy Implications for Poverty Reduction. A Literature Review, ODI, UN-Habitat, DFID, UKaid, SLoCaT, London, UK (2014)

R Core Team (2021). *R: A Language and environment for statistical computing*. (Version 4.1) [Computer software]. Retrieved from https://cran.r-project.org. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2022-01-01).

Revelle, W. (2019). *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*. [R package]. Retrieved from https://cran.r-project.org/package=psych.

Rosseel, Y. (2019). lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software, 48(2), 1-36. link*.

Soetaert, K. (2019). *diagram: Functions for Visualising Simple Graphs (Networks), Plotting Flow Diagrams*. [R package]. Retrieved from https://cran.r-project.org/package=diagram.

Sousa, F. F. L. M. (2019) Diagnóstico Estratégico das Desigualdades Socioespaciais na Acessibilidade ao Trabalho em Fortaleza. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará

Souza, F. F. C..; Pires, M. M. .; Moura, T. G. Z. Análise Espacial da Pobreza: uma aplicação para o estado da Bahia, Brasil. RPER, [S. l.], n. 64, p. 83–95, 2023. DOI: 10.59072/rper.vi64.235. Disponível em: https://www.review-rper.com/index.php/rper/article/view/235. Acesso em: 4 jun. 2024.

SEN, Amartya K. *Desenvolvimento como Liberdade.* São Paulo: Companhia das Letras, 2000

Siqueira, M. F. (2020) *Metodologia de Análise dos Determinantes da Demanda por Transportes no Paradigma da Inferência Causal*. Dissertação. Universidade Federal do Ceará.

The jamovi project (2022). jamovi. (Version 2.3) [Computer Software]. Retrieved from https://www.jamovi.org.

van Wee, Bert (2016), "Accessible accessibility research challenges", Journal of Transport Geography, 51, 9-16.

van Wee, B. and K.T. Geurs (2011), "Discussing equity and social exclusion in accessibility evaluations", European Journal of Transport and Infrastructure Research, 11(4), 350-367.

Vicente, Aline De Souza; Santolin, Roberto. Uma avaliação da relação entre o crescimento da renda e a desigualdade para os estados brasileiros no período 2001 a 2014 a partir da hipótese de Kuznets. *Revista de Economia e Finanças*, v. 23, n. 1, 2021. DOI: https://doi.org/10.22409/reuff.v23i1.42889.

Cesario Belo Torres Junior – Universidade Federal do Ceará – UFC - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes PETRAN – UFC

FRAGMENTAÇÃO URBANA E DESERTOS DE SERVIÇOS: EVIDÊNCIAS ESPACIAIS NA CIDADE DO RECIFE

Ligia Rabay[1], Rafael Henrique Ferreira[2], Gracielle Gonçalves Ferreira de Araújo[1], Leise Kelli de Oliveira[3]
[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Universidade Federal de Minas Gerais,
[3]Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
Este artigo analisa a relação entre perfil socioeconômico, oferta de serviços urbanos e infraestrutura de transporte na cidade do Recife, sob a perspectiva da cidade de 15 minutos. Com base em dados espaciais organizados em uma malha hexagonal, foi usado a análise de agrupamento *k*-means para identificar padrões socioespaciais e analisar desertos de serviço. Os resultados revelaram quatro clusters com características distintas, sendo que o Cluster 3 apresentou alta densidade populacional e baixa oferta de serviços, configurando desertos de serviços urbanos. Em contraste, o Cluster 4 concentrou infraestrutura e facilidades em áreas de maior renda. Os demais clusters revelaram padrões intermediários. Esses achados destacam desigualdades territoriais significativas e apontam limitações na implementação do conceito de cidade de 15 minutos em contextos urbanos marcados por disparidades socioespaciais históricas reforçadas pela infraestrutura de transporte.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de cidade de 15 minutos tem ganhado destaque internacional como modelo urbano voltado à sustentabilidade, proximidade e qualidade de vida, ao propor que as funções sociais essenciais, tais como moradia, trabalho, comércio, saúde, educação e lazer, estejam acessíveis em até 15 minutos por modos ativos de deslocamento (Moreno *et al.*, 2021). Nesse modelo, a acessibilidade não é apenas uma questão de mobilidade, mas sim de justiça territorial e inclusão social, pois influencia diretamente a capacidade dos indivíduos acessarem oportunidades fundamentais para seu bem-estar (Lucas, 2012; Pereira *et al.*, 2017). Ainda, ao incentivar a provisão de serviços dentro desse raio de deslocamento ativo, esse modelo urbano contribui para a promoção de viagens mais sustentáveis (Colaço e De Abreu E Silva, 2025). Portanto, embora envolva múltiplas dimensões urbanas, a cidade de 15 minutos tem na acessibilidade um de seus pilares centrais, uma vez que busca reduzir as distâncias percorridas e, por consequência, a dependência do transporte motorizado.

O conceito de cidade de 15 minutos está intimamente relacionado ao conceito de acessibilidade, que pode ser definida em função de dois componentes principais: (i) a capacidade individual de acessar diferentes tecnologias de mobilidade (modos, veículos) e (ii) a capacidade de alcançar destinos-chave utilizando o sistema de transporte existente (Pereira *et al.*, 2017). A desigualdade de acesso está, em parte, relacionada a níveis desiguais de acessibilidade espacial e à falta de acessibilidade de várias formas de transporte (Hananel e Berechman, 2016). Nesse contexto, Lucas (2012) argumenta que a inacessibilidade das pessoas a bens, serviços e oportunidade de vida, devido a desigualdades em termos de transporte pode levar a exclusão social. Assim, algum nível mínimo de acessibilidade a destinos-chave é necessário para que as pessoas satisfaçam suas necessidades básicas (Pereira *et al.*, 2017). A acessibilidade em uma cidade de 15 minutos altera o foco tradicional de prover mobilidade para prover proximidade física (Büttner *et al.*, 2024). Para tanto, além da conexão com os locais de moradia aos serviços, é necessária a avaliação da diversidade das estruturas familiares, dos destinos de viagens por motivo trabalho e estudo e da inclusão do transporte público como modo sustentável no contexto de cada cidade (Birkenfeld *et al.*, 2023). Como exemplo, o aumento de viagens por transporte público pode ser promovido pela existência de áreas centrais e densas, podendo essa ser uma estratégia de melhoria da acessibilidade e sustentabilidade atrelada ao conceito de cidade de 15 minutos (Colaço e De Abreu E Silva, 2025).

Nesse contexto, ressalta-se a importância de analisar, sob uma perspectiva integrada, como as desigualdades de acesso a serviços e a sistemas de transporte refletem e amplificam as dinâmicas socioeconômicas urbanas. Ao investigar o perfil populacional dos territórios com menor oferta de serviços e transporte, o presente estudo busca não apenas identificar os chamados ‘desertos de serviço’, mas também contribuir para o debate sobre estratégias de planejamento urbano mais equitativas e alinhadas ao conceito de cidade de 15 minutos. No entanto, há uma lacuna na literatura sobre como se dá a conformação da cidade de 15 minutos no contexto brasileiro. Buscando contribuir com esta discussão e frente ao desafio da fragmentação urbana, que acentua

desigualdades de acesso a serviços e oportunidades, este artigo tem por objetivo explorar a relação entre as características socioeconômicas da população, a oferta de serviços (representados por facilidades de saúde, educação, lazer e compras) e a oferta de serviços de infraestrutura de transporte na perspectiva do conceito de cidade de 15 minutos. Para isso, o estudo busca responder às seguintes questões: (i) Quais padrões socioespaciais caracterizam a distribuição de serviços em Recife? e (ii) Como a oferta de serviços e a infraestrutura de transporte se correlacionam com as características socioeconômicas da população? Ao aplicar uma análise de agrupamento espacial com base em dados de alta resolução, o estudo contribui para a identificação de desertos de serviços e para o debate sobre políticas públicas de equidade territorial.

2. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo proposto para este artigo, foi analisada a cidade do Recife, capital de Pernambuco. Foram coletadas informações sobre a distribuição espacial de facilidades de serviços urbanos essenciais para o conceito de cidade de 15 minutos (compras, saúde, lazer e educação), de transportes (pontos de ônibus, de táxi e estacionamento) e dados socioeconômicos (renda, população total, branca e negra, homens e mulheres, economicamente ativa e idosos). As categorias de serviços foram selecionadas com base na literatura que define as funções sociais fundamentais acessíveis por modos de deslocamento ativo. Moradia e trabalho, embora sejam dimensões-chave, não foram incluídas nesta análise exploratória devido ao foco do estudo nas facilidades de serviços. As informações das facilidades urbanas e infraestrutura de transportes foram obtidas no *OpenStreetMaps* (2023) e os dados socioeconômicos do Censo de 2010 foram obtidos de (Pereira *et al.*, 2022). Os dados foram agrupados em hexágonos de 0,11 km², por representar uma medida de proximidade. Embora essa área seja inferior à cobertura estimada para deslocamentos ativos de 15 minutos, sua adoção permite uma maior resolução espacial na identificação de áreas com baixa oferta de serviços, contribuindo para a delimitação mais precisa dos chamados desertos de serviços.

Para a padronização dos dados, foi aplicado o método do *z-score*. Com os dados padronizados, procedeu-se a análise de agrupamento espacial *k-means*, que agrupa unidades espaciais com características semelhantes a partir da minimização das distâncias internas entre os elementos de cada grupo (Anselin, 2024). A escolha do *k-means* se deu por sua capacidade de identificar padrões multifacetados que correlacionam simultaneamente variáveis socioeconômicas e de oferta de serviços, permitindo a delimitação de territórios com perfis distintos, como os desertos de serviços e as áreas consolidadas. O número ótimo de agrupamentos (k) foi determinado com base na métrica da curva de Silhouette, resultando em quatro grupos (k = 4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 é ilustrada a distribuição espacial das facilidades de educação, saúde, transporte, lazer e comércio, estruturada a partir de uma malha hexagonal, bem como as áreas de preservação na imagem de fundo. Observa-se uma concentração significativa de comércio nas áreas centrais do Recife, especialmente nas regiões sul e sudeste, refletindo a maior densidade urbana e histórica concentração de infraestrutura nessas zonas. Em contraste, destacam-se amplas áreas periféricas, particularmente a oeste e noroeste, com baixa oferta ou ausência total de determinadas facilidades, como educação e saúde. A oferta de infraestrutura de transporte é a mais ampla entre as categorias analisadas, enquanto facilidades de lazer apresentam uma distribuição mais fragmentada. Essa distribuição desigual evidencia disparidades territoriais no acesso às facilidades urbanas.

Na Figura 2 é ilustrado os resultados da análise de agrupamento que são descritos na Tabela 1. O Cluster 1 pode ser caracterizado por áreas remotas e pouco servidas por facilidades urbanas, pois apresenta valores negativos para praticamente todas as variáveis, o que caracteriza essas áreas como as mais desfavorecidas em termos de infraestrutura urbana e presença de facilidades. A renda média, assim como os indicadores populacionais, está abaixo da média, com destaque para a baixa densidade de população negra (-0,680), população idosa (-0,686), população total (-0,641) e pontos de ônibus (-0,447). Esses dados reforçam a hipótese de que se trata de áreas periféricas ou com restrições ambientais, com ocupação dispersa, baixa acessibilidade e menor pressão por serviços urbanos, o que explica sua menor relevância na análise de desertos, embora, do ponto de vista da justiça territorial, ainda mereçam atenção.

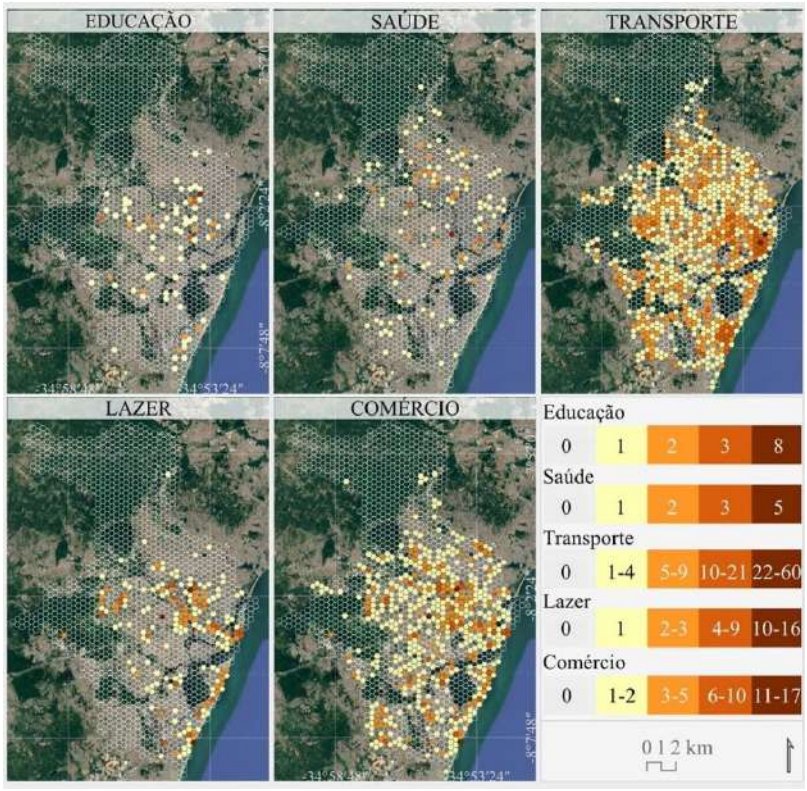


Figura 1: Quantidade de serviços disponíveis por hexágono.

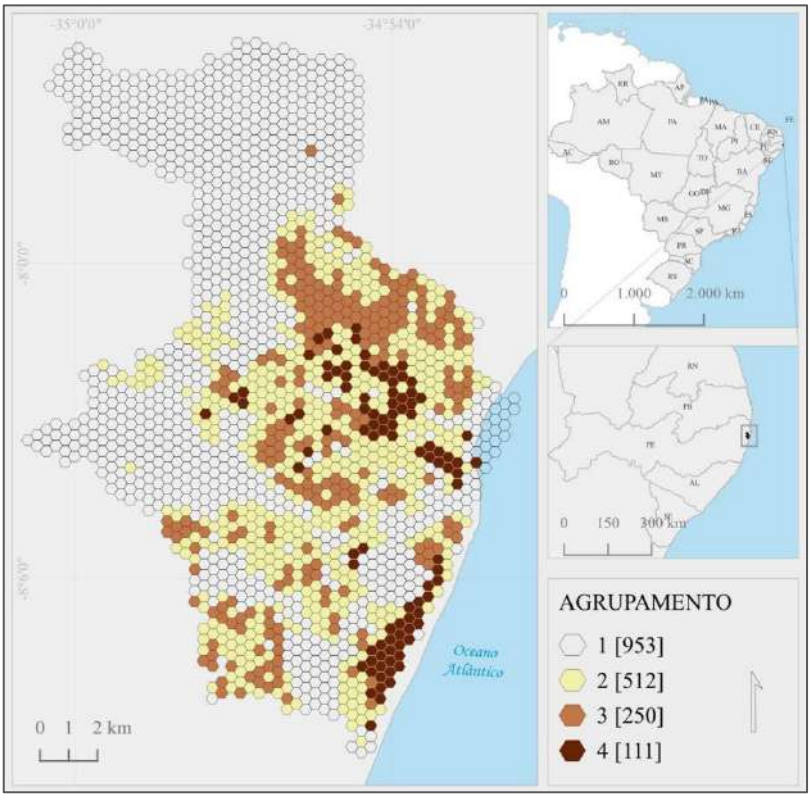


Figura 2: Resultado da análise de agrupamentos.

O Cluster 2 pode ser caracterizado por áreas intermediárias e com baixa densidade de serviços e se destaca por apresentar valores positivos em todas as variáveis, porém com intensidade moderada, o que sugere a presença de população e infraestrutura, mas ainda abaixo do ideal para atender plenamente aos princípios da cidade de 15 minutos. As variáveis de renda (0,236), pontos de ônibus (0,505) e população negra (0,357) indicam um

perfil misto, com predomínio de zonas residenciais de renda média e uma certa diversidade populacional. No entanto, os baixos valores em variáveis de serviços, especialmente compras (-0,004) e educação (0,049), apontam para restrições funcionais, o que pode configurar desertos de consumo e de equipamentos públicos. Essas áreas têm potencial para absorver investimentos em serviços de proximidade, especialmente em lazer e educação, e representam territórios de transição, com densidade populacional suficiente para justificar políticas públicas de qualificação urbana.

Tabela 1: Resultado da análise de agrupamento

Categoria	Tipo	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Serviços	Comércio	-0,198	-0,004	0,206	1,144
	Saúde	-0,192	0,151	0,344	0,233
	Lazer	-0,343	0,180	0,094	1,726
	Educação	-0,172	0,049	0,023	1,080
Socioeconômica	Renda	-0,445	0,236	0,039	2,388
	População Branca	-0,692	0,286	1,406	1,541
	População Negra	-0,680	0,357	2,020	0,034
	População de Homens	-0,741	0,349	1,881	0,783
	População de Mulheres	-0,737	0,357	1,917	0,657
	População Economicamente Ativa	-0,743	0,349	1,862	0,843
	População de Idosos	-0,686	0,295	1,429	1,415
	População Total	-0,641	0,247	1,420	1,410
Transportes	Pontos de Ônibus	-0,447	0,505	0,388	0,702
	Pontos de Taxi	-0,169	-0,077	-0,099	1,771
	Estacionamento	-0,165	0,029	-0,245	1,591

O Cluster 3 pode ser caracterizado por áreas com alta densidade população e baixa oferta de serviços. Ainda, ele apresenta os maiores valores nos indicadores populacionais, como população negra (2,020), de mulheres (1,917), de homens (1,881) e total (1,420). Esses dados evidenciam uma área altamente densa e urbanizada, com presença expressiva de grupos com potencial vulnerabilidade social, especialmente a população negra. Apesar dessa densidade populacional elevada, os resultados para serviços são baixos a moderados: compras (0,206), saúde (0,344), lazer (0,094) e educação (0,023), o que revela uma clara desconexão entre a demanda e a oferta de facilidades urbanas essenciais. Esse descompasso é especialmente preocupante no contexto da cidade de 15 minutos, pois essas áreas concentrariam alto número de moradores sem o correspondente acesso a equipamentos urbanos de proximidade. Assim, o Cluster 3 pode ser interpretado como o núcleo crítico dos desertos de serviços, concentrando população vulnerável em áreas com oferta insuficiente de infraestrutura, o que acentua desigualdades socioespaciais e compromete a sustentabilidade urbana.

Por fim, o Cluster 4 é caracterizado por áreas consolidadas com alta oferta de serviços e alta renda, apresentando os maiores valores nas variáveis de serviços e renda, com destaque para compras (1,144), lazer (1,726), educação (1,080) e renda (2,388), além de infraestrutura de transporte como pontos de táxi (1,771) e estacionamentos (1,591). A população branca também é mais representativa (1,541), enquanto a população negra apresenta valor baixo (0,034), sugerindo um perfil socioeconômico mais elitizado e racialmente desigual. Essas áreas se configuram como territórios consolidados, com ampla disponibilidade de serviços essenciais e infraestrutura de transporte, além de alta capacidade de consumo e mobilidade. No contexto da cidade de 15 minutos, o Cluster 4 representa o modelo idealizado, onde a proximidade e diversidade funcional são atendidas com eficiência. No entanto, sua concentração espacial reduzida e sua diferenciação em relação aos demais clusters reforçam a fragmentação urbana e os contrastes socioespaciais da cidade, evidenciando que o acesso à cidade de 15 minutos ainda é um privilégio restrito a determinadas parcelas da população.

A identificação dos desertos de serviços configura-se como uma das principais contribuições deste estudo, evidenciando desigualdades territoriais marcantes na cidade do Recife. As áreas pertencentes ao Cluster 3 concentram-se em regiões com alta densidade populacional, predominância de população economicamente ativa e grupos vulneráveis, mas com uma oferta extremamente limitada de serviços essenciais, como saúde, educação, lazer e comércio. Essa combinação de alta demanda com baixa disponibilidade funcional revela um padrão crítico de privação urbana. Em contrapartida, o Cluster 4, representando áreas consolidadas e de alta renda, concentra a maior parte dos equipamentos urbanos, evidenciando uma forte segregação espacial dos

serviços. A distância entre esses dois grupos não é apenas física, mas também simbólica, refletindo a disparidade socioespacial estrutural que marca o tecido urbano recifense. Esses achados reforçam a urgência de políticas públicas redistributivas e territorialmente sensíveis, capazes de garantir acesso equitativo aos serviços urbanos e de promover uma transformação progressiva em direção ao ideal da cidade de 15 minutos, não apenas como modelo urbanístico, mas como instrumento de justiça social e inclusão.

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a acessibilidade a serviços essenciais e transporte no Recife sob a perspectiva da cidade de 15 minutos, relacionando essas dimensões ao perfil socioeconômico da população. Os resultados revelaram disparidades territoriais marcantes, com destaque para áreas densamente povoadas e vulneráveis (Cluster 3) que apresentam baixa oferta de facilidades urbanas, configurando desertos de serviços. Em contraposição, áreas consolidadas (Cluster 4) concentram infraestrutura e serviços, evidenciando a persistência de um padrão de segregação socioespacial. A identificação desses contrastes reforça a importância de políticas públicas voltadas à redistribuição equitativa de equipamentos urbanos e ao fortalecimento de centralidades locais, promovendo o acesso universal a funções urbanas básicas e, consequentemente, melhores condições de vida.

Apesar dos achados interessantes, este estudo tem algumas limitações, como a obtenção dos dados por meio do *OpenStreetMaps* e o uso de dados do Censo 2010, que, embora sejam a fonte mais completa de dados socioeconômicos para o período analisado, podem não refletir as dinâmicas mais recentes da cidade. Como continuidade deste trabalho, sugerem-se investigações que incorporem variáveis adicionais, como tempo de deslocamento em tempo real, e que utilizem algoritmos de agrupamento com contiguidade espacial (como SKATER ou *regionalization*) para uma análise mais profunda das relações de vizinhança. Além disso, análises temporais poderiam avaliar como políticas públicas ou transformações urbanas impactam a formação ou mitigação dos desertos de serviços ao longo do tempo. Estudos comparativos entre diferentes cidades brasileiras também são recomendados, a fim de compreender a aplicabilidade e os desafios do conceito de cidade de 15 minutos em distintos contextos urbanos do país.

Agradecimentos
Os autores agradecem à FACEPE pelo auxílio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

Anselin, L. (2024) *An Introduction to Spatial Data Science with GeoDa: Volume 2: Clustering Spatial Data*. (1º ed). Chapman and Hall/CRC, Boca Raton. doi:10.1201/9781032713175

Birkenfeld, C., Victoriano-Habit, R., Alousi-Jones, M., Soliz, A., e El-Geneidy, A. (2023) Who is living a local lifestyle? Towards a better understanding of the 15-minute-city and 30-minute-city concepts from a behavioural perspective in Montréal, Canada. *Journal of Urban Mobility*, *3*, 100048. doi:10.1016/j.urbmob.2023.100048

Büttner, B., Silva, C., Merlin, L., e Geurs, K. (2024) Just around the corner: Accessibility by proximity in the 15-minute city. *Journal of Urban Mobility*, *6*, 100095. doi:10.1016/j.urbmob.2024.100095

Colaço, R., e De Abreu E Silva, J. (2025) Does the 15-minute City Promote Sustainable Travel? Quantifying the 15-minute City and Assessing its Impact on Individual Motorized Travel, Active Travel, Public Transit Ridership and CO2 Emissions. *Networks and Spatial Economics*. doi:10.1007/s11067-025-09670-6

Hananel, R., e Berechman, J. (2016) Justice and transportation decision-making: The capabilities approach. *Transport Policy*, *49*, 78–85. doi:10.1016/j.tranpol.2016.04.005

Lucas, K. (2012) Transport and social exclusion: Where are we now? *Transport Policy*, *20*, 105–113. doi:10.1016/j.tranpol.2012.01.013

Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C., e Pratlong, F. (2021) Introducing the "15-Minute City": Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities. *Smart Cities*, *4*(1), 93–111. doi:10.3390/smartcities4010006

Pereira, R. H. M., Herszenhut, D., Braga, C. K. V., Bazzo, J. P., Oliveira, J. L. A., Parga, J. P., Saraiva, M., Silva, L. P., Tomasiello, D. B., e Warwar, L. (2022) TD 2772 - Distribuição espacial de características sociodemográficas e localização de empregos e serviços públicos das vinte maiores cidades do Brasil. *Texto para Discussão*, 1–26. doi:10.38116/td2772

Pereira, R. H. M., Schwanen, T., e Banister, D. (2017) Distributive justice and equity in transportation. *Transport Reviews*, *37*(2), 170–191. doi:10.1080/01441647.2016.1257660

Ligia Rabay (ligia.rabay@ufpe.br) - Universidade Federal de Pernambuco
Rafael Henrique Ferreira (cartografo.rafael@gmail.com) - Universidade Federal de Minas Gerais
Gracielle Gonçalves Ferreira de Araújo (gracielle.araujo@ufpe.br) - Universidade Federal de Pernambuco
Leise Kelli de Oliveira (leise.oliveira@ufrgs.br) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LOVE'S IN THE AIR?
AIR RAGE: SINAL DE UMA AVIAÇÃO EM TURBULÊNCIA AFETIVA

Ana Maria Vieira
Mestre em Segurança de Aviação pelo Instituto Tecnológico de aeronáutica (ITA)

RESUMO
Este artigo analisa o fenômeno do *Air Rage* como expressão de uma crise afetiva na aviação contemporânea. Com o aumento de surtos emocionais a bordo, investigam-se fatores como estresse crônico, sobrecarga de trabalho, relações fragilizadas e hipervisibilidade digital, que amplificam conflitos e transformam cabines em arenas de julgamento público. De acordo com a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), o *Air Rage* já representa risco superior ao terrorismo em termos de recorrência, gerando não apenas ameaças físicas e emocionais, mas altos custos operacionais com desvios, pousos forçados e ações judiciais. A aviação, como outros modais, não pode mais ser pensada apenas sob o viés técnico. Com base em dados nacionais e internacionais, defende-se a urgência de investir em escuta ativa, comunicação empática e preparo emocional. Este trabalho, portanto, convida à reflexão: como prevenir o que é invisível ao radar, mas que se tornou uma ameaça visivelmente concreta à segurança aérea.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Congresso ANPET tem se consolidado como espaço privilegiado de difusão de pesquisas sobre transporte e mobilidade, reunindo pesquisadores, professores, estudantes e profissionais para discutir os avanços e os desafios do setor. É exatamente nesse escopo que este artigo se insere: na abordagem dos desafios silenciosos e emergentes enfrentados por um dos modais mais consolidados, a aviação.

Segundo a IATA, o fenômeno do *Air Rage* tem se consolidado como uma das ameaças mais recorrentes à segurança operacional na aviação comercial, superando até mesmo riscos relacionados ao terrorismo. A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) define esse comportamento como qualquer ato verbal ou físico que comprometa a segurança do voo ou o bem-estar de tripulantes e passageiros. Embora frequentemente associado a passageiros, este artigo amplia o foco e evidencia que aeronautas e aeroviários também estão submetidos a crescente pressão emocional, intensificada por jornadas exaustivas, assédio, cortes estruturais e falta de suporte organizacional. A visibilidade seletiva promovida pelas redes sociais agrava tensões, expondo fragmentos de realidade a bordo e enfraquecendo a autoridade da tripulação. Em meio a esse cenário, o preparo emocional, a escuta ativa e a comunicação assertiva passam a ser equipamentos invisíveis de segurança de voo tão essenciais quanto extintores ou coletes salva-vidas.

2. A RAIVA ESTÁ NO AR.

A IATA ligou o sinal de alerta e divulgou uma análise apontando um crescimento expressivo nos incidentes de indisciplina a bordo em 2022, em comparação com o ano anterior. Segundo os dados, foi registrado um incidente para cada 568 voos comerciais, contra um para cada 835 voos em 2021. Em 2022, os casos de agressão física cresceram 61% em relação a 2021. Nos EUA, a *Federal Aviation Administration* (FAA) registrou cerca de 12.900 incidentes desde 2021, sendo quase 6.000 apenas em 2021, um salto de mais de 400 % em comparação com 2019. Fontes jornalísticas e representantes da indústria destacam que os principais fatores desencadeantes incluem: superlotação, desconforto físico (assentos apertados), fome, barulho, estresse por cancelamentos e processos burocráticos, além de comportamentos sociais mais agressivos que extrapolam para as viagens aéreas. Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR, 2024) informou que, entre 2019 e maio de 2024, houve 3.011 registros de indisciplina, com 735 casos apenas em 2023, uma média de dois por dia. Os incidentes incluem brigas a bordo e agressões a tripulantes.

Diante desse cenário, a IATA tem reforçado a importância da implementação efetiva do Protocolo de Montreal de 2014 (MP14), instrumento jurídico internacional criado para enfrentar a crescente indisciplina a bordo e fortalecer a capacidade dos Estados de atuarem judicialmente nesses casos.

Em síntese, o MP14 configura-se como uma resposta concreta ao aumento dos episódios de violência e indisciplina a bordo fenômeno amplamente conhecido como *Air Rage.* Ao ampliar a jurisdição, proteger legalmente a tripulação e viabilizar a responsabilização e reparação dos danos causados, o protocolo representa um avanço significativo nos marcos regulatórios da aviação civil internacional.

O protocolo já foi ratificado por mais de 40 países, incluindo o Brasil, os Estados Unidos, Reino Unido, Austrália, Canadá e grande parte dos membros da União Europeia. No Brasil, o Protocolo de Montreal de 2014 foi incorporado ao ordenamento jurídico nacional pelo Decreto nº 9.379, de 2018.

2.1 Sorria você está sendo filmado! A hipervisibilidade digital como gatilho para o *Air Rage*.

A intensificação de episódios de *Air Rage* registrados e disseminados nas redes sociais tem provocado efeitos significativos no imaginário coletivo e no cotidiano das operações aéreas. A viralização desses conteúdos, muitas vezes descontextualizados, contribui para a distorção da percepção pública sobre a segurança dos voos, instaurando um clima de medo, julgamento e hipervigilância a bordo, com efeitos particularmente severos sobre os tripulantes.

Entre 2024 e 2025, diversos incidentes, envolvendo tentativas de invasão de cabine, agressões físicas e comportamentos disruptivos, ganharam ampla repercussão na mídia digital, gerando um ciclo de exposição e desgaste. Entre os casos recentes que ilustram esse fenômeno, destacam-se:

- **Abril/2025 – American Airlines (JFK → Milão):** passageiro tentou invadir a cabine após frustração com o serviço de bordo, forçando o retorno da aeronave a Nova York (PEOPLE, 2025).
- **Maio/2025 – Southwest Airlines (Nashville → Phoenix):** passageira tentou abrir a porta de emergência e agrediu comissários; o avião desviou para Oklahoma City (BUSINESS INSIDER, 2025).
- **Setembro/2024 – Azul (Recife → Viracopos):** passageira agrediu fisicamente tripulantes e precisou ser contida pela Polícia Federal (G1, 2024).
- **Agosto/2024 – Gol (Miami → Belém):** passageiro embriagado agrediu a esposa e ameaçou a tripulação, obrigando pouso de emergência (UOL, 2024).

Mais do que informar, esses registros alimentam a sensação de instabilidade emocional no ambiente de voo, fragilizando a autoridade da tripulação e expondo profissionais a um escrutínio constante. Esse fenômeno se conecta diretamente à noção de vigilância panóptica descrita por Michel Foucault (1975), onde a simples possibilidade de ser vigiado condiciona comportamentos. Hoje, o "olhar" foi descentralizado: qualquer passageiro com um celular pode assumir o papel de vigilante e juiz. A isso se soma o que Byung-Chul Han (2017) chama de *vigilância horizontal*, típica da sociedade da transparência, onde todos observam todos, sem mediações institucionais claras, intensificando o medo de cancelamento e a ansiedade de exposição.

Na lógica da modernidade líquida de Bauman (2001), esses episódios deixam de ser eventos isolados e se transformam em elementos de identidade pública e reputação digital, instantaneamente construídas ou destruídas por curtidas, comentários e hashtags. Como resultado, a pressão psicológica desloca-se da segurança operacional para a gestão de imagem, comprometendo o bem-estar da equipe e a eficácia no gerenciamento de crises a bordo. Assim, as redes sociais não apenas documentam a *Air Rage*, mas a retroalimentam, transformando cada voo em um espaço simbólico de disputa e tensão emocional. A ausência de filtros entre o registro visual e a interpretação pública reforça o sentimento de vulnerabilidade dos profissionais da aviação, que, em vez de atuarem com foco exclusivo na preservação da vida, veem-se compelidos a gerenciar, também, sua própria exposição num tribunal virtual permanente.

2.1.1 Geração Digital e o Desengajamento Afetivo

A formação de uma geração moldada pela hiperconectividade e pelo convívio digital impacta diretamente a qualidade das relações humanas no ambiente aéreo. Estudos em psicologia social apontam que a exposição excessiva a telas e a substituição do contato real pelo virtual reduzem a empatia, dificultam a escuta ativa e enfraquecem habilidades de comunicação emocional (TURKLE, 2015; DAMASIO, 2012).

No contexto da aviação, passageiros emocionalmente despreparados reagem de forma desproporcional a atrasos, restrições ou disputas por assento. Ao mesmo tempo, tripulantes sobrecarregados e emocionalmente desamparados contam com poucos recursos afetivos para conter os conflitos. O resultado é um ciclo de tensão que transforma a cabine em um ambiente emocionalmente inflamável e propício para o *Air Rage*.

3. PROFISSIONAIS DA AVIAÇÃO À BEIRA DE UM ATAQUE DE NERVOS.

A crescente onda de Air Rage tem deixado marcas profundas não apenas nos passageiros, mas principalmente nos profissionais da aviação. Comissários, pilotos e trabalhadores de solo tornaram-se vítimas indiretas, porém recorrentes, desse ambiente emocionalmente contaminado. A exaustão psíquica acumulada compromete a tomada de decisão, a comunicação clara e a contenção eficaz de conflitos.

Casos emblemáticos ilustram os efeitos dessa pressão: comissários reagindo de forma explosiva sob tensão extrema (REUTERS, 2017); comandantes sofrendo colapsos mentais em pleno voo (BBC, 2012); pilotos entrando em confronto físico na cabine (CNN, 2022); e episódios recentes de comportamento gravemente desestabilizado, como tentativa de desligamento dos motores em voo por um piloto fora de serviço (CNN, 2023) Esses incidentes não são desvios individuais, são sintomas de uma estrutura que negligencia o cuidado com quem sustenta o voo. Ignorar a saúde emocional dos profissionais da aviação é ignorar a própria segurança do sistema. A prevenção do Air Rage não começa na contenção, mas no reconhecimento de que quem veste o

uniforme também sente, adoece e precisa ser protegido. O voo só é seguro quando quem cuida também é cuidado.

3.1. Quando o *Air Rage* ainda não embarcou: violência antes da decolagem.

Apesar do foco recorrente nos episódios de Air Rage ocorridos em cabine, é urgente ampliar o olhar para os aeroportos, onde profissionais de solo, como agentes de portão, atendimento e despacho, têm sido alvo crescente de agressões físicas e verbais. Esses trabalhadores estão na linha de frente da frustração alheia, frequentemente enfrentando passageiros exaltados diante de atrasos, cancelamentos e recusas de embarque.

Casos recentes no Brasil ilustram a escalada dessa violência. Em junho de 2024, um passageiro embriagado, impedido de embarcar em Guarulhos, agrediu três funcionários com um objeto cortante, sendo contido pela Polícia Federal (METRÓPOLES, 2024; CLICK GUARULHOS, 2024). Meses depois, outro passageiro, insatisfeito com a impossibilidade de reacomodação imediata, agrediu verbal e fisicamente atendentes e seguranças do aeroporto, sendo preso por desacato e agressão (CNN BRASIL, 2024; GRU DIÁRIO, 2024).

Esses episódios revelam que o Air Rage não começa no ar. Ele se alimenta em terra, no acúmulo de tensões não gerenciadas, em um ambiente onde o despreparo emocional encontra sistemas operacionais frágeis. Proteger a integridade da equipe de solo não é apenas uma questão trabalhista: é uma medida urgente de segurança preventiva.

3.2. Controladores descontrolados: a voz que guia o voo também precisa de cuidado.

Apesar de atuarem fora da cabine, os controladores de tráfego aéreo desempenham papel decisivo na segurança operacional. Expostos a altas exigências cognitivas e emocionais, esses profissionais vêm enfrentando crescente sobrecarga e estresse, fatores diretamente associados a elevação de cortisol e falhas na comunicação. Relatos do *Aviation Safety Reporting System* (ASRS) evidenciam episódios de tensão e descontrole em frequências aeronáuticas, com potencial risco à segurança dos voos. Entre os casos, destacam-se: conflito verbal entre piloto e controlador por instruções divergentes (ASRS, 2019); emissão de comandos conflitantes em Tuscaloosa, resultando em convergência indevida de tráfegos (GENERAL AVIATION NEWS, 2025); e manifestações de hostilidade entre supervisores e operadores (ASRS, 2017). Tais ocorrências, ainda que pouco midiáticas, indicam que a fadiga emocional atinge também os profissionais da torre, exigindo ações preventivas equivalentes às aplicadas às demais frentes da aviação.

3.3. Quando o hangar vira "*anger*".

Embora grande parte dos estudos sobre *Air Rage* se concentre na cabine e na torre, o ambiente de manutenção também revela sinais de tensão emocional crescente. Pressões por desempenho, prazos curtos e comunicação truncada entre pilotos e mecânicos transformam o hangar em palco frequente de conflitos. Uma análise de mais de mil relatos do *Aviation Safety Reporting System* (ASRS) revelou que cerca de 20% descrevem discussões acaloradas por divergências técnicas ou exigências operacionais (Fisher, 2018; ASRS CALLBACK 520, 2023). Esses episódios apontam para uma crise silenciosa: quando a manutenção se torna apenas execução mecânica, e não espaço de confiança e diálogo, o risco ultrapassa o cronograma, ameaça à integridade do próprio sistema. Cuidar do voo exige também cuidar de quem o sustenta desde o chão.

4. CONEXÃO ENTRE FADIGA, ESTRESSE E *AIR RAGE*

Estudos recentes apontam que fatores organizacionais e psicossociais, como escalas irregulares, sobrecarga de funções, assédio por passageiros, jornadas excessivas e desvalorização profissional, vêm elevando significativamente os níveis de estresse entre os tripulantes. Essa pressão contínua compromete a saúde mental da equipe e amplia a vulnerabilidade diante de conflitos a bordo. Segundo a plataforma *Mighty Travels* (2024), altos índices de ansiedade, depressão e fadiga têm sido relatados por comissários, enquanto o The Guardian (2024) alerta para o ambiente cada vez mais hostil nas cabines, com reflexos diretos na segurança dos voos. No Brasil, análises baseadas no RBAC 117 confirmam a relação entre cargas superiores a 44 horas semanais e elevados níveis de sonolência. Em abril de 2025, comissários norte-americanos descreveram o atual ambiente aéreo como "mais hostil do que nunca", apontando níveis de agressividade inéditos e passageiros cada vez mais impacientes e intolerantes (THE GUARDIAN, 2025). Esse cenário favorece a manifestação do Air Rage, reduzindo a capacidade da tripulação de agir com equilíbrio emocional e prevenção em situações críticas.

4.1. Fatores Estressores Atuais e Gatilhos para Air Rage

O aumento dos episódios de Air Rage reflete uma confluência de tensões físicas, organizacionais e emocionais

no transporte aéreo contemporâneo. No plano físico, a redução do espaço entre assentos gera desconforto e sensação de confinamento, favorecendo a irritabilidade e os conflitos. No plano organizacional, cobranças por serviços antes considerados básicos, como bagagem, assentos marcados, alimentação ou Wi-Fi, somadas à comunicação falha em situações de atraso ou cancelamento, contribuem para a frustração, a sensação de injustiça e a perda de controle dos passageiros. No plano emocional, a sobrecarga dos profissionais de aviação, sem o devido suporte psicológico, reduz a resiliência na mediação de crises, enquanto a hostilidade das redes sociais, importada para o ambiente físico do voo, alimenta comportamentos provocativos e impulsivos. O consumo de álcool ou substâncias psicoativas, por sua vez, desinibe e compromete o julgamento, elevando o risco de atitudes agressivas. Por fim, a baixa tolerância à frustração e à convivência em espaços compartilhados completa o quadro de tensão latente, em que qualquer contratempo logístico pode ser o estopim para reações desproporcionais. Todos esses fatores combinam-se para transformar a cabine em um ambiente de alta carga emocional, aumentando a probabilidade de conflitos entre passageiros e tripulação.

5. PREVENÇÃO E INTERVENÇÃO: HABILIDADES SOCIAIS COMO ESTRATÉGIA DE SEGURANÇA

A prevenção do Air Rage exige mais do que contenções físicas ou protocolos defensivos. Ela se sustenta no desenvolvimento das competências interpessoais e emocionais dos profissionais da aviação. A literatura especializada e as boas práticas internacionais apontam para um modelo preventivo baseado em empatia, regulação emocional, escuta ativa e comunicação não violenta. São ferramentas que, longe de serem apenas *soft skills*, configuram recursos críticos de segurança. Como destaca Vieira (2010), o maior gatilho para a raiva a bordo é a comunicação inadequada; por isso, é imprescindível capacitar a tripulação para manter o controle através do treinamento das habilidades de comunicação. Rhoden (2007) reforça que, antes de uma crise, há diversas oportunidades de diálogo que podem evitar a escalada do conflito.

Nesse cenário, propõem-se a ampliação do atual modelo de *Crew Resource Management* (CRM) para "*Integrated Aviation Human Factors Training* (IAHFT)" um modelo de treinamento mais abrangente, com representantes de diferentes setores da aviação e foco na mediação de conflitos, atualização dos protocolos de atendimento a passageiros agressivos, implantação de canais de apoio emocional aos trabalhadores da aviação e a realização de campanhas educativas voltadas aos passageiros, que vão além dos avisos legais e promovem uma cultura de convivência respeitosa. Essa abordagem promove a integração sistêmica e não compartimentada do setor aéreo, fortalecendo a cooperação interdepartamental e formando multiplicadores conscientes da interdependência entre setores. Um aspecto que ganha urgência é o preparo para lidar com a cultura digital de exposição, é fundamental que os profissionais recebam capacitação específica para reagir com equilíbrio e segurança às situações envolvendo mídias sociais. Como apontam IATA (2023), FAA (2023) e SHRM (2023), investir nas pessoas é investir em prevenção: a segurança da aviação depende de respostas humanas, integradas e contínuas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Air Rage não é um desvio isolado de conduta, mas um termômetro de desequilíbrios sociais que transbordam para o ambiente aéreo. Tratar esse fenômeno apenas com manuais e punições é ignorar a principal variável da equação da segurança: o ser humano. A aviação moderna exige mais do que competência técnica, exige preparo emocional, cultura de prevenção e liderança comprometida com o cuidado real. Em um cenário de voos lotados, redes sociais incendiárias e saúde mental em queda, precisamos de companhias que não apenas gerenciem riscos, mas acolham vulnerabilidades. A comunicação, frequentemente tratada como talento, precisa ser reconhecida como uma ferramenta estratégica de segurança, treinável, mensurável e indispensável. Reduzir falhas de comunicação é reduzir riscos operacionais. Cuidar das emoções das equipes é cuidar da operação inteira. Chegou a hora de transformar o céu em um espaço onde a prevenção silenciosa fale mais alto do que a reação punitiva. Onde a empatia seja vista como competência operacional. Onde proteger seja também compreender. Porque, ao final, o que verdadeiramente sustenta um avião no ar não é apenas a engenharia. É o humano que sustenta o humano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abear – Associação Brasileira das Empresas Aéreas (2024). Transporte aéreo: Brasil registra mais de um caso de passageiro indisciplinado por dia. Disponível em: https://www.abear.com.br/imprensa/agencia-abear/noticias/transporte-aereo-brasil-registra-mais-de-um-caso-de-passageiro-indisciplinado-por-dia/ (acesso em 13/07/2025).

ASRS (2010) Callback Issue 370 – Situational Awareness in Maintenance. *Aviation Safety Reporting System*, outubro. Disponível em: https://asrs.arc.nasa.gov/publications/callback/cb_370.html (acesso em 14/07/2025).

ASRS (2019) Callback Issue 477 – Interactions in Sync — or Not? *Aviation Safety Reporting System*, outubro. Disponível em: https://asrs.arc.nasa.gov/publications/callback/cb_477.html (acesso em 14/07/2025).

ASRS (2023) Callback Issue 520 – The Merits of Maintenance Training. *Aviation Safety Reporting System*, maio. Disponível em: https://asrs.arc.nasa.gov/publications/callback/cb_520.html (acesso em 14/07/2025).

ASRS (2017) Advisory Circular AC. No. 1426550. Moffett Field: NASA's Ames Research Center.

Bauman, Z. (2001) *Modernidade líquida*. Rio de Janeiro: Zahar.

BBC (2012) JetBlue flight diverted after pilot's 'erratic' behavior. *BBC News*, 28 mar. Disponível em: https://www.bbc.com/news (acesso em 14/07/2025).

Business Insider (2025) Woman tried to open plane door mid-flight and punched flight attendants.

Click Guarulhos (2024) Passageiro embriagado agride três funcionários e é contido pela PF no aeroporto. *Click Guarulhos*, 10 jun. Disponível em: https://www.clickguarulhos.com.br/2024/06/10/passageiro-embriagado-agride-tres-funcionarios-e-e-contido-pela-pf-no-aeroporto/ (acesso em 14/07/2025).

CNN (2022) Air France suspends pilots after cockpit fight. *CNN*, 29 ago. Disponível em: https://edition.cnn.com/2022/08/29/business/air-france-pilot-fight/index.html (acesso em 13/07/2025).

CNN (2023) Off-duty Alaska Airlines pilot charged after trying to shut off engines midflight. *CNN*, 24 out. Disponível em: https://www.cnn.com/2023/10/24/us/alaska-airlines-off-duty-pilot-midair-disruption/index.html (acesso em 13/07/2025).

CNN Brasil (2024) Passageiro agride funcionários e policiais após perder voo em Guarulhos. *CNN Brasil*, 15 dez. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/passageiro-agride-funcionarios-e-policiais-apos-perder-voo-em-guarulhos/ (acesso em 14/07/2025).

CNN Brasil (2025) Passageira tenta invadir cabine em voo da American Airlines. *CNN Brasil*, 12 abr.

Damasio, A. (2012) *O erro de Descartes: emoção, razão e o cérebro humano*. São Paulo: Companhia das Letras.

FAA (2023) ACT ARC Recommendations and FAA Responses. Washington, DC. Disponível em: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afx/afs/afs200/afs280/act_arc/act_arc_reco (acesso em 14/07/2025).

Foucault, M. (2014) *Vigiar e punir: nascimento da prisão* (20. ed.). Petrópolis: Vozes.

G1 (2024) Passageira é contida em voo da Azul após agressões. *G1*, 14 set.

General Aviation News (2025) Controller loses situational awareness. *General Aviation News*, 8 maio. Disponível em: https://www.generalaviationnews.com/2025/05/08/controller-loses-situational-awareness/ (acesso em 14/07/2025).

GRU Diário (2024) Passageiro que perdeu voo para Fortaleza agride funcionários e ofende policiais federais. *GRU Diário*, 15 dez. Disponível em: https://grudiario.com.br/passageiro-que-perdeu-voo-para-fortaleza-agride-funcionarios-e-ofende-policiais/ (acesso em 14/07/2025).

Han, B. (2017) *A sociedade da transparência*. Petrópolis: Vozes.

IATA (2024) *Annual Safety Report*. Disponível em: https://www.iata.org (acesso em 14/07/2025).

Metrópoles (2024) Passageiro embriagado agride funcionários no Aeroporto de Guarulhos. *Metrópoles*, 10 jun. Disponível em: https://www.metropoles.com/brasil/passageiro-embriagado-agride-funcionarios-no-aeroporto-de-guarulhos (acesso em 14/07/2025).

Mighty Travels (2024) *Airline Crew Fatigue: A Growing Safety Concern*. Disponível em: https://www.mightytravels.com (acesso em 14/07/2025).

People (2025) Angry passenger attacks crew, forces flight back to JFK. *People*, 8 abr.

Rhoden, S. e Ralston, R. (2007) Cabin crew training to control disruptive airline passenger behavior: a cause for tourism concern? *Tourism Management*, v. 29, n. 3, p. 538–547. DOI: 10.1016/j.tourman.2007.06.012

SHRM (2023) Air Rage: Why Airlines Are Training Employees in Conflict De-escalation. *SHRM*. Disponível em: https://www.shrm.org/mena/topics-tools/news/hr-magazine/training-air-rage (acesso em 14/07/2025).

The Guardian (2024) US airlines attempt crackdown on air rage incidents – but why are they so common? *The Guardian*, 7 dez. Disponível em: https://www.theguardian.com/us-news/2024/dec/07/air-rage-unruly-passengers-crackdown (acesso em 14/07/2025).

The Guardian (2024) Air Rage: airlines face growing wave of in-flight violence. *The Guardian*. Disponível em: https://www.theguardian.com (acesso em 14/07/2025).

Turkle, S. (2015) *Alone Together: Why We Expect More from Technology and Less from Each Other*. New York.

UOL (2024) Assento apertado em voos incomoda brasileiro mais do que criança barulhenta. *UOL – Todos a Bordo*, 30 nov. Disponível em: https://economia.uol.com.br/colunas/todos-a-bordo/2024/11/30/assento-apertado-em-voos-incomoda-brasileiro-mais-do-que-crianca-barulhenta.htm (acesso em 14/07/2025).

UOL (2024) Passageiro da Gol agride esposa e ameaça tripulantes. *UOL*, 8 ago.

Vieira, A. M. e Santos, C. I. (2010) Communication skills in extreme situations. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 2, n. 2, p. 205–214. DOI: 10.5028/jatm.2010.020224210

MOBILIDADE DO CUIDADO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Juliane Érika Cavalcante Bender[1,2], **Matheus Henrique de Sousa Oliveira**[1], **Isabella Martins de Almeida**[1], **Isabella Mayara Abreu da Hora**[1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Engenharia de Transportes – COPPE/UFRJ
[2]Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Departamento de Engenharia de Transportes, Química e Minas (DTQM)

RESUMO
A mobilidade do cuidado abrange deslocamentos historicamente invisibilizados nas políticas de transporte, como levar crianças à escola, acompanhar idosos e realizar tarefas domésticas. Esta revisão sistemática analisa 11 estudos publicados entre 2009 e 2024, identificados nas bases Scopus, Web of Science e Science Direct. Os trabalhos selecionados discutem definições, metodologias e resultados sobre a mobilidade do cuidado. Os achados evidenciam a centralidade das mulheres nesses deslocamentos, sua interdependência e os desafios metodológicos para mensuração. A revisão também destaca a ausência de estudos no Brasil e a necessidade de incorporar a perspectiva do cuidado ao planejamento de transportes urbanos.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é moldada por estruturas sociais que perpetuam desigualdades de gênero, classe e outros marcadores sociais. No planejamento dos transportes, prevalece a priorização de deslocamentos produtivos, especialmente os relacionados ao trabalho, em detrimento de viagens vinculadas ao cuidado — como acompanhar crianças, idosos ou realizar tarefas domésticas (Grant-Smith; Osborne; Johnson, 2017; Sánchez de Madariaga; Zucchini, 2019).

Esse viés resulta na exclusão de necessidades específicas, como horários flexíveis, integração modal e infraestrutura acessível, o que afeta de forma desproporcional as mulheres (Montoya-Robledo et al., 2020; Murillo-Munar; Gómez-Varo; Marquet, 2023). A mobilidade do cuidado, conceito proposto por Sánchez de Madariaga (2009, 2013), visa evidenciar esse tipo de deslocamento, geralmente invisibilizado nas políticas públicas. Em Madrid, essas viagens representam cerca de 28% dos deslocamentos diários (Ravensbergen, Fournier e El-Geneidy, 2023), enquanto em Bogotá somam 11,8% (Murillo-Munar; Gómez-Varo; Marquet, 2023).

Contudo, a mensuração desse tipo de mobilidade ainda é um desafio. Apenas algumas cidades, como Bogotá e Madrid, incluíram dados sobre viagens de cuidado em suas pesquisas de mobilidade (Sánchez de Madariaga; Zucchini, 2019; Murillo-Munar; Gómez-Varo; Marquet, 2023). Diante disso, o presente trabalho busca por meio de uma revisão sistemática identificar como essa categoria tem sido tratada em pesquisas internacionais, com ênfase nas definições, métodos utilizados e principais resultados. A análise se justifica diante da lacuna de estudos no Brasil e da necessidade de integrar o cuidado como categoria de deslocamento relevante no planejamento de transportes.

2. CONCEITOS INICIAIS

Kergoat (2009) define cuidado como uma relação de serviço, apoio e assistência, que pode ou não ser remunerada, implicando responsabilidade pelo bem-estar de outra pessoa. Essa definição abrange tanto o cuidado material, que envolve custos econômicos, quanto o cuidado emocional, que estabelece um vínculo afetivo (Batthány, 2004). A partir dos anos 1980, esse conceito começou a ganhar relevância nos estudos econômicos, principalmente no âmbito da crítica feminista, ao reconhecer o trabalho doméstico como uma carga adicional imposta às mulheres (Middleton e Samanani, 2021). Dessa forma, o trabalho de *care*, para efeitos de simplificação, será traduzido como trabalho do cuidado, envolvendo o âmbito remunerado e não-remunerado, ou seja, ao campo do trabalho profissional (*care work*) e também à esfera do privado, do doméstico, da família (Guimarães *et al.*, 2011).

Daly e Lewis (2000) descrevem o cuidado como um trabalho socialmente organizado, envolvendo diversas pessoas, instituições, famílias e organizações. Nesse contexto, o cuidado se estrutura em uma relação entre Estado, mercado e família, formando um triângulo social e institucional no qual as mulheres ocupam uma posição central.

De acordo com a Sánchez de Madariaga (2013), o conceito de mobilidade do cuidado, desafia as atuais prioridades na elaboração de políticas de transporte e de planejamento urbano, onde os deslocamentos por motivo trabalho são considerados os principais e de maior volume, pois, aparentemente, a maioria das viagens são realizadas por esse propósito. Ao se utilizar o conceito apresentado, percebe-se que, de fato, o trabalho seria um dos dois principais motivos, ao lado das viagens de cuidado.

3. MÉTODO E MATERIAIS

A revisão seguiu critérios sistemáticos de busca e seleção. Foram consultadas as bases Scopus, Web of Science e Science Direct durante abril de 2024, utilizando o descritor: *"mobilit* of care" AND gender*. O recorte temporal abrangeu os anos de 2009 a 2024, período marcado pela consolidação do conceito de mobilidade do cuidado, conforme proposta de Sánchez de Madariaga (2009).

A busca inicial resultou em 46 artigos. Após remoção de duplicatas e leitura de títulos, resumos e textos completos, foram selecionados 11 artigos com aderência temática comprovada, conforme apresentado pela Figura 1. Os critérios de inclusão envolveram: estar publicado em periódico acadêmico, abordar diretamente a mobilidade do cuidado e apresentar recorte metodológico explícito. Dois trabalhos centrais (Sánchez de Madariaga, 2013; Sánchez de Madariaga & Zucchini, 2019) foram incluídos por sua relevância teórica, mesmo sendo capítulos de livros.

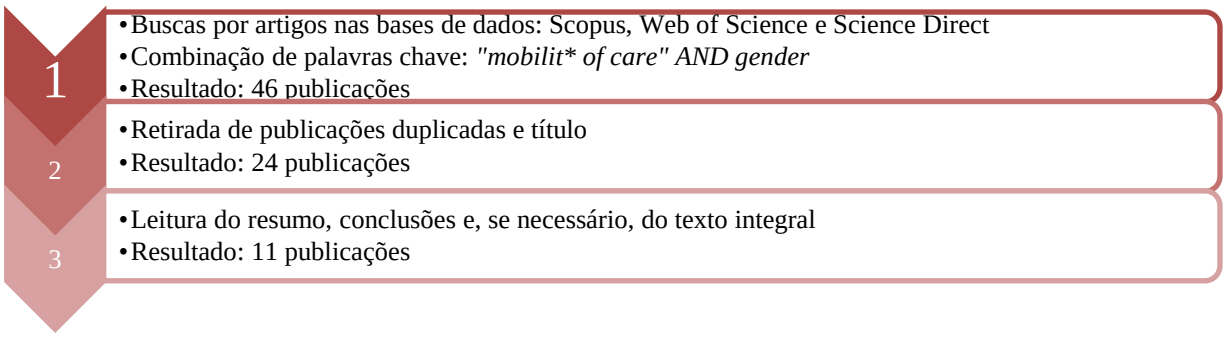


Figura 1: Método de filtragem de publicações aplicado

4. RESULTADOS

4.1. Definições utilizadas e abrangência

A definição de trabalho e mobilidade do cuidado utilizada pelos estudos é muito semelhante àquela apresentada por Sánchez de Madariaga (2009, 2013). Primeiramente, o trabalho do cuidado é entendido como uma atividade, geralmente não remunerada, realizada por adultos para garantir o bem-estar de crianças, idosos, pessoas com deficiência e outros dependentes. Essa definição destaca a natureza invisível e frequentemente desvalorizada do trabalho de cuidado, realizado principalmente por mulheres no âmbito doméstico. O cuidado também é definido como o conjunto de atividades necessárias para a reprodução da vida, incluindo as tarefas domésticas, o cuidado com os dependentes, a organização do lar e a gestão das necessidades da família. Dessa forma, a mobilidade do cuidado é definida de forma análoga como o conjunto de deslocamentos realizados para o acesso a atividades de cuidado. Essa definição destaca a dimensão espacial do cuidado, reconhecendo que o acesso a serviços, equipamentos e pessoas que necessitam de cuidados implica em deslocamentos. Além disso, os textos reconhecem que a mobilidade do cuidado engloba uma variedade de propósitos, como: levar crianças à escola, médicos ou a atividades extracurriculares, fazer compras, realizar tarefas domésticas e visitar familiares e amigos que necessitam de apoio.

Não foram identificados trabalhos que buscam analisar a mobilidade do cuidado no contexto brasileiro. Quatro artigos são focados em cidades da América Latina ((Jirón *et al.*, 2020; Luneke *et al.*, 2021; Montoya-Robledo *et al.*, 2020; Murillo-Munar *et al.*, 2023) o que indica a relevância deste assunto para países do Sul Global.

4.2. Perfil das cuidadoras

Diversos estudos, incluindo os realizados no Cairo (Tawfik *et al.*, 2023), Bogotá (Murillo-Munar *et al.*, 2023)

e Madrid (Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2020), demonstram consistentemente que as mulheres são responsáveis pela maior parte dos deslocamentos relacionados ao cuidado, independentemente do contexto cultural ou do nível de desenvolvimento. Essa disparidade de gênero destaca a persistência de normas sociais que atribuem às mulheres a responsabilidade primária pelo cuidado de crianças, idosos e outros dependentes (Montoya-Robledo *et al.*, 2020; Ravensbergen *et al.*, 2023; Tawfik *et al.*, 2023). A responsabilidade desigual pelo cuidado influencia as escolhas profissionais e residenciais das mulheres (Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2020). Além disso, o estudo de Murillo-Munar, Gómez-Varo e Marquet (2023) corrobora com a afirmação Sánchez de Madariaga e Zucchini (2019) que as viagens de cuidado são realizadas em sua maioria por pessoas entre 30 a 45 anos.

Vale ressaltar que a presença de dependentes no domicílio, especialmente crianças menores de idade, é um fator crucial para explicar a maior frequência de viagens de cuidado entre mulheres mais jovens e de meia-idade (Gómez-Varo *et al.*, 2023; Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2020). A necessidade de levar e buscar filhos na escola, levá-los a atividades extracurriculares e consultas médicas, entre outras responsabilidades, contribui para a intensificação da mobilidade do cuidado nesse grupo etário, de 30 a 45 anos. É importante destacar que, embora a idade seja um fator importante, a análise da faixa etária predominante nas viagens de cuidado deve ser contextualizada, considerando outros fatores como gênero (Gómez-Varo *et al.*, 2023; Grant-Smith *et al.*, 2017; Jirón *et al.*, 2020), estrutura familiar (Gómez-Varo *et al.*, 2023; Luneke *et al.*, 2021; Murillo-Munar *et al.*, 2023), estado ocupacional (Jirón *et al.*, 2020; Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2019) e contexto sociocultural (Isaksen e Näre, 2019; Luneke *et al.*, 2021).

4.3. Características dos deslocamentos

Os deslocamentos de cuidado tendem a ser mais curtas do que as viagens para outros fins, como trabalho ou estudo (Gómez-Varo *et al.*, 2023; Murillo-Munar *et al.*, 2023). Em Barcelona, por exemplo, 60% das viagens de cuidado são realizadas a pé ou de bicicleta, o que sugere que a maioria dessas viagens ocorre em curtas distâncias e potencialmente em horários mais flexíveis (Gómez-Varo *et al.*, 2023). Em Madrid, mais de 40% das viagens de cuidado têm duração inferior a 10 minutos (Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2019). No entanto, a necessidade de combinar as viagens de cuidado com outras responsabilidades, como trabalho ou estudo, pode restringir a flexibilidade de horários.

A disparidade de gênero na mobilidade de cuidados limita a autonomia e a liberdade de movimento das mulheres, restringindo seu acesso a oportunidades de educação, emprego, lazer e participação social (Luneke *et al.*, 2021). A necessidade de realizar múltiplas viagens de cuidado, frequentemente em horários e condições desfavoráveis, impõe barreiras à mobilidade feminina. As pesquisas no Cairo (Tawfik *et al.*, 2023), Bogotá (Murillo-Munar *et al.*, 2023) e Montreal (Ravensbergen *et al.*, 2023) revelam que fatores como nível de renda, tipo de emprego e acesso a transporte influenciam a distância, duração e modo de transporte utilizado em viagens do cuidado. Por exemplo, mulheres de baixa renda com empregos informais e acesso limitado a transporte público frequentemente enfrentam maiores dificuldades para conciliar as responsabilidades de cuidado com as necessidades de mobilidade.

4.4. Métodos de pesquisa utilizados

Autores (Jirón *et al.*, 2020; Luneke *et al.*, 2021; Murillo-Munar *et al.*, 2023) apontaram que as pesquisas tradicionais de transporte frequentemente subestimam a extensão da mobilidade do cuidado, pois não capturam adequadamente as viagens curtas, viagens em cadeia e viagens multipropósitos que caracterizam esses deslocamentos. Essa invisibilidade dificulta a elaboração de políticas de transporte eficazes que atendam às necessidades específicas dos cuidadores.

Dos quatro trabalhos que utilizaram dados de pesquisas Origem-Destino para suas investigações sobre a mobilidade (Gómez-Varo *et al.*, 2023; Murillo-Munar *et al.*, 2023; Ravensbergen *et al.*, 2023; Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2020) dois, Murillo-Munar, Gómez-Varo e Marquet (2023) e Sánchez de Madariaga e Zucchini (2020), utilizaram pesquisas que contavam com o motivo de viagem “cuidado”, os demais estudos precisaram adaptar os motivos existentes para criar essa categoria. Dessa forma, há um desencontro de metodologia a ser replicada. Outros estudos empregaram metodologias baseadas em entrevistas semiestruturadas (Croucher *et al.*, 2021; Montoya-Robledo *et al.*, 2020; Ravensbergen *et al.*, 2020; Sersli *et al.*, 2020; Tawfik *et al.*, 2023) resultando em resultados qualitativos. Por fim, o estudo de (Jirón *et al.*, 2020)

aplicaram o acompanhamento, ou *shadowing*, método de pesquisa etnográfica, para observar como uma "sombra" os deslocamentos e relações das pessoas integrantes de um grupo familiar selecionados pelo estudo.

A mobilidade do cuidado é um conceito relevante para a compreensão de padrões e desigualdades de mobilidade. Diversas pesquisas (Jirón *et al.*, 2020; Montoya-Robledo *et al.*, 2020; Inés Sánchez de Madariaga e Zucchini, 2020; Sersli *et al.*, 2020; Tawfik *et al.*, 2023) argumentam que ela deve ser reconhecida como uma categoria analítica distinta na pesquisa e planejamento de transportes. Ao considerar a interdependência entre responsabilidades de cuidado e deslocamentos, os autores concordam que podem ser desenvolvidas políticas que promovam a equidade de gênero e a inclusão social no acesso à mobilidade. É possível afirmar, assim, que as pesquisas analisadas convergem, de forma geral, na necessidade de integrar a perspectiva de gênero e a atenção às necessidades dos cuidadores na elaboração de políticas de transporte mais justas e eficientes.

5. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica destaca que a mobilidade do cuidado é um conceito-chave para compreender as desigualdades de gênero e as dinâmicas sociais associadas às responsabilidades de cuidado, frequentemente invisibilizadas nas análises tradicionais de transporte.

A literatura explorada aponta que o trabalho do cuidado é caracterizado como uma atividade essencial, embora frequentemente não remunerada, realizada por adultos para atender às necessidades de dependentes, como crianças, idosos e pessoas com deficiência (Kergoat, 2009). Esse trabalho inclui tanto dimensões materiais, como a provisão de bens e serviços, quanto emocionais, como a construção de vínculos afetivos (Batthány, 2004). Essas responsabilidades recaem desproporcionalmente sobre as mulheres, refletindo normas sociais que perpetuam desigualdades de gênero (Guimarães *et al.*, 2011).

Sánchez de Madariaga (2013) introduz o conceito de mobilidade do cuidado para evidenciar os deslocamentos associados a essas atividades. Esses deslocamentos, muitas vezes realizados em horários e condições específicas, incluem levar crianças à escola, realizar compras para o lar ou acompanhar dependentes a serviços essenciais. A análise dessas viagens revela padrões de interdependência entre as pessoas que cuidam e aquelas que recebem cuidado, como ilustrado por Jirón, Carrasco e Rebolledo (2020). No entanto, as políticas de transporte urbano historicamente priorizam deslocamentos de trabalho, desconsiderando as particularidades e os desafios associados à mobilidade do cuidado.

A ausência de dados específicos sobre deslocamentos de cuidado é uma lacuna crítica identificada na literatura. Estudos como os de Murillo-Munar, Gómez-Varo e Marquet (2023) mostram que mesmo em cidades onde a mobilidade do cuidado foi mapeada, como Bogotá, esses deslocamentos continuam subestimados e pouco compreendidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batthány, K. (2004) *Cuidado infantil y trabajo: ¿un desafío exclusivamente femenino?; una mirada desde el género y la ciudadanía social*. CINTERFOR, Montevideo.

Croucher, K., Gilroy, R., Bevan, M., e Attuyer, K. (2021) The mobilities of care in later life: Exploring the relationship between caring and mobility in the lives of older people. *Ageing and Society*, *41*(8), 1788–1809. doi:10.1017/S0144686X20000100

Daly, M., e Lewis, J. (2000) The concept of social care and the analysis of contemporary welfare states. *The British Journal of Sociology*, *51*(2), 281–298. doi:10.1111/j.1468-4446.2000.00281.x

Gómez-Varo, I., Delclòs-Alió, X., Miralles-Guasch, C., e Marquet, O. (2023) Accounting for care in everyday mobility: an exploration of care-related trips and their sociospatial correlates. *Geografiska Annaler, Series B: Human Geography*. doi:10.1080/04353684.2023.2226157

Grant-Smith, D., Osborne, N., e Johnson, L. (2017) Managing the challenges of combining mobilities of care and commuting: an Australian perspective. *Community, Work and Family*, *20*(2), 201–210. doi:10.1080/13668803.2016.1202194

Guimarães, N. A., Hirata, H. S., e Sugita, K. (2011) Cuidado e Cuidadoras: O Trabalho de care no Brasil, França e Japão. *Sociologia & antropologia*, *01*, 151–180.

Isaksen, L. W., e Näre, L. (2019) Local loops and micro-mobilities of care: Rethinking care in egalitarian contexts. *Journal of European Social Policy*, *29*(5), 593–599. doi:10.1177/0958928719879669

Jirón, P., Carrasco, J. A., e Rebolledo, M. (2020) Observing gendered interdependent mobility barriers using an ethnographic and time use approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *140*, 204–214.

doi:10.1016/j.tra.2020.08.018
Kergoat, D. (2009) Divisão sexual do trabalho e relações sociais do sexo. H. Hirata, F. Laborie, H. Doaré, & D. Senotier (Eds), *Dicionário Crítico do Feminismo* (1º ed, p. 67–75). Editora UNESP, São Paulo.
Luneke, A., Rasse, A., e Ugalde, I. (2021) Im-mobilities of care: Gendered Spaces and Practices in Segregated Urban Territories. *ARQ (Santiago)*, (109), 38–49. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0717-69962021000300038
Middleton, J., e Samanani, F. (2021) Accounting for care within human geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, *46*(1), 29–43.
Montoya-Robledo, V., Montes Calero, L., Bernal Carvajal, V., Galarza Molina, D. C., Pipicano, W., Peña, A. J., Pipicano, C., López Valderrama, J. S., Fernández, M. A., Porras, I., Arias, N., e Miranda, L. (2020) Gender stereotypes affecting active mobility of care in Bogotá. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *86*. doi:10.1016/j.trd.2020.102470
Murillo-Munar, J., Gómez-Varo, I., e Marquet, O. (2023) Caregivers on the move: Gender and socioeconomic status in the care mobility in Bogotá. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *21*. doi:10.1016/j.trip.2023.100884
Ravensbergen, L., Buliung, R., e Sersli, S. (2020) Vélomobilities of care in a low-cycling city. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *134*, 336–347. doi:10.1016/j.tra.2020.02.014
Ravensbergen, L., Fournier, J., e El-Geneidy, A. (2023) Exploratory Analysis of Mobility of Care in Montreal, Canada. *Transportation Research Record*, *2677*(1), 1499–1509. doi:10.1177/03611981221105070
Sánchez de Madariaga, Ines. (2009) Vivienda, movilidad y urbanismo para la igualdad en la diversidad: ciudades, género y dependencia. *Ciudad y Territorio - Estudios Territoriales*, (XLI), 581–598.
Sánchez de Madariaga, Inés. (2013) Mobility of Care: Introducing New Concepts in Urban Transport. *Fair Shared Cities* (1º ed). Routledge.
Sánchez de Madariaga, Inés, e Zucchini, E. (2019) Measuring mobilities of care, a challenge for transport agendas. *Integrating Gender into Transport Planning: From One to Many Tracks* (p. 145–173). Palgrave Macmillan. doi:10.1007/978-3-030-05042-9_7
Sánchez de Madariaga, Inés, e Zucchini, E. (2020) The "mobility of care" in Madrid: Applying innovative criteria for transportation policies. *Ciudad y Territorio - Estudios Territoriales*, *52*(203), 89–102. doi:10.37230/CyTET.2020.203.08
Sersli, S., Gislason, M., Scott, N., e Winters, M. (2020) Riding alone and together: Is mobility of care at odds with mothers' bicycling? *Journal of Transport Geography*, *83*. doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102645
Tawfik, R., Attia, S., Elbarmelgy, I. M., e Abdelaziz, T. M. (2023) Gender and mobility: enhancing the Egyptian working women's travel pattern. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, *17*(4), 725–742. doi:10.1108/ARCH-03-2022-0065

Juliane Erika Cavalcante Bender (bender@pet.coppe.ufrj.br)
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Departamento de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-594
Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia de Transportes, Química e Minas, Av. Fernando Correa da Costa, 2367, Bairro Boa Esperança, Cuiabá, MT, CEP: 78060-900.
Matheus Henrique de Sousa Oliveira (matheus@pet.coppe.ufrj.br)
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Departamento de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-594
Isabella Martins de Almeida (isabellamartins@pet.coppe.ufrj.br)
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Departamento de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-594
Isabella Mayara Abreu da Hora (isabelladahora@pet.coppe.ufrj.br)
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Departamento de Transportes, Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. CEP: 21941-594

O ACESSO AO TRANSPORTE CICLOVIÁRIO DOS MORADORES DE HABITAÇÃO SOCIAL EM FORTALEZA COMO SOLUÇÃO DE MOBILIDADE

Patricia Pessoa Lima, Camila Cavalcante Bandeira, Mateus Soares Barboza
UNIFOR – Universidade de Fortaleza

RESUMO
Este estudo investiga a relação entre a expansão da infraestrutura cicloviária e a localização de habitações de interesse social (HIS) em Fortaleza, buscando identificar estratégias para promover a mobilidade sustentável entre populações de baixa renda. Entre 2012 e 2025, Fortaleza ampliou sua malha cicloviária de 68,8 km para 526,10 km, um crescimento de aproximadamente 730%, apoiado por planos como o PDCI. Paralelamente, o programa Minha Casa Minha Vida entregou cerca de 34 mil unidades HIS nesse período, em áreas como Parangaba e Bom Jardim que apresentam maior proximidade com redes cicloviárias e outros modais, e também em regiões como Castelão e Passaré que ainda carecem de infraestrutura cicloviária. Apesar dos planos relacionados à mobilidade serem instrumentos posteriores à implantação da maioria dessas habitações, verifica-se o atendimento de quase 40% dessa população por estas infra estruturas, mas ainda há oportunidades de potencializar esses acessos e fazer da bicicleta uma opção de mobilidade para populações de baixa renda.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A cidade de Fortaleza possui hoje uma vasta população habitando em condomínios populares, em especial, os chamados HIS- Habitação de interesse social, segmento destinado à população com renda de 0 a 3 salários mínimos, que, através do Programa Minha Casa Minha Vida, recebem subsídio integral para adquirir um imóvel. (HABITAFOR, 2024). Estima-se que o volume de habitações entregues nos últimos 20 anos nesse segmento, seja de aproximadamente 34 mil unidades, segundo dados da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Habitacional de Fortaleza (HABITAFOR, 2024), órgão responsável pelo cadastro e gestão dos beneficiários. Muitas críticas são feitas à escolha da localização destes empreendimentos, no que concerne à acessibilidade às atividades como estudo e trabalho (Cavalcante et al., 2020). Estas escolhas impõem ao cidadão uma demanda de deslocamento muitas vezes onerosa em custo e em tempo, uma vez que as soluções de mobilidade acabam por ser pensadas após a ocupação efetiva dos territórios.
A Política de Transporte de Bicicletas de Fortaleza foi instituída pela Lei 10.303 em dezembro de 2014, criando também a Secretaria de Ciclismo da Cidade. A criação da lei foi orientada pelo Plano Diretor Integrado de Ciclismo - PDCI, elaborado no final de 2014, e determina todas as diretrizes para o modo bicicleta na cidade, no horizonte de ação até o ano de 2030. O objetivo do plano é priorizar a bicicleta como meio de transporte malha (Fortaleza (a), 2025)

O PDCI define a metodologia utilizada para implantação da rede cicloviária na cidade. Considerando que a rua tem uma largura finita, é necessário decidir que espaço atribuir a cada meio de transporte. Segundo metodologia definida no PDCI, o desenho da malha foi baseado em: (i) Rotas de desejo, a partir de pesquisas realizadas com a população, (ii) conexão com os terminais e os transportes públicos, (iii) melhoria dos pontos com acidentes envolvendo ciclistas. A partir dessas diretrizes, algumas abordagens como, eliminar faixas de estacionamento para criar ciclovias bidirecionais, modificar a disposição do estacionamento de 45º para paralelo, reduzir a largura das faixas de rolamento, utilizar o canteiro central existente, eliminar uma faixa de rolamento para criar espaço para ciclovias foram utilizados para desenho final da malha (Fortaleza (a), 2025, pág 102).

No mesmo período de elaboração do PDCI, foi implementado o sistema de bicicletas compartilhadas através do Projeto Bicicletar. O sistema é composto por estações, distribuídas em pontos estratégicos da cidade, onde os usuários cadastrados podem retirar uma bicicleta, utilizá-la em seus trajetos e devolvê-la na mesma, ou em outra estação (Bicicletar, 2025). Este projeto adquiriu relevância em pouco tempo e em 2019, por meio da pesquisa de origem destino realizada em Fortaleza, foi revelado que são feitas 215.000 viagens diárias por bicicleta, o que representa 5% de todos os deslocamentos na cidade. (Bicicletar, 2025)

O objetivo deste artigo é compreender a relação entre as regiões atendidas pela malha cicloviária e as regiões de concentração de empreendimentos habitacionais, através de coleta dados relacionados a evolução da malha cicloviária, de 2015 à 2025, período correspondente a implantação da maior parte desta malha, de acordo com o PDCI, e os dados referentes a produção de habitações do tipo HIS (Habitação de Interesse Social), no mesmo período.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho é de natureza quantitativa, e as análises serão realizadas a partir da coleta dos dados sobre a produção habitacional do tipo HIS, fornecidos pela HABITAFOR, e dados da Secretaria de conservação e serviços públicos, relativos a malha cicloviária existente, categorizada por tipologias (ciclovias, ciclofaixas, ciclorrotas, passeios compartilhados. Também foram usados dados do projeto Bicicletar, como número de estações existentes, período de implantação, expansões futuras.

Foi realizada a sobreposição desses dados georreferenciados, através de ferramentas GIS, que possibilitam avaliar espacialmente as relações entre a malha cicloviária e as habitações. Foi criada uma nuvem de influência de 300 metros de distância a partir do eixo das estruturas cicloviárias para avaliar a distância de conexão das habitações com essas estruturas.

3. COLETA E ANÁLISE DE DADOS

3.1 Malha cicloviária e o sistema bicicletar

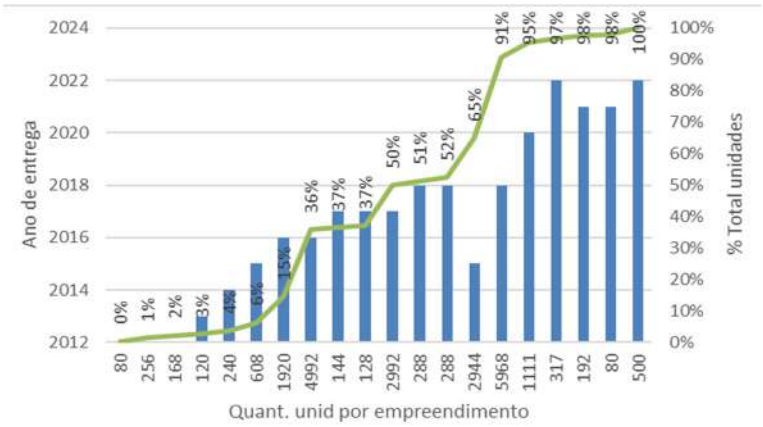
A Malha cicloviária de Fortaleza ao longo dos últimos 14 anos, passou por iniciativas de implementação e expansão para construção de uma malha cicloviária multifocal. A proposta de implantação do PDCI é dividida em 4 fases, sendo a primeira a melhoria da estrutura existente, representando 87,5km, a segunda a curto prazo, até 2020, adicionando 148,7 km, a terceira a médio prazo, até 2025 adicionando 177,5km e a última a longo prazo até 2030, adicionando 112,4 km, somando um total de 526,10km. (Fortaleza (a), 2025, pág 180). Hoje a malha já existente é de 497,8 km de ciclofaixas, ciclovias, ciclorrotas ou passeios compartilhados distribuídos por todas as regionais da Capital. (Fortaleza (b), 2025)

O Sistema Bicicletar foi um projeto estruturado em três fases de implantação e uma fase de expansão. A primeira fase teve início em 2015, com a implantação e funcionamento de 15 estações. Entre 2016 e 2019, na segunda fase do projeto, o sistema passou a contar com 80 estações viabilizadas por meio de patrocínio privado, e a partir de 2020, a última fase, o sistema foi ampliado com acrescentando 115 novas estações financiadas com recursos públicos. Por fim, foram acrescentadas mais 80 estações no período de 2020 a 2023 e em 2024, atingiu-se o total de 253 estações. (Bicicletar 3.0,2024)

3.2 Habitações HIS

O Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), lançado em 2009, foi o maior responsável pela entrega de habitação do tipo HIS em Fortaleza. A produção habitacional deste segmento, no período de estudo deste artigo, foi de 23.336 unidades, distribuídas em 20 condomínios. A distribuição destas entregas é demonstrada pelo gráfico 1. Observa-se entregas de condomínios com tamanhos similares a um bairro, como em 2018, o condomínio Cidade Jardim 2, com 5.968 unidades, dando sequência ao Cidade Jardim 1, já entregue em 2014, com 2.944 unidades. O tamanho desses condomínios tem um impacto muito relevante no tecido urbano existente, e pode alterar a dinâmica da cidade naquela região.

Gráfico 1: Evolução da entrega de habitações no período



Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de HABITAFOR 2024.

Na década anterior a esse estudo, de 2000 a 2012, já haviam sido entregues 9.906 unidades, todas direcionadas

a esta mesma população e já habitadas há algum tempo. Esse volume de unidades também será considerado para efeito de cálculo da população atendida pela infraestrutura cicloviária.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise desses dados, é possível apresentar algumas análises relacionadas ao uso da malha cicloviária como ferramenta de mobilidade para estas populações. É possível observar na Figura 1, que as áreas onde há a maior presença destas habitações ainda não são assistidas plenamente pela malha cicloviária e nem pelas estações, porém, algumas regiões já sinalizam um progresso nesse sentido.

Observando a região oeste, mais especificamente os bairros da Parangaba, Bom Jardim e Antônio Bezerra, verifica-se a presença de estrutura cicloviária próxima às habitações. Esta região se caracteriza também por possuir bastante oferta de comércio e serviços e de outros modais de mobilidade, como algumas estações de metrô. Uma hipótese é de que haja uma sinergia entre esses modais e as bicicletas, de forma que beneficie a população de baixa renda dessa região, aumentando a capilaridade do transporte.

Por outro lado, na região centro sul, nos bairros Castelão e Passaré, onde apresenta-se a maior concentração destas habitações, conforme mostra o mapa de calor, não há a oferta de estações, apenas o planejamento de implantação futura. Ainda assim será necessária também a ampliação da malha cicloviária, quase inexistente na região. Fica evidente que não há relação direta entre a habitação social e o planejamento da rede de transporte por bicicletas, ainda que em algumas regiões essa população ocasionalmente tenha acesso a essa estrutura.

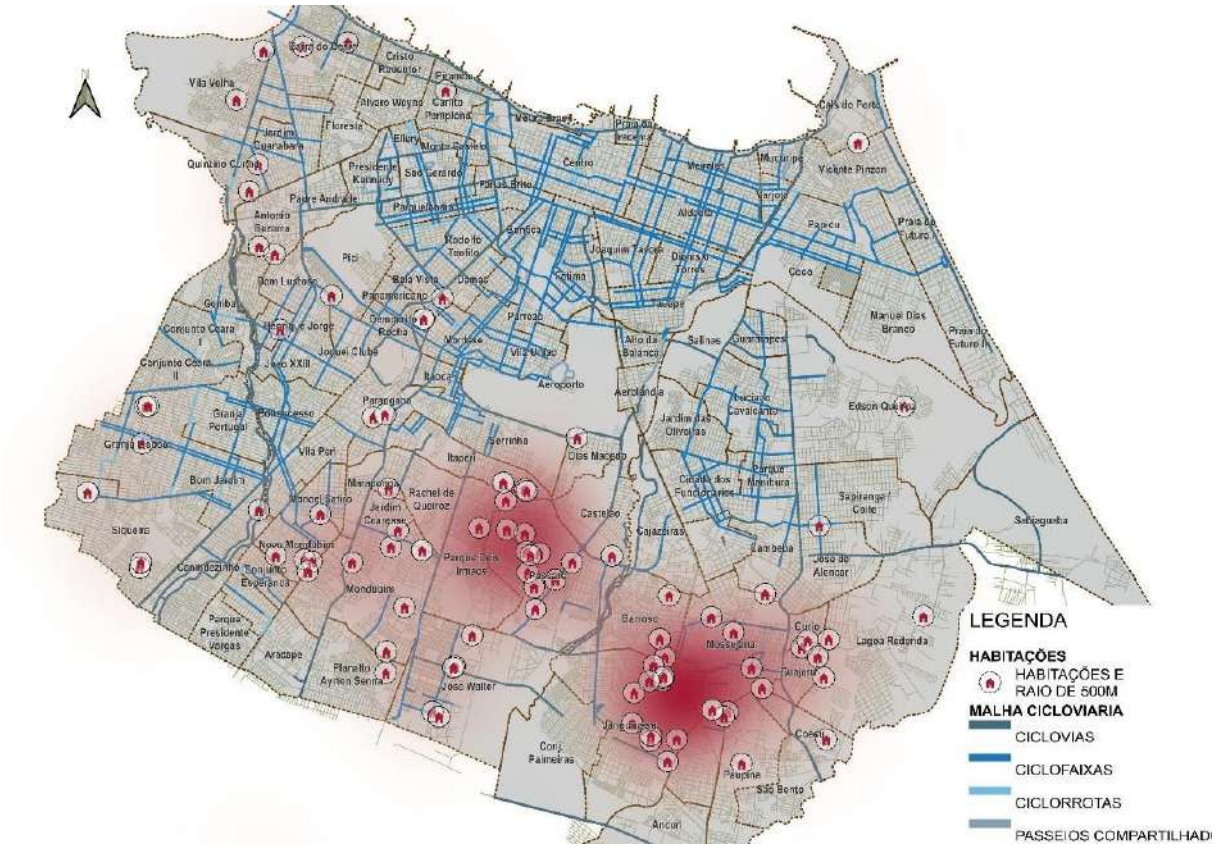


Figura 1: Localização das habitações e infraestrutura cicloviária
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de HABITAFOR,2024; FORTALEZA, 2025

Outro dado encontrado no estudo bastante relevante é sobre a quantidade de habitações e de pessoas que têm acesso direto a esse sistema. Entende-se por acesso direto neste artigo, as habitações que estejam a menos de 300 metros de uma Estação Bicicletar ou da malha cicloviária. O mapa abaixo mostra essas estruturas e uma nuvem de influência de 300m.

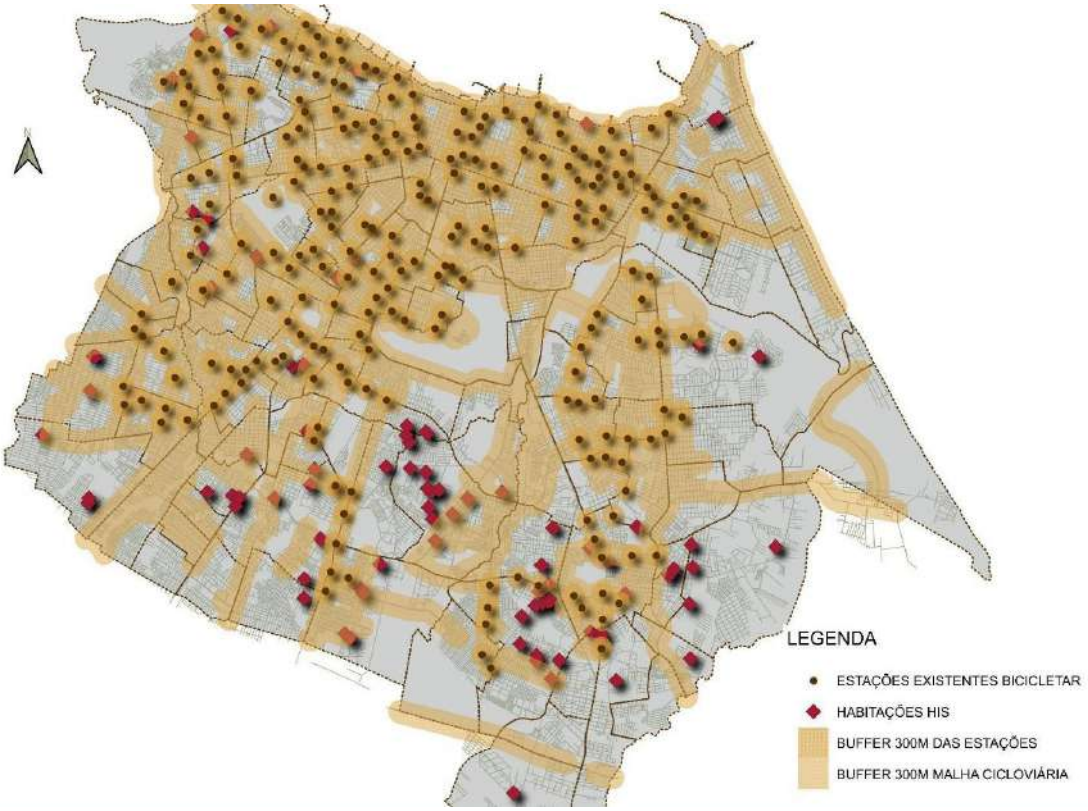


Figura 2: Nuvem de influência da infraestrutura cicloviária
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de HABITAFOR,2024; FORTALEZA, 2025

Os números indicam que 37 dos 98 condomínios estudados estão localizados em até 300 metros de alguma infraestrutura cicloviária, representando 37,7% do total. Com relação às estações, 16 condomínios estão no raio de até 300 metros de uma estação Bicicletar, representando 16,8% do total. Quando analisamos esse número por quantidade de habitações, o impacto se torna ainda mais relevante, do total de 33.242 habitações, 11.553 delas têm acesso a algum dos sistemas, representando 35% das moradias HIS em Fortaleza. Transformando isso em número de usuários, considerando 3 habitantes em cada residência, temos um potencial de 34.659 pessoas utilizando a rede.

Este estudo evidencia que, embora iniciativas como o PASFOR e o sistema Bicicletar tenham avançado consideravelmente na promoção do uso de bicicletas como meio de transporte, ainda existem lacunas significativas na integração entre a malha cicloviária e as habitações de interesse social na cidade de Fortaleza. Uma proporção considerável das habitações HIS não possui acesso adequado à infraestrutura cicloviária ou às estações de bicicletas, limitando o potencial dessa população em usar a bicicleta como alternativa de mobilidade. A ampliação e a melhoria da infraestrutura cicloviária em regiões com alta concentração de habitações sociais podem aumentar significativamente a qualidade de vida desses moradores, se tornando efetivamente uma opção de solução de mobilidade a territórios hoje já consolidados na cidade, onde o espaço urbano para ações de larga escala acaba por ser escasso. À medida que a cidade avança em direção a um futuro mais sustentável, é imperativo que políticas públicas considerem a inclusão social e a igualdade no acesso à infraestrutura de transporte, garantindo que todos os cidadãos possam se beneficiar dessas melhorias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BICICLETAR. Sobre. Disponível em: https://www.bicicletar.com.br/sobre.aspx. Acesso em: 28 jun. 2025.

BRASIL. Lei Ordinária nº 11.390, de 18 de setembro de 2023. Define a Política Municipal de Mobilidade Urbana Sustentável, institui o Plano de Acessibilidade e Mobilidade Urbana Sustentável de Fortaleza e dá outras providências.

CAVALCANTE, C. B.; LOPES, A. S.; CAPASSO, M. M.; LOUREIRO, C. F. G. Análise dos planos diretores de Fortaleza sob o paradigma do planejamento da acessibilidade e mobilidade da Urbe Sustentável. *Urbe - Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, n.e20190271, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190271.

LIMA, L. S.; LOUREIRO, C. F. G.; SOUSA, F. F. L. M.; LOPES, A. S. Espraiamento urbano e seus impactos nas

desigualdades sócio espaciais da acessibilidade ao trabalho em Fortaleza. *Revista Transportes*, v. 29, n. 1, 2021. DOI: <10.14295/transportes.v29i1>.

CALLIL, V.; COSTANZO, D.; COSTANZO, Assis Pereira, C. Estudos de mobilidade por bicicleta. São Paulo: CEBRAP, 2018.

DOCUMENTO. BICICLETAR 3.0. A expansão do sistema de compartilhamento de bicicletas como Política Pública para a promoção de equidade no acesso aos transportes – Prêmio Bicicleta Brasil 2024. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/mobilidade-urbana/programa-bicicleta-brasil/habilitadas/bicicletar-3-0-a-expansao-do-sistema-de-compartilhamento-de-bicicletas-como-politica-publica-para-a-promocao-de-equidade-no-acesso-aos-transportes. Acesso em: 30 jun. 2025.

HABITAFOR. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Habitacional de Fortaleza. Disponível em: https://habitacao.fortaleza.ce.gov.br/inicio/a-habitafor.html. Acesso em: 27 nov. 2024.

SECRETARIA DE CONSERVAÇÃO E SERVIÇOS PÚBLICOS (SCSP). Mobilidade: descrição do serviço. Catálogo de Serviços de Fortaleza. Disponível em: https://catalogodeservicos.fortaleza.ce.gov.br/categoria/mobilidade/servico/127#descricao. Acesso em: 30 jun. 2025.

FORTALEZA (a). Lei Ordinária nº 10.303, de 23 de dezembro de 2014. Institui a Política de Transporte Cicloviário, aprova o Plano Diretor Cicloviário Integrado do Município de Fortaleza e dá outras providências. Disponível em: https://sapl.fortaleza.ce.leg.br/ta/554/text?. Acesso em: 30 jun. 2025.

FORTALEZA (b). Canal Mobilidade. Malha Cicloviária. Disponível em: https://mobilidade.fortaleza.ce.gov.br/menu-programas/malha-ciclovi%C3%A1ria.html. Acesso em: 5 jul. 2025.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Políticas de Desenvolvimento Urbano. Brasília: Ministério das Cidades, 2004. (Cadernos MCidades, Vol. 1).

Patricia Pessoa Lima (pessoa.p@outlook.com)
UNIFOR – Universidade de Fortaleza, Vice reitoria de ensino de graduação e pós graduação, Diretoria de Pós Graduação - Avenida Washington Soares, 1321, Edson Queiroz, Fortaleza - CE, CEP 60811-905

O TRANSPORTE COMO REFLEXO DA DESIGUALDADE URBANA NO RECIFE-PE: O CONTRASTE DE ACESSIBILIDADE ENTRE COHAB E AFOGADOS

Rafaella Paula Palmeira dos Santos, Ligia Rabay
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO
Este artigo analisa como a falta de políticas públicas eficientes no transporte público pode limitar o desenvolvimento social de um bairro, a partir da comparação entre Cohab e Afogados, bairros do Recife-PE. A partir de indicadores de acessibilidade do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), a análise utiliza o índice de acessibilidade cumulativa ativa para entender essas desigualdades entre os dois bairros. Os resultados mostram que há um contraste notável entre ambos, na qual o bairro de Afogados consegue acessar dez vezes mais empregos em até 30 minutos do que Cohab. Essa diferença revela como a mobilidade urbana ainda reproduz desigualdades sociais e limita, de forma concreta, o acesso à oportunidades de empregos. O estudo reforça a necessidade urgente de políticas públicas que ampliem o direito à cidade por meio de um planejamento de transportes mais justo e integrado.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana representa um eixo fundamental das políticas públicas voltadas ao desenvolvimento social, pois é ela que viabiliza o acesso da população a direitos essenciais, como saúde, educação, trabalho e lazer. De acordo com Gehl (2010), a cidade só cumpre plenamente sua função social quando assegura o acesso equitativo a bens, serviços, espaços públicos e sistemas de transporte. A presença humana nesses espaços está diretamente relacionada à possibilidade de deslocamentos seguros, confortáveis e acessíveis.

O direito de ir e vir é constituindo-se como elemento essencial para a realização das atividades cotidianas e para o pleno exercício da cidadania, o que pressupõe a utilização efetiva do sistema de mobilidade urbana (Gonzaga et al., 2024). No entanto, nas cidades brasileiras, o planejamento e a gestão do transporte têm reproduzido desigualdades espaciais, relegando as periferias urbanas uma condição de desvantagem no acesso a oportunidades. Conforme apontam Lizárraga et al. (2014), o modelo tradicional de planejamento do transporte urbano prioriza a lógica da demanda, desconsiderando os aspectos socioeconômicos e espaciais relacionados à equidade. Nesse cenário, o transporte público, que deveria atender às necessidades básicas da população, acaba configurando-se como mais um instrumento de exclusão social.

Compreender como se dão às relações entre mobilidade urbana e a quem ela atende requer apreender que essa está intrinsecamente ligada a uma identidade de políticas públicas destinadas ao setor. Segundo Gonzaga et al. (2024) os padrões de viagens refletem aquelas realizadas (que podem ocorrer de forma digna ou precária) e também as não realizadas. As viagens não realizadas podem ser um indicativo de "imobilidade" e, consequentemente, de exclusão social. Já as viagens precárias também podem significar um desgaste elevado no ato de se deslocar e mesmo um impeditivo para novas viagens e a consequente imobilidade.

Segundo Carlos (2020), a cidade, ao concentrar os principais elementos da vida humana, também abriga sua própria negação, sendo esta, a segregação socioespacial. Tal contradição se expressa na separação e no afastamento entre grupos sociais, instaurando uma prática social fragmentada que nega o pleno sentido da cidade. Assim, a forma urbana deixa de ser um meio de realização cidadã e se torna uma potência alheia ao cidadão. Como consequência, a cidade passa a ser percebida como um espaço de estranhamento, entendido aqui como um mundo marcado pela privação e exclusão.

A cidade do Recife, capital de Pernambuco, exemplifica esse cenário com clareza, profundamente marcada por um histórico de segregação e grandes disparidades socioespaciais, apresentando diferenças acentuadas no acesso à infraestrutura de transporte entre bairros centrais e periféricos. De acordo com o Observatório das Metrópoles (2006), a distribuição espacial da população reflete, não só a distribuição de oportunidades de geração de renda, mas, também está diretamente correlacionada às oportunidades de renda, aos custos de moradia e transporte, portanto, o crescimento populacional na região reflete a dinâmica econômica e o seu processo de urbanização.

Enquanto áreas como Afogados são relativamente integradas à rede de transporte coletivo, bairro como Cohab enfrentam obstáculos como conexões precárias e alta dependência de poucos modos. Essa assimetria revela falhas estruturais na formulação e implementação de políticas públicas de mobilidade. Por isso, este artigo propõe uma análise comparativa entre os bairros, buscando compreender como o acesso ao transporte ou sua ausência influencia diretamente o desenvolvimento social de diferentes bairros suburbanos na mesma cidade. Metodologicamente, essa análise baseia-se na avaliação sistemática de semelhanças e diferenças entre os contextos territoriais, a fim de identificar padrões, contrastes e suas implicações sociais.

Isto posto, o presente trabalho problematiza o papel do Estado na produção e na perpetuação de desigualdades territoriais relativas à mobilidade urbana, e defende que a mobilidade deve ser tratada como um direito social estruturante. Segundo Tomasiello (2020), a acessibilidade é uma medida raramente empregada na avaliação de políticas ou projetos de transporte, porém o transporte deve ser planejado de forma a conectar pessoas aos diversos serviços ofertados em uma cidade, incluindo oportunidades de crescimento pessoal e profissional. Portanto, o estudo tem como objetivo analisar como a precariedade dos sistemas de transporte pode acentuar desigualdades sociais, limitar o acesso a oportunidades e impactar a qualidade de vida da população local a partir de dados socioeconômicos e indicadores de acessibilidade urbana.

2. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem comparativa, com foco na análise territorial da acessibilidade urbana como indicador de desigualdade socioespacial. O objetivo é compreender como as condições de acesso ao transporte público influenciam o desenvolvimento social dos bairros de Cohab e Afogados, na qual são Regiões político-administrativa (RPA), de acordo com o IBGE, situados na cidade do Recife (PE), a partir de indicadores produzidos pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA**)**. Os indicadores de acessibilidade são calculados a partir de dados de acessibilidade urbana. O estudo utilizou o índice de acesso ao emprego formal, na base de dados de 2019, disponível para a cidade do recife.

A metodologia envolveu as etapas de levantamento dos dados geográficos dos bairros de Cohab e Afogados, extração e tabulação do índice de acessibilidade cumulativa ativa da plataforma do IPEA, considerando dados de trabalho para alta escolaridade e baixa escolaridade; comparação dos dados absolutos e relativos entre os dois bairros, considerando os diferentes tempos de deslocamento (30, 60, 90 minutos); e análise crítica das assimetrias observadas, interpretando os resultados à luz de políticas públicas de mobilidade.

O índice de acessibilidade cumulativa ativa é uma métrica desenvolvida para estimar o número de oportunidades (como empregos, escolas ou equipamentos de saúde) acessíveis a partir de um determinado ponto geográfico, considerando um limite máximo de tempo de viagem por um modo específico de transporte. Segundo Pereira et al. (2022), esse indicador corresponde a quantas oportunidades são possíveis de alcançar a partir de um local específico dentro de um tempo determinado, utilizando um determinado meio de transporte.

Além da análise por meio do índice de acessibilidade cumulativa ativa, esta pesquisa também incorporou o levantamento da infraestrutura de transporte público disponível nos dois bairros, com base em dados fornecidos pelo Grande Recife Consórcio de Transporte, com suporte do software QGIS. Essa análise envolveu a identificação e quantificação das linhas de ônibus que cruzam os bairros e a presença de intermodais, buscando compreender as condições reais de oferta de transporte coletivo nesses territórios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os bairros de Cohab e Afogados foram selecionados por apresentarem características territoriais contrastantes, enquanto o bairro Cohab, que está a aproximadamente 15 km do centro (zona sul da cidade), se dá por ser um bairro periférico com ocupação marcada por processos de urbanização informal, infraestrutura precária, difícil conectividade viária e indicadores sociais mais vulneráveis. O bairro de Afogados, que está a cerca de 6 km do centro do Recife (praça do Marco Zero), é um bairro de localização mais central, mais bem estruturado em termos de transporte, acessibilidade e integração com o sistema viário da cidade. Para além da análise de acessibilidade, os dados socioeconômicos reforçam o contraste entre os

dois territórios. Segundo o IBGE (2022), o bairro de Afogados conta com 31.457 moradores, enquanto Cohab possui 62.632 habitantes, revelando maior densidade populacional no segundo. A renda domiciliar per capita também expressa desigualdades: em Afogados alcança R$ 454,26, ao passo que na Cohab é de apenas R$ 331,50. Essas diferenças é uma repercussão direta da acessibilidade ao mercado de trabalho, já que, conforme o IPEA (2019), o total de empregos formais totais disponíveis em Afogados chega a 10.137, número significativamente superior ao da Cohab, que registra apenas 2.407 vínculos. A comparação entre esses dois territórios permite evidenciar como as políticas públicas de mobilidade urbana ou sua ausência afetam de maneira desigual a vida da população.

Ademais, conforme os dados obtidos do consórcio Grande Recife, o bairro de Afogados é atendido por 21 linhas de ônibus, que cruzam ou estão dispostas para o bairro e possui uma estação de metrô integrada**,** estrategicamente localizada, que favorece o deslocamento intermodal (ônibus + metrô), ampliando significativamente sua área de alcance em menor tempo. Essas linhas interligam o bairro a zonas centrais, áreas comerciais e polos de serviços, o que se traduz em maior frequência e conectividade. Já o bairro da Cohab é atendido por 10 linhas de ônibus, sem conexão direta com o sistema metroviário.

Os dados disponibilizados são agregados em uma grade espacial de hexágonos sob toda cidade do Recife, na qual cada célula tem uma área de 0,11 km² da cidade, conforme visualizado na figura 1. Ainda segundo Pereira et al. (2022) tais hexágonos tem propriedades topológicas que trazem vantagens para o estudo de fenômenos espaciais, facilitando, portanto, a interpretação e compreensão de resultados em visualizações espaciais, propondo uma melhor divisão espacial dos dados correspondente para cada município. Segundo Pereira et al. (2022) a medida cumulativa ativa é entendida como o número de oportunidades que podem ser alcançadas a partir de uma determinada origem dentro de um limite de tempo de viagem, como apresentado nas equações (1) e (2). Em que: CAio é acessibilidade cumulativa ativa a partir da origem i a oportunidades do tipo o; n é o total de destinos na área de estudo; Oj é o número de oportunidades do tipo o no destino j.

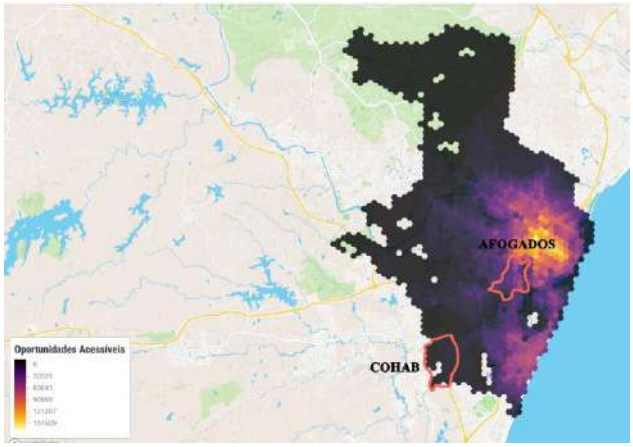


Figura 1: Mapa de hexágono de acessibilidade cumulativa ativa às oportunidades de trabalho na cidade do Recife (2019), com destaque para os bairros da Cohab e Afogados
Fonte: Adaptado de ipea

$$CA_{io} = \Sigma_{j=1}^{n} 0_j x\, f(t_{ij}) \quad (1)$$

$$f(t_{tij}) = 1, se\ t_{ij} \leq T; 0, set_{ij} > T, \quad (2)$$

A análise comparativa dos dados de acessibilidade cumulativa ativa, referente à quantidade de vínculos empregatícios formais no ano de 2019 evidencia desigualdades territoriais significativas no acesso ao transporte público e, por consequência, no alcance ao mercado de trabalho formal entre os bairros da Cohab e Afogados. Para tanto, foram analisados 38 hexágonos para o bairro de Cohab e 22 hexágono para o bairro de Afogados, na qual a média segue expressa na tabela 1,em que a baixa escolaridade se considera até o ensino fundamental completo e alta escolaridade representa o ensino superior completo.

Tabela 1: Média da acessibilidade ao trabalho em diferentes janelas de tempo

	Cohab			Afogados		
Tipo	**30 min**	**60 min**	**90 min**	**30 min**	**60 min**	**90 min**
Trabalho Total	2766	20145	153817	29359	274348	401785
Trabalho Alta Escolaridade	481	3673	23988	5239	78727	79910
Trabalho Baixa Escolaridade	478	3568	25242	4912	41694	65522

Os resultados demonstram que, mesmo em curtos períodos de viagem (30 minutos), os moradores de Afogados têm acesso a 10,6 vezes mais oportunidades de emprego que os moradores da Cohab, tal discrepância revela uma barreira estrutural de mobilidade, corroborando para uma desigualdade entre bairros da mesma cidade. Em 60 minutos, por exemplo, os moradores da Cohab acessam, em média, 20.145 empregos, enquanto os de Afogados alcançam 274.348, o que representa 13,62 vezes mais oportunidades, uma desigualdade que se mantém mesmo ao ampliar o tempo de viagem para 90 minutos. O padrão se repete para empregos de baixa e alta escolaridade, mostrando que a restrição não se limita ao perfil do trabalhador, mas ao território em que ele vive. Trata-se, portanto, de uma violação territorial do direito ao trabalho, que se torna inacessível não por mérito individual, pois a desigualdade não se dá pela qualificação, mas por falhas no sistema urbano de mobilidade, que não foi estruturado para uma equidade territorial.

A análise da infraestrutura de transporte disponível confirma os resultados obtidos pelo índice de acessibilidade. Afogado**s** apresenta uma malha intermodal robusta, permitindo deslocamentos mais ágeis e com maior cobertura territorial, o que explica o considerável número de empregos acessíveis em diferentes faixas de tempo, revelando um padrão de planejamento urbano centralizado, no qual os investimentos em transporte priorizado, gera um território valorizado e economicamente dinâmico. Em contrapartida, Cohab tem acesso limitado ao transporte e consequentemente aos polos econômicos centrais**,** o que compromete a geração de renda, reduz o poder de compra e reforça o círculo da vulnerabilidade social. Essa diferença na infraestrutura disponível revela como a oferta de transporte coletivo está diretamente ligada à produção de desigualdades no acesso à cidade e no desenvolvimento social dos territórios.

Isto posto, os dados expressos não devem ser compreendidos apenas como uma questão técnica de mobilidade, mas deve ser reconhecida como expressão da ineficiência das políticas públicas urbanas. Trata-se de um reflexo direto de décadas de planejamento urbano excludente **de** investimentos desiguais em infraestrutura de transporte, que contribuíram para comprometer o direito à cidade da população da Cohab e limitar sua integração ao sistema produtivo.

A concentração de linhas de ônibus em Afogados, por sua vez, não resulta de ações recentes, mas de uma política pública de estruturação da malha de transporte iniciada nas décadas anteriores, quando a proposta de um sistema integrado de transporte público passou a orientar a estruturação da malha urbana da região metropolitana do Recife. De acordo com Silva (2023), a concepção do Sistema Estrutural Integrado (SEI), idealizada em 1985 e implantada a partir de 1994, visava integrar fisicamente e tarifariamente os modais de transporte, e previa a instalação de terminais integrados em pontos estratégicos, entre os quais se incluía o terminal integrado de Afogados, em funcionamento desde 1994. A localização do bairro, próximo ao centro urbano e importantes avenidas arteriais como a Estrada dos Remédio, consolidou o bairro como um núcleo de adensamento de rotas, conforme preconizado pelo Manual de Operação do STPP/RMR (2013), no qual se destaca que o SEI visa garantir várias alternativas de deslocamento mediante integrações e com o pagamento de uma única passagem para tal.

Em contrapartida, a Cohab, concebida como conjunto habitacional periférico, foi integrada ao tecido urbano por meio de um modelo de expansão desordenada, caracterizado pela ausência de planejamento viário e falta de conexão com os sistemas estruturadores de transporte. A escassez de políticas públicas eficazes voltadas à sua conectividade perpetuou a limitação de linhas de ônibus no bairro, evidenciando o padrão de urbanismo desigual.

Diante do exposto, é fundamental que o planejamento de transportes esteja articulado com políticas habitacionais e de desenvolvimento urbano, com o objetivo de ampliar a acessibilidade. Isso inclui a implementação de corredores exclusivos e de linhas que conectem diretamente as periferias aos polos econômicos, de maneira eficiente, evitando a segregação forçada de populações vulneráveis em áreas com baixa acessibilidade.

Portanto, com base na metodologia de Rafael Pereira et al. (2022), entende-se que a acessibilidade cumulativa ativa se configura como um indicador robusto para mensurar a capacidade de um território em proporcionar meios concretos de inclusão social e econômica. Esse índice não apenas quantifica o acesso a oportunidades, como também expressa, de forma espacializada, as condições reais de mobilidade urbana enfrentada pela população. A diferença observada entre Cohab e Afogados reforça o entendimento de que a acessibilidade está intrinsecamente vinculada às decisões políticas e à alocação desigual de investimentos públicos, evidenciando o papel estruturante das políticas de mobilidade urbana na reprodução das desigualdades socioespaciais**.**

Por fim, o seguinte estudo demonstrou que a mobilidade urbana no Recife reflete desigualdades estruturais, com a Cohab apresentando acessibilidade inferior à de Afogados. Enquanto este bairro central dispõe de maior cobertura e integração modal, a Cohab permanece limitada por infraestrutura precária e poucas conexões, o que restringe o acesso da população a empregos e oportunidades. Os resultados confirmam que a acessibilidade está diretamente vinculada às escolhas políticas, reforçando a necessidade de políticas públicas que priorizem as periferias e tratem a mobilidade como um direito social essencial.

Agradecimentos
Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro à pesquisa, e ao Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), pela disponibilização dos dados de acessibilidade urbana, fundamentais para o desenvolvimento desta análise comparativa.

REFERÊNCIAS

Carlos, A. F. A. Segregação socioespacial e o “direito à cidade”. Geousp – Espaço e Tempo (On-line), v. 24, n. 3, p. 412-424, dez. 2020.

CTM/Grande Recife (2013) *Nota Técnica – Anexo 16: Planilha de Recomposição Tarifária do STPP/RMR*. Recife: Consórcio de Transporte Metropolitano.

Gehl, Jan. *Cities for People*. Washington: Island Press, 2010.

Gonzaga, Ana Stéfany da Silva; Portugal, Licínio da Silva; KNEIB, Érika Cristine. Planejamento do sistema de mobilidade urbana e inclusão social em cidades brasileiras: abordagem voltada à compreensão de suas relações impactos. *Revista de Direito da Cidade*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 390–414, 2024. DOI: 10.12957/rdc.2024.72650.

Grande Recife (s.d.) *Histórico da EMTU*. Disponível em: https://www.granderecife.pe.gov.br/institucional/historico/historico-da-emtu (acesso em 20/06/2025).

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. *Projeto Acesso a Oportunidades: mapa de acessibilidade urbana nas cidades brasileiras*. Brasília: Ipea, [s.d.]. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/acessooportunidades/mapa/.

Lizárraga, C.; C. Jaramillo e A. L. Grindlay (2014) *Urban development and transport disadvantage: Methodology to evaluate social transport needs in Latin American cities*. University of Granada; University of Valle.

Observatório das Metrópoles; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE); Federaçao de Órgãos para Assistência Social e Educacional – FASE. *Como anda a Região Metropolitana do Recife*. Recife: Observatório Pernambuco de Políticas Públicas e Práticas Sócio-Ambientais – UFPE/FASE, 2006.

Pereira, Rafael Henrique Moraes et al. *Estimativas de acessibilidade a empregos e serviços públicos via transporte ativo, público e privado nas vinte maiores cidades do Brasil no período 2017-2019*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2022. (Texto para Discussão, n. 2800).

Silva, M. N. (2023) *A subcidadania no transporte público coletivo: trajetórias de uma mobilidade periférica na Região Metropolitana do Recife*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco. Recife.

Tomasiello, Diego Bogado. *Modelagem dinâmica espacial das desigualdades de acessibilidade aos empregos*. 2020. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

PERSONAS COMO REPRESENTANTES DE USUÁRIOS POTENCIAIS DE UMA NOVA LINHA DE METRÔ: O CASO DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO (LINHA 3)

Jefferson Ramon Lima Magalhães, Gabriel Ferreira Fernandes, Matheus Henrique de Souza Oliveira
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Sistemas metroviários desempenham um papel fundamental na promoção da mobilidade urbana sustentável com qualidade de vida e inclusão social, especialmente em contextos fortemente orientados ao automóvel como as cidades brasileiras. Este artigo explora o potencial de uso de *personas* para identificar e compreender os perfis de usuários potenciais de uma nova linha de metrô, com foco na Linha 3 do Metrô do Rio de Janeiro. Sete *personas* representativas foram identificadas entre trabalhadores pendulares, estudantes universitários, pessoas idosas, usuários de transporte alternativo (*e.g.*, vans) e outros grupos sociais. As *personas* construídas refletem a diversidade dos usuários potenciais da nova linha de metrô em termos socioeconômicos, de preferências de escolha modal e padrões das viagens atuais. Espera-se que as jornadas atuais de transporte das *personas* despertem a empatia de tomadores de decisão no planejamento de ações que promovam uma mobilidade mais inclusiva por meio da Linha 3 do metrô.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas metroviários são cruciais para a maior eficiência dos sistemas de transporte urbano e o atendimento das necessidades de mobilidade da população (Lin *et al*., 2024). O metrô é uma alternativa de transporte rápida e confiável às pessoas que dependem do transporte público para o acesso às oportunidades, e o seu uso está associado a diversos benefícios ambientais, sociais e econômicos (Shen *et al*., 2016). Em contextos de rápida urbanização e elevada motorização, como os principais centros urbanos brasileiros, investimentos em sistemas metroviários são cruciais para a promoção da mobilidade sustentável com qualidade de vida e inclusão social.

Face a esse cenário, a melhoria da qualidade dos serviços de transporte público, como o metrô, tem sido um desafio relevante em muitas cidades nos últimos anos (Barcelos *et al*., 2017). A otimização do planejamento e da operação de sistemas metroviários depende, entre outros fatores, da compreensão do perfil dos usuários atuais em termos sociodemográficos, de hábitos de mobilidade e níveis de satisfação com o serviço ofertado. Nesse sentido, diversas ferramentas têm sido aplicadas para mensurar a satisfação dos usuários de serviços de transporte público e identificar aspectos críticos que podem constituir barreiras ao uso desses sistemas.

Alternativamente aos métodos tradicionais de avaliação da satisfação do usuário com o serviço de transporte público, abordagens centradas em pessoas (*e.g.*, *personas*), comumente utilizadas em áreas como Design (*e.g.*, desenvolvimento de produtos e aplicativos de serviços) e Marketing (*e.g.*, segmentação de mercados), têm atraído maior atenção de pesquisadores no campo dos transportes. *Personas* incorporam necessidades e características dos usuários atuais de um serviço de modo memorável e fácil de se relatar, e permitem identificar pontos de dor e desafios orientados à proposição de soluções mais inclusivas que atendam às expectativas dos usuários (Miaskiewicz e Kozar, 2011). Estudos recentes de *personas*, realizados na Noruega (Rasca et al., 2023) e na Grécia (Mavrogenidou e Polydoropoulou, 2025), combinam dados quantitativos, complementados ou não por dados qualitativos, e técnicas de clusterização de dados para identificar tipologias de usuários de sistemas de transportes e/ou de perfis de usuários baseados nos padrões de viagens atuais.

Este estudo explora o potencial do estudo de *personas* para representar usuários potenciais de uma nova linha de metrô. O caso da Linha 3 do Metrô do Rio de Janeiro, que interligará a capital fluminense aos municípios de Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, é utilizado para a aplicação da metodologia proposta.

2. MÉTODO

2.1. Área de estudo: Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, RJ

A área de estudo compreende três municípios do Leste Fluminense inseridos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e futuramente atendidos pela Linha 3: Niterói, São Gonçalo e Itaboraí. A Tabela 1 apresenta aspectos territoriais e sociodemográficos desses municípios, evidenciando disparidades socioeconômicas entre Niterói e os demais. Além disso, movimentações pendulares caracterizam a dinâmica das viagens entre os municípios de São Gonçalo e Itaboraí e os municípios de Niterói e Rio de Janeiro (Central, 2015).

Tabela 1: Aspectos territoriais e sociodemográficos dos municípios da área de estudo

Aspecto territorial ou sociodemográfico	Niterói, RJ	São Gonçalo, RJ	Itaboraí, RJ
População estimada (hab.) [2022]	481.749	896.744	224.267
Área (km²)	133,76	248,16	429,96
Densidade demográfica (hab./km²) [2022]	3.601,74	3.613,57	521,86
Idade [2022]	23,8% 60+ anos 56,3% 20-59 anos	19,1% 60+ anos 58,3% 20-59 anos	16,6% 60+ anos 57,8% 20-59 anos
Sexo [2022]	54,2% feminino 45,8% masculino	53% feminino 47% masculino	52% feminino 48% masculino
Renda média domiciliar *per capita* [2010]	R$ 1.817,85	R$ 668,00	R$ 584,35
Escolaridade [2022]	32,1% ensino superior	6,9% ensino superior	6,5% ensino superior
Cor ou raça [2022]	57,2% branca, 30,0% parda, 12,5% preta, 0,1% indígena, 0,2% amarela	36,9% branca, 45,9% parda, 17,0% preta, 0,1% indígena, 0,1% amarela	31,0% branca, 52,1% parda, 16,8% preta, 0,1% indígena, 0,1% amarela

Fonte: IBGE (2010), IBGE (2022)

2.2. *Personas*

O conceito de *personas* foi introduzido por Alan Cooper, em 1999, no livro *The Inmates are Running the Asylum*. *Personas* são modelos descritivos de usuários-arquétipo criados a partir de dados reais coletados em pesquisas qualitativas ou quantitativas (Cooper, 1999). Diferentemente de estereótipos, as *personas* são construídas com base em "factoides" ou dados representativos, como estilo de vida, objetivos, desafios e comportamentos de pessoas reais. O uso de *personas data-driven* é recomendado para evitar os riscos de suposições arbitrárias ou clichês de mercado (Marshall *et al*., 2013). Neste estudo, as *personas* representam diferentes grupos sociais impactados por uma nova linha de metrô.

2.3. Procedimento de análise

O procedimento proposto para análise e construção de *personas* representativas de usuários potenciais de uma nova linha de metrô, aplicado à Linha 3 do Metrô do Rio de Janeiro, consiste em três etapas: (i) caracterização da população potencialmente impactada pelo novo sistema metroviário, (ii) identificação de grupos de usuários potenciais da nova linha de metrô, e (iii) criação de *personas* associadas a esses grupos de usuários potenciais.

2.3.1. Caracterização da população potencialmente impactada pela nova linha de metrô

Na etapa inicial, a caracterização da população potencialmente impactada pela Linha 3 é feita em duas etapas: (i) análise de aspectos sociodemográficos dos municípios da área de estudo e (ii) análise dos padrões atuais de viagens feitas através do sistema metroviário do Rio de Janeiro (Linhas 1, 2 e 4) e pelos demais modos de transporte disponíveis na área de estudo. Os dados sociodemográficos de Niterói, São Gonçalo e Itaboraí foram obtidos através dos Censos 2010 (IBGE, 2010) e 2022 (IBGE, 2022). Os dados do perfil dos usuários atuais do metrô do Rio de Janeiro são de uma pesquisa interna realizada pelo MetrôRio em 2022 (Boueri, 2023, Oliveira e Salcides, 2022), com informações socioeconômicas (idade, gênero, renda e escolaridade) e de hábitos de viagens (origem, motivo e frequência). Informações sobre os padrões de viagens atuais na área de estudo foram obtidas em planos municipais de mobilidade urbana (Niterói, 2019, São Gonçalo, 2023), planos diretores metropolitanos, como o PDTU 2015 (Central, 2015) e o Plano Rio Metrópole 2034 (SETRERJ, 2023), um estudo de avaliação da satisfação com a Linha 4 do metrô (ITDP, 2018) e estudos de perfis de ciclistas que integram bicicleta e transporte público (Souza *et al*., 2017, Transporte Ativo, 2022).

2.3.2. Identificação de grupos de usuários potenciais da nova linha de metrô

Na etapa seguinte, uma tipologia de usuários potenciais da Linha 3 é estabelecida. Os dados utilizados na etapa anterior subsidiaram uma análise preliminar de cenários de mudanças no comportamento atual de viagens na área de estudo com a implantação da nova linha de metrô, permitindo identificar segmentos da população mais propensos a adotar o metrô e modos de transporte impactados com a transferência de viagens para o metrô.

2.3.3. Definição de personas representativas dos usuários potenciais

Na etapa final, uma tipologia de *personas* baseada nos grupos de usuários potenciais da Linha 3 é apresentada. Tipicamente, o número de *personas* varia entre um e sete (Saffer, 2007). Para dar maior realismo às *personas*, nomes reais, informações socioeconômicas (idade, sexo, ocupação profissional e local de moradia) e aspectos contextuais das jornadas de transporte serão atribuídos para que possam ser vistas e tratadas como representativas da população potencialmente usuária da Linha 3 do metrô.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização da população potencialmente impactada pela Linha 3

Em termos socioeconômicos, existem disparidades no perfil populacional de Niterói em relação aos perfis populacionais de São Gonçalo e Itaboraí principalmente em termos de renda, escolaridade e cor ou raça (maior poder aquisitivo, maior escolaridade e predomínio da população branca *versus* menor poder aquisitivo, menor escolarização e predomínio da população preta ou parda). Em relação ao uso do sistema metroviário atual, o usuário do metrô do Rio de Janeiro tende a ser adulto com idade entre 20 e 59 anos (88%), pertencer ao gênero feminino (51%), ter ensino médio completo (40%) e ser de média ou baixa renda (classes sociais C, D e E) (90%), além de ser morador da capital fluminense (78%) e utilizar o metrô para o acesso ao local de trabalho (70%) entre cinco e sete dias na semana (40%). Além disso, o padrão de viagens do metrô do Rio de Janeiro é fortemente pendular, com deslocamentos da maioria dos usuários das zonas Norte e Oeste para o Centro e a Zona Sul (em particular, Botafogo) no pico da manhã e o retorno desses para suas residências no pico da tarde.

3.2. Usuários potenciais da Linha 3 do metrô

A Tabela 2 apresenta os sete grupos de usuários potenciais da Linha 3 identificados: (*i*) trabalhadores pendulares, (*ii*) estudantes universitários, (*iii*) usuários de ônibus intermunicipais, (*iv*) moradores nas áreas de influência das futuras estações da Linha 3, (*v*) usuários de modos de transporte alternativo, como vans; (*vi*) pessoas idosas; e (*vii*) ciclistas que utilizam a bicicleta como modo de acesso ao transporte aquaviário.

Tabela 2: Grupos de usuários potenciais e mudanças esperadas no comportamento atual de viagens

Grupo	Tipo de usuário potencial	Modos de transporte passíveis de substituição pelo metrô
1	Trabalhadores pendulares	Automóvel e ônibus intermunicipal
2	Estudantes universitários	Automóvel e ônibus intermunicipal
3	Usuários de ônibus intermunicipais	Ônibus intermunicipal e barcas
4	Moradores nas áreas de influência das estações da Linha 3	Automóvel e ônibus intermunicipal
5	Usuários de modos de transporte alternativo (ex: vans)	Ônibus intermunicipal e barcas
6	Pessoas idosas	Ônibus intermunicipal
7	Ciclistas que realizam viagens integradas ao transporte aquaviário	Barcas

Trabalhadores pendulares, estudantes universitários, usuários de ônibus intermunicipais e moradores nas áreas de influência das novas estações podem ser os principais grupos potenciais impactados positivamente com a implantação da Linha 3, considerando o padrão de viagens pendulares do atual sistema metroviário e as características dos principais modos de acesso ao metrô (caminhada e ônibus). Por sua vez, ciclistas e usuários de vans, com baixa participação na divisão modal de viagens dos municípios estudados, poderiam manter o uso desses modos para o acesso ao metrô para reduzir o tempo de viagem e o número de transferências entre modos de transporte. Em relação às pessoas idosas, a participação desse grupo no uso do metrô tende a aumentar face ao rápido envelhecimento populacional, particularmente em Niterói.

3.3. Definição de *personas*

A Tabela 3 descreve as sete *personas* representativas da população usuária do novo sistema metroviário em Niterói, São Gonçalo e Itaboraí. Cada *persona*, associada a um grupo potencial, é descrita a partir de informações sociodemográficas (idade, sexo, ocupação e local de moradia) e dos padrões atuais de viagens. Além disso, as dificuldades enfrentadas pelas *personas* nas suas viagens frequentes (*e.g.*, trajeto com três conexões, caminhar com dificuldade para o ponto de embarque, dificuldade para embarcar com sacolas) são relatáveis às dificuldades observadas por usuários reais dos sistemas de transporte, e tais pontos podem despertar a empatia dos tomadores de decisão para que o perfil de uso da Linha 3 do metrô seja mais inclusivo.

Tabela 3: Caracterização das *personas* por aspectos individuais, sociodemográficos, modos de transporte utilizados e aspectos contextuais das viagens atuais

Persona	Grupo potencial	Idade	Sexo	Ocupação	Local de moradia	Transporte atual
Maria da Conceição	1	52 anos	Feminino	Auxiliar de serviços gerais	Itaboraí (bairro Visconde)	**Maria** sai de casa às 4:30 e caminha até o ponto de ônibus intermunicipal. Ela enfrenta um **trajeto com três conexões (Itaboraí, São Gonçalo e Niterói),**

						muitas vezes em **veículos superlotados**, levando cerca de 2h20 até seu local de trabalho no Centro de Niterói.
Diego Santos	2	22 anos	Masculino	Estudante universitário	Itaboraí (bairro Manilha)	**Diego** sai de casa por volta de 5:15. Ele pega um ônibus intermunicipal até Niterói, depois outro até a Ilha do Fundão, onde estuda. **O trajeto leva entre 2h30 e 3h em dias normais**. À noite, ele volta pelo mesmo caminho, chegando em casa por volta das 20:30. **O deslocamento é exaustivo**, mas **ele aproveita o tempo no ônibus para revisar conteúdo ou descansar.**
Viviane Ramos	3	38 anos	Feminino	Professora da rede estadual de ensino	Niterói (bairro Fonseca)	**Viviane** usa **ônibus lotados** até escolas em São Gonçalo e Itaboraí. Ela gasta, em média, 1h30 por trajeto. **Ao retornar à noite, ela se sente insegura**, especialmente nos pontos de parada e nos deslocamentos a pé entre conexões.
Karine Souza	4	28 anos	Feminino	Cabeleireira autônoma	São Gonçalo (bairro Alcântara)	**Karine** utiliza **ônibus urbanos lotados** para chegar ao centro comercial de Niterói, onde compra produtos e faz cursos. O percurso dela leva cerca de 1h40, com **longas esperas em pontos** e **dificuldades para embarcar com sacolas.**
Dona Cida (Cecília)	5	68 anos	Feminino	Aposentada	São Gonçalo (bairro Porto Novo)	**Dona Cida** depende de vans informais para ir às consultas médicas e farmácias em Niterói. Ela **evita sair em horários de pico** e **caminha com dificuldade até os pontos de embarque**. Ela leva cerca de 1h30 para chegar à zona hospitalar de Niterói.
Seu José Nascimento	6	69 anos	Masculino	Porteiro	Niterói (bairro Itaipu)	**Seu José** sai de casa às 5h. Ele pega um ônibus municipal até o Centro de Niterói, depois um intermunicipal direto até Botafogo. O trajeto total leva de 2h a 2h30, variando com o trânsito. Ele usa o passe livre para idosos, mas **o deslocamento longo e com baldeações exige esforço diário**.
Lucas Oliveira	7	21 anos	Masculino	Estudante universitário	São Gonçalo (bairro Mutuá)	**Lucas** vai de bicicleta até um ponto de ônibus que o leve às barcas em Niterói. De lá, ele cruza para o Centro do Rio para o estágio. O trajeto total leva entre duas horas e duas horas e meia. **Em dias de chuva, ele opta por ir de ônibus** direto para o Centro do Rio, enfrentando engarrafamentos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um procedimento metodológico para a construção de *personas* representativas de usuários potenciais de uma nova linha de metrô, a partir do caso da Linha 3 do Metrô do Rio de Janeiro. As *personas* identificadas compreendem grupos sociais como trabalhadores pendulares, estudantes universitários, pessoas idosas e usuários de vans. Essas *personas* englobam um perfil socioeconômico diverso com diferentes hábitos e preferências de escolha modal, e as especificidades de suas viagens podem despertar a empatia de tomadores de decisão para a promoção da mobilidade inclusiva na Linha 3. Contudo, a indisponibilidade de dados desagregados sobre aspectos individuais e socioeconômicos e do comportamento atual de viagens de

moradores da RMRJ inviabilizou o emprego de técnicas mais robustas para a clusterização das *personas*.

O próximo passo deste estudo consiste na realização de oficinas (grupos focais) com moradores dos municípios de Niterói, São Gonçalo e Itaboraí relacionados às *personas*. Esses participantes terão a oportunidade de expressar percepções positivas e negativas acerca da proposta da Linha 3 e possíveis impactos em seus cotidianos. Isto possibilitará a coleta de informações para avaliar a aceitação do projeto pela população e subsidiar melhorias no desenho do projeto e na estratégia de comunicação. Assim, o estudo de *personas* constituirá um instrumento de promoção da participação cidadã no planejamento de transportes da RMRJ.

Agradecimentos
Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

REFERÊNCIAS

Barcelos, M. M., Lindau, L. A., Costa, M. B. B., Ten Caten, C. S., Silva, C. A. M., e Pereira, B. M. (2017) Benchmarking com foco na satisfação dos usuários do transporte coletivo por ônibus. *Transportes,* v. 25, n. 3, p. 115-125. doi:10.14295/transportes.v25i3.1335

Boueri, J. (2023) *A maioria dos passageiros do metrô no Rio são das classes C, D e E.* Band News. Disponível em: <https://www.band.com.br/bandnews-fm/rio-de-janeiro/noticias/a-maioria-dos-passageiros-do-metro-no-rio-sao-das-classes-c-d-e-e-16576555>. Acesso em: 01 jun. 2025.

CENTRAL (2015) *Plano Diretor de Transportes Urbanos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Governo do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Cooper, A. (1999). The Inmates are Running the Asylum. In Arend, U., Eberleh, E., e Pitschke, K. (eds) *Software-Ergonomie '99*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Alemanha. DOI: 10.1007/978-3-322-99786-9_1

IBGE (2010) *Censo Demográfico 2010*. IBGE. Rio de Janeiro, RJ

IBGE (2022) *Censo Demográfico 2022 – Resultados Parciais*. IBGE. Rio de Janeiro, RJ.

ITDP (2018) *Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro*. ITDP Brasil. Rio de Janeiro, RJ.

Lin, D., Zhou, Z., Weng, M., Broere, W., e Cui, J. (2024) Metro systems: Construction, operation and impacts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 143. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105373

Marshall, R., Cook, S., Mitchell, V., Summerskill, S., Haines, V., Maguire, M., Sims, R., Gyi, D., e Case, K. (2013) Design and evaluation: end users, user datasets and personas. *Applied Ergonomics*, v. 46, Part B, p. 311-317. DOI:10.1016/j.apergo.2013.03.008

Mavrogenidou, P., e Polydoropoulou, A. (2025) Personas-based e-scooter usage patterns analysis at a Greek research campus. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, v. 4. DOI: 10.1016/j.jcmr.2025.100062

Miaskiewicz, T., e Kozar, K. A. (2011) Personas and user-centered design: How can personas benefit product design processes? *Design Studies*, v. 32, n. 5, p. 417–430. DOI:10.1016/j.destud.2011.03.003

Niterói (2019) *PMUS Niterói 19' – Plano de Mobilidade Sustentável de Niterói*. Prefeitura de Niterói, Niterói, RJ.

Oliveira, A. C. F., e Salcides, D. F. C. (2022) *Novos modelos de trabalho pós pandemia e seus efeitos na demanda do metrô do Rio de Janeiro*. In 27ª Semana de Tecnologia Metroferroviária da AEAMESP (São Paulo, SP).

Rasca, S. I., Markvica, K., e Biesinger, B. (2023) Persona design methodology for work-commute travel behaviour using latent class cluster analysis. *Multimodal Transportation*, v. 2, n. 4. DOI:10.1016/j.multra.2023.100095

Saffer (2007) *Designing for interaction: Creating smart applications and clever devices*. New Riders Publishing, Upper Saddle River, NJ, USA.

São Gonçalo (2023) *PlanMob São Gonçalo*. Prefeitura Municipal de São Gonçalo, São Gonçalo, RJ.

SETRERJ (2023) *Plano Rio Metrópole 2034*. Governo do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

Shen, Q., Chen, P., e Pan, H. (2016) Factors affecting car ownership and mode choice in rail transit-supported suburbs of a large Chinese city. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 94, p. 31–44. DOI: 10.1016/j.tra.2016.08.027

Souza, F. de, Puello, L. P., Brussel, M., Orrico, R., e van Maarseveen, M. (2017) Modelling the potential for cycling in access trips to bus, train and metro in Rio de Janeiro. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 56, n. 10, p. 55–67. DOI:10.1016/j.trd.2017.07.007

Transporte Ativo (2022) *Perfil do Ciclista Brasileiro 2021*. Rio de Janeiro, RJ

Jefferson Ramon Lima Magalhães (jefferson.magalhaes@pet.coppe.ufrj.br)
Gabriel Ferreira Fernandes (gabriel.ferreira@pet.coppe.ufrj.br)
Matheus Henrique de Souza Oliveira (matheus@pet.coppe.ufrj.br)
Programa de Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H, Sala 106 - Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

QUANDO A OFERTA É ESCASSA, QUEM MAIS IMPORTA? A PRIORIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSPORTE PÚBLICO EM CENÁRIOS DE GREVE

Anna Clara Dantas Cabral, Antônio Nélson Rodrigues da Silva
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO
Este estudo propõe incorporar as necessidades de grupos vulneráveis na priorização de linhas de transporte público (TP) quando a operação é parcial, por exemplo, em períodos de greve de motoristas. Utilizando dados da pesquisa Origem-Destino e dos itinerários do sistema de TP de São Carlos (SP), elaboraram-se onze cenários com diferentes *personas*, representando grupos vulneráveis identificados na literatura. Seus pesos foram definidos pelo método Delphi, com consulta a especialistas. Os resultados mostram mudanças expressivas na priorização das linhas ao adotar uma abordagem equitativa, considerando as *personas* como critério na estratégia de priorização, em vez de apenas a quantidade de viagens. Assim, os resultados reforçam a importância de considerar não apenas o volume de deslocamentos, mas também quem são os indivíduos que os realizam. Portanto, o estudo contribui para estratégias de gestão do transporte em contextos de crise, alinhadas à justiça social, à resiliência e à garantia do direito à cidade.

1. INTRODUÇÃO

O transporte público (TP) urbano constitui um serviço essencial para assegurar o direito à cidade, à mobilidade e ao acesso a oportunidades, especialmente em contextos de elevada desigualdade socioespacial, como nas cidades brasileiras. Sua operação contínua é indispensável para que a população, sobretudo os grupos mais vulneráveis, tenha acesso a atividades fundamentais como trabalho, educação, saúde e serviços básicos (Silver *et al.*, 2023). No entanto, o setor enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade econômica, à precarização das condições de trabalho e à pressão por eficiência em um contexto de financiamento insuficiente e dependente de tarifas (Silveira e Cocco, 2013). Nesse cenário, as paralisações por greve configuram uma manifestação legítima das demandas dos trabalhadores, amparada pelo artigo 9º da Lei nº 7.783/1989 (Brasil, 1989), que garante o direito de greve nos serviços públicos, desde que seja assegurada a continuidade parcial dos serviços essenciais.

Embora juridicamente amparadas, as greves no TP representam um risco iminente à manutenção da mobilidade urbana. A literatura indica que, nesse setor, as greves tendem a ocorrer com maior frequência do que em outros segmentos da economia (Van Exel e Rietveld, 2001). A redução da oferta durante esses eventos compromete a acessibilidade, agrava desigualdades socioespaciais preexistentes e afeta especialmente os usuários cativos, que possuem menor capacidade de acessar modos alternativos de transporte. Além disso, essas ocorrências prejudicam a percepção de confiabilidade do sistema, podendo induzir a migração de usuários para outros meios de transporte (Eltved *et al*., 2021; Nguyen-Phuoc *et al*., 2018).

A gestão de serviços essenciais em situações de greve impõe, portanto, um dilema que exige a conciliação de dois direitos fundamentais: o direito dos trabalhadores à greve e o direito da população à continuidade dos serviços públicos essenciais. No TP urbano, esse equilíbrio demanda que autoridades e operadores definam criteriosamente quais linhas devem operar e quais grupos populacionais devem ser priorizados, a fim de minimizar os impactos sociais e econômicos da paralisação. Contudo, esse processo decisório é complexo, envolvendo escolhas de natureza técnica, política e ética, que devem considerar tanto a eficiência operacional quanto a promoção da equidade e a garantia do direito à cidade. Nesse contexto, emergem duas questões centrais de pesquisa que orientam este trabalho:

i) Em situações de greve no transporte público, nas quais há redução das linhas em operação, quais grupos de indivíduos devem ser priorizados?
ii) A incorporação desses grupos como critério de priorização altera a ordem das linhas que devem ser mantidas operantes?

Responder a essas questões contribui para o desenvolvimento de estratégias de gestão do TP em situações de crise, de forma alinhada aos princípios de justiça social, resiliência e promoção do direito à cidade.

2. METODOLOGIA

Antes de qualquer intervenção no sistema de TP, o primeiro passo consiste em realizar uma análise diligente das características gerais do sistema na região em questão. Isso inclui a identificação dos modos em operação,

do número de linhas disponíveis para cada modo e a averiguação de linhas com trajetos circulares. Além disso, é necessário verificar as zonas de tráfego atendidas por cada linha, tanto no sentido de ida quanto no de volta. Com base nessas informações, é possível elaborar o itinerário das rotas e, em seguida, construir a Matriz de Trechos Atendidos (MTA) para cada linha, conforme a metodologia proposta por Azolin *et al.* (2020).

Com as MTAs definidas, é possível aplicar o método de Azolin *et al.* (2020), que combina essas matrizes com dados da pesquisa origem-destino (OD) para calcular a Demanda Potencial (DP) de cada linha. Esse cálculo permite ordenar as linhas de TP por prioridade, por exemplo, em um cenário de crise energética. Inicialmente, soma-se o número de viagens motorizadas para cada par origem-destino registrado na pesquisa OD. Em seguida, identifica-se quais trechos são cobertos por cada linha. A DP de uma linha corresponde à soma das viagens motorizadas nos trechos que ela atende. A linha com a maior DP é considerada a mais prioritária. As demais são avaliadas de forma sequencial, sempre desconsiderando os trechos que já foram atendidos por linhas anteriormente selecionadas.

Neste trabalho, considera-se também uma situação de crise, mas neste caso uma greve no TP. No entanto, acrescenta-se um novo aspecto à análise. O objetivo não se limita à quantidade de viagens realizadas, mas enfatiza as pessoas que as realizam, com o propósito de priorizar o atendimento às populações mais vulneráveis. Para isso, foram utilizadas *personas* que, embora representem grupos específicos, refletem perfis típicos de comportamento quanto ao uso do transporte. O uso de *personas* se configura como uma ferramenta eficaz na formulação de políticas públicas voltadas para desafios específicos (Cherry *et al*., 2022), permitindo captar as necessidades dos usuários finais desde as etapas iniciais de desenvolvimento das soluções.

As *personas* consideradas representam grupos vulneráveis reconhecidos na literatura, considerando variáveis como sexo, motivo da viagem e faixa etária. Após a sua definição, onze especialistas foram selecionados para colaborar na definição dos pesos para classificá-las de acordo com a importância relativa dessas *personas* a serem atendidas pelas linhas de TP, usando o método Delphi. Na primeira rodada, os especialistas responderam um questionário classificando as *personas* em ordem de importância, alta ou baixa, de cada uma em relação à próxima (Comparação Pareada Estruturada). Um julgamento de importância "baixa" resultou em um posicionamento sequencial na lista; por exemplo, se a *persona x* fosse considerada pouco mais importante (importância "baixa") do que a *persona y*, *x* ocuparia o 1º lugar e *y* o 2º lugar. Por outro lado, um julgamento de importância "alta" gerou uma lacuna de duas posições: neste caso, a *persona x* ocuparia o 1º lugar e a *persona y* o 3º lugar. Em uma segunda rodada de avaliação, os especialistas receberam um resumo anônimo das respostas do grupo e foram convidados a reavaliar suas respostas iniciais, com a opção de mantê-las ou modificá-las.

As posições atribuídas pelos especialistas foram padronizadas e convertidas para uma escala na qual a soma total dos pontos das *personas* correspondesse a 100. Em seguida, foi calculada a pontuação média de cada *persona* para a aplicação desses pesos. Após atingir um nível de concordância considerado aceitável entre os especialistas, de acordo com a escala de Kendall (Kendal e Babington-Smith, 1939; Schmidt, 1997), foram elaborados cenários com o objetivo de analisar os possíveis impactos na priorização das linhas de TP. A construção dos cenários ocorreu de forma incremental, possibilitando uma análise mais detalhada das alterações decorrentes dessa abordagem. Em termos práticos, o primeiro cenário contempla apenas a *persona* de maior prioridade, cujas viagens foram multiplicadas pelo peso correspondente. No segundo cenário, essa *persona* inicial é mantida e adiciona-se a segunda mais prioritária, também com suas viagens ponderadas pelo respectivo peso. Esse processo é repetido nos cenários seguintes, com a inclusão gradual das demais *personas*, respeitando a ordem de prioridade estabelecida (Tabela 1).

Tabela 1: Composição dos cenários utilizados neste estudo

Cenários	***Personas* incluídas**	**Cálculo das viagens motorizadas**
1	*Persona* de maior prioridade (P_1)	$(ViagensP_1 \times PesoP_1) + demais\ viagens$
2	P_1 + *Persona* de 2ª prioridade (P_2)	$(ViagensP_1 \times PesoP_1) + (ViagensP_2 \times PesoP_2) + demais\ viagens$
N	$P_1 + P_2 + P_n$	$\sum_{i=1}^{n} (ViagensP_i \times PesoP_i)$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta foi aplicada na cidade de São Carlos, em São Paulo, com o objetivo de analisar os efeitos dessa abordagem por meio da comparação com os resultados obtidos por Azolin *et al.* (2020). Para garantir a consistência entre as análises, foram utilizados os mesmos dados da pesquisa origem-destino, além dos mesmos critérios de exclusão de zonas e motivos de viagem.

3.1. Definição das *personas* e atribuição dos respectivos pesos

A literatura frequentemente aponta que as mulheres enfrentam maiores vulnerabilidades no transporte, associadas a riscos de assédio, insegurança, menor acesso ao transporte motorizado privado e maior dependência do TP (Pan e Ryan, 2023). Por essa razão, o critério *sexo* foi incorporado na definição das personas. A variável *idade* também foi considerada, uma vez que pessoas idosas tendem a apresentar limitações de mobilidade decorrentes da redução das capacidades físicas e cognitivas (Webber *et al.*, 2023). Assim, foram estabelecidas três faixas etárias: 18 a 45 anos (adultos), 46 a 59 anos (meia-idade) e acima de 60 anos (idosos). Além disso, incluiu-se o *motivo da viagem*, com foco em deslocamentos essenciais, sobretudo relacionados à saúde e ao trabalho. A Tabela 2 apresenta a ordem de prioridade entre as *personas*, juntamente com os respectivos pesos definidos pelos especialistas.

Tabela 2: Composição das *personas* e pesos utilizados neste estudo

Personas	**Descrição**	**Pesos 2ª Rodada**
I	Feminino, Saúde e 60+	15,00
II	Feminino, Trabalho e 45-59	13,44
III	Masculino, Saúde e 60+	13,26
IV	Feminino, Trabalho e 18-44	11,02
V	Masculino, Trabalho e 45-59	10,56
VI	Feminino, Saúde e 45-59	9,76
VII	Masculino, Trabalho e 18-44	7,91
VIII	Masculino, Saúde e 45-59	7,80
IX	Feminino, Saúde e 18-44	5,72
X	Masculino, Saúde e 18-44	4,22
XI	Demais indivíduos	1,30

Em seguida, aplicou-se o teste W de Kendall para verificar o grau de concordância entre os especialistas, possibilitando avaliar a consistência das classificações atribuídas. Com um coeficiente W = 0,526, identificou-se um nível moderado de concordância, motivo pelo qual se decidiu encerrar as rodadas.

3.2. Priorização da ordem das linhas de transporte público com base nos cenários

A Tabela 3 apresenta um resumo da priorização das dez primeiras linhas de ônibus nos cenários 1 a 5. Os demais cenários, de 6 a 11, não foram incluídos na tabela, uma vez que repetem o mesmo padrão de priorização observado no cenário 5. A Tabela 3 também inclui o "cenário base", correspondente à solução adotada por Azolin *et al.* (2020), na qual não é atribuído grau de importância aos indivíduos que realizam a viagem.

Tabela 3: Composição das *personas* e pesos utilizados neste estudo

Prioridade	**Cenário base**	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Cenário 4**	**Cenário 5**
1	3969	3969	3969	3969	3969	3969
2	1111	1111	1111	1111	1111	1111
3	5476	**4551A (4)**	**4551A (4)**	**4366 (7)**	**4551A (4)**	5476
4	4551A	**5476 (3)**	**5672 (6)**	**5476 (3)**	**5476 (3)**	4551A
5	0357	0357	**4366 (7)**	**1578 (21)**	**5672 (6)**	**5672 (6)**
6	5672	**4366 (7)**	**1753 (8)**	**5672 (6)**	**1978 (9)**	**0357 (5)**
7	4366	**5672 (6)**	**0357 (5)**	**4551B (11)**	4366	4366
8	1753	1753	**4551B (11)**	**0637 (20)**	**4551B (11)**	**1638 (18)**
9	1978	1978	**5476 (3)**	**5367 (12)**	**1638 (18)**	**4551B (11)**
10	4765	4765	**5367 (12)**	4765	**0357 (5)**	**1978 (9)**

NOTA: Os valores sublinhados e em laranja indicam as linhas que sofreram alteração em relação ao cenário base, enquanto os valores em negrito e em azul representam as linhas que não compunham o cenário base. Os valores entre parênteses representam a ordem de prioridade da linha no cenário base.

Os resultados da Tabela 3 demonstram que as *personas*, ou grupos prioritários, moldam diretamente a escolha das linhas que devem permanecer operantes, ao assegurar a manutenção de rotas que as atendam. Essa abordagem, ao contrário de uma priorização puramente quantitativa baseada no volume bruto de demanda, permite uma alocação mais equitativa dos recursos escassos durante a greve. A Figura 1 ilustra as diferenças entre o Cenário base, que considera apenas a quantidade das viagens motorizadas, e o Cenário 3, no qual foram observadas as alterações mais significativas devido à incorporação das *personas*.

Outro aspecto a se observar é a influência progressiva das *personas* ao longo dos cenários. As mudanças expressivas entre os cenários indicam que o conjunto de linhas priorizadas pode variar significativamente conforme os grupos escolhidos como prioritários. Isso demonstra que a definição das *personas* não apenas orienta decisões operacionais, mas também reflete valores sociais subjacentes à gestão da mobilidade urbana.

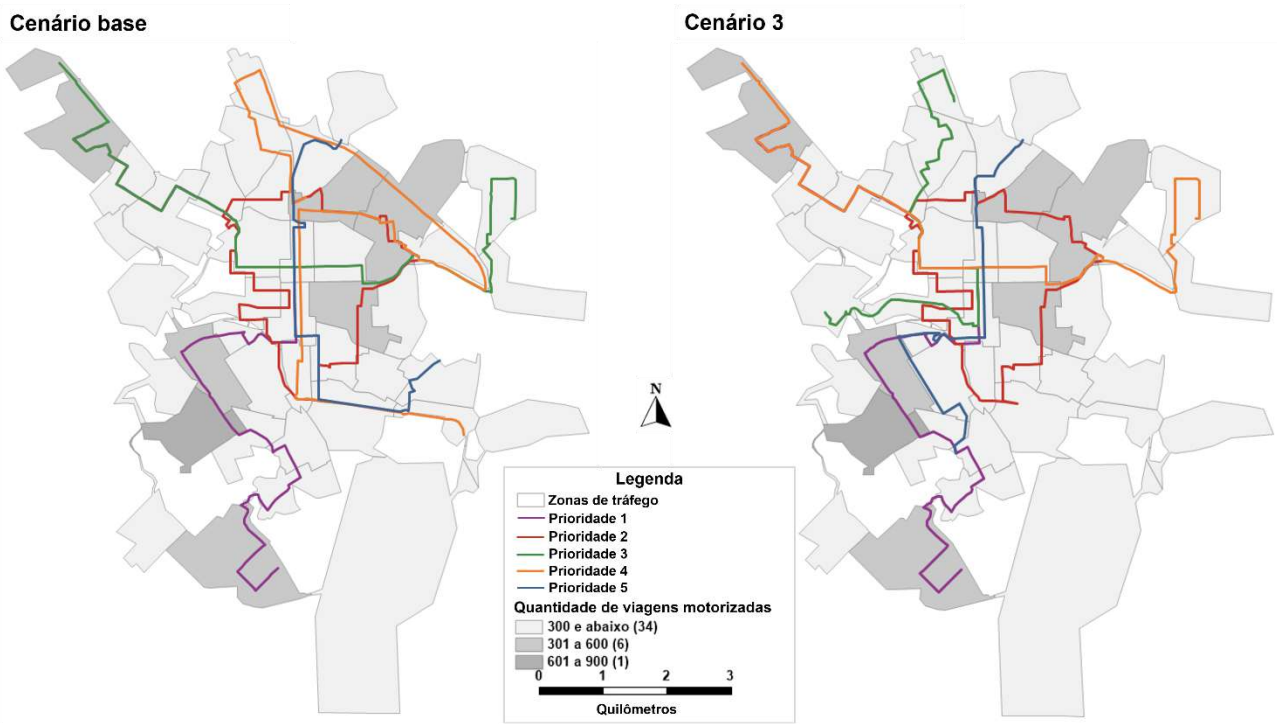


Figura 1: Comparação entre o cenário base (sem critérios de equidade) e o cenário 3 (onde foram observadas as mudanças mais significativas)
NOTA: Para uma visualização mais nítida desta imagem, acesse o repositório disponível no seguinte link: https://github.com/AnnaClaraDC/Priorizacao_TP_Equidade/tree/main

4. CONCLUSÕES

Greves no transporte público refletem tensões estruturais que permeiam a sociedade, expressando-se nas relações entre trabalhadores, empresas e o poder público. Embora constituam um instrumento legítimo de reivindicação por melhores condições de trabalho e remuneração, também podem gerar impactos significativos na mobilidade urbana, afetando especialmente as populações mais vulneráveis e dependentes do transporte coletivo. Por essa razão, este trabalho buscou incorporar as particularidades dos indivíduos desde as etapas iniciais do processo decisório de ordenação das linhas que deveriam permanecer operantes, com o objetivo de priorizar os grupos mais vulneráveis e avaliar o impacto dessa medida na priorização das linhas de ônibus na cidade de São Carlos - SP.

Para isso, foram utilizadas *personas* para representar grupos vulneráveis identificados na literatura, considerando variáveis como sexo, motivo de viagem e idade. Após a definição das *personas*, especialistas foram convidados para colaborar na atribuição de pesos, classificando-as de acordo com sua importância relativa no atendimento pelas linhas de transporte público, utilizando o método Delphi. Com os pesos estabelecidos, foram elaborados cenários, com o objetivo de avaliar, de forma gradual, o impacto na priorização das linhas de ônibus à medida que mais perfis específicos eram integrados à análise.

No primeiro cenário, que contempla apenas a *persona* considerada de maior relevância - mulheres com 60 anos ou mais, viajando por motivos de saúde - é possível notar algumas pequenas mudanças. Entretanto, as alterações mais expressivas ocorreram no cenário 3, que inclui homens com 60 anos ou mais, viajando por motivos de saúde: a linha 1578, anteriormente classificada em 21º lugar no cenário sem a aplicação do critério de vulnerabilidade, passou a ocupar a 5ª colocação; enquanto a linha 0637, antes classificada em 20º lugar, avançou para a 8ª posição, configurando as reclassificações mais significativas.

Os resultados, portanto, reafirmam a importância de adotar uma abordagem centrada nos indivíduos nos processos decisórios. As greves, por sua vez, evidenciam a urgência de aprimorar e debater as políticas urbanas, especialmente por emergirem, em geral, de forma abrupta e com grandes impactos. Nesse sentido, o estudo propõe uma alternativa para contextos de paralisação, visando um equilíbrio entre a garantia dos direitos trabalhistas e a atenção às necessidades da população, sobretudo grupos mais vulneráveis, contribuindo para a construção de um sistema de transporte público mais justo e eficiente.

Apesar da evidente contribuição deste estudo, é importante reconhecer algumas limitações. A definição das *personas* não contemplou pessoas com deficiência, minorias étnicas ou diversidades raciais, em virtude da ausência de dados específicos sobre essas características. Além disso, a variável renda, embora também relevante, não foi incluída na análise devido à baixa confiabilidade dos dados disponibilizados pelos respondentes, inclusive nas pesquisas oficiais, como o recenseamento geral.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azolin, L. G.; A. N. Rodrigues da Silva e N. Pinto (2020) Incorporating public transport in a methodology for assessing resilience in urban mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 85. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102386.

Brasil (1989) *Lei nº 7.783, de 28 de junho de 1989. Dispõe sobre o exercício do direito de greve*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 jun. 1989.

Cherry, C.; G. Thomas, C. Groves, E. Roberts, F. Shirani, K. Henwood e N. Pidgeon (2022) A personas-based approach to deliberating local decarbonisation scenarios: Findings and methodological insights. *Energy Research Social Science*, v. 87, p. 102455. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102455.

Eltved, M.; N. Breyer, J. B. Ingvardson e O. A. Nielsen (2021) Impacts of long-term service disruptions on passenger travel behaviour: a smart card analysis from the greater Copenhagen area. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 131, p. 103198. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103198.

Kendall, M. G. e B. Babington-Smith (1939) The problem of m rankings. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 10, p. 275–287. DOI: 10.1214/aoms/1177732186

Nguyen-Phuoc, D. Q.; G. Currie, C. de Gruyter e W. Young (2018) Exploring the impact of public transport strikes on travel behavior and traffic congestion. *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 12, n. 8, p. 613-623. DOI: 10.1080/15568318.2017.1419322.

Pan, M. M.; A. Ryan (2023) Equity in active and shared transportation: An investigation of barriers and individual and contextual factors. *Transportation Research Record*, v. 2677, p. 1309-1329. DOI: 10.1177/03611981221143106.

Schmidt, R. C. (1997) Managing Delphi survey using nonparametric statistical techniques. *Decision Sciences*, v. 28, n. 3, p. 763–774. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01330.x

Silveira, M. R.; R. G. Cocco (2013) Transporte público, mobilidade e planejamento urbano: contradições essenciais. *Estudos Avançados*, v. 27, n. 79, p. 41-53. DOI: 10.1590/S0103-40142013000300004.

Silver, K.; A. Lopes, D. Vale e N. M. C. da Costa (2023) The inequality effects of public transport fare: the case of Lisbon's fare reform. *Journal of Transport Geography*, v. 112, p. 103685. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103685.

Van Exel, N. J. A.; P. Rietveld (2001) Public transport strikes and traveller behaviour. *Transport Policy*, v. 8, n. 4, p. 237-246. DOI: 10.1016/S0967-070X(01)00022-1.

Webber, S.; Y. Liu, R. Barclay, D. Jiang, J. Ripat, S. Nowicki e R. Tate (2023) Comprehensive mobility framework verification using Canadian longitudinal study on aging data. *Innovation in Aging*, v. 7. DOI: 10.1093/geroni/igad104.3049.

Anna Clara Dantas Cabral (annaclaradc@usp.br)
Antônio Nélson Rodrigues da Silva (anelson@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes,
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - São Carlos, SP, Brasil

QUEM ANDA DE TRANSPORTE PÚBLICO? GÊNERO, RENDA E TERRITÓRIO EM TRÊS CIDADES LATINO-AMERICANAS

Bárbara Mendes, Monaliza Pinheiro, Mateus Humberto
Universidade de São Paulo

RESUMO
Este artigo investiga padrões de uso do transporte público em três metrópoles latino-americanas (Buenos Aires, São Paulo e Montevideo) a partir de um recorte temporal em comum (2016-2018), que busca representar as pesquisas Origem-Destino mais recentes. A análise compara dados de mobilidade com variáveis territoriais e sociodemográficas, com foco em centro e periferia, faixas de renda, arranjos familiares e diferenças entre homens e mulheres. O tratamento estatístico envolveu a normalização das variáveis para possibilitar a comparação entre os contextos. Os resultados mostram que, em todos os recortes analisados, as mulheres utilizam mais o transporte público que os homens. Além disso, em São Paulo e Montevideo, o uso concentra-se entre pessoas de renda média e baixa, enquanto Buenos Aires apresenta uma distribuição mais homogênea entre faixas de renda. As evidências reforçam a importância de integrar gênero, renda e território no planejamento de sistemas de transporte público mais equitativos e responsivos às necessidades da população.

1. INTRODUÇÃO

O transporte público urbano é fundamental para garantir o direito à cidade e a mobilidade cotidiana, especialmente para os grupos sociais mais vulneráveis. Em metrópoles latino-americanas marcadas por profundas desigualdades socioespaciais, o uso do transporte público reflete desafios estruturais que impactam de forma diferenciada homens e mulheres, pessoas com filhos, moradores de áreas periféricas e grupos de diferentes faixas de renda. Assim, este artigo analisa comparativamente os padrões de uso do transporte público em três grandes áreas metropolitanas da América Latina - Buenos Aires (2018), São Paulo (2017) e Montevideo (2016) - a partir dos microdados das Pesquisas Origem-Destino (O-D), com foco em recortes interseccionais de gênero, renda, arranjo familiar e localização centro-periferia. O objetivo é compreender como esses fatores influenciam a dependência, frequência e complexidade dos deslocamentos em transporte coletivo, revelando dimensões sociais e territoriais da mobilidade urbana.

Uma revisão sistemática da literatura realizada por Mendes & Orlandoni (2024) aponta que apenas 7,5% dos artigos recentes sobre mobilidade urbana com recorte de gênero concentram-se no contexto latino-americano, evidenciando uma lacuna acadêmica relevante no Sul Global. Estudos na Espanha, Canadá, França e Suécia (Bastian & Börjesson, 2018; Bulteau et al., 2023; Miralles-Guasch et al., 2016; Xu, 2020) identificam diferenças marcantes nos deslocamentos entre homens e mulheres: mulheres tendem a realizar trajetos mais curtos, encadeados e orientados por tarefas de cuidado, enquanto homens fazem viagens mais longas, associadas ao trabalho formal.

Além disso, pesquisas sugerem que mulheres têm maior propensão a utilizar modos coletivos e ativos de transporte (Broach & Dill, 2016; Singleton & Goddard, 2016), enquanto os homens mantêm maiores taxas de posse de automóveis e carteira de habilitação (Cubells et al., 2020). Dados recentes reunidos pela UITP (2024) reforçam essa tendência ao demonstrar que, em diversos contextos urbanos - incluindo cidades latino-americanas -, as mulheres dependem mais do transporte público do que os homens, não apenas em termos de frequência de uso, mas também como proporção dos deslocamentos totais realizados.

A presença de crianças no domicílio também se mostra uma variável-chave: mulheres responsáveis por tarefas de cuidado tendem a realizar deslocamentos mais fragmentados, como apontado por Craig & Van Tienoven (2019), impactando sua escolha modal e seus tempos de viagem. Além disso, a localização da moradia interage com esses fatores: moradores das periferias urbanas enfrentam maiores barreiras no acesso ao transporte público, o que pode aprofundar essas desigualdades (Miralles-Guasch et al., 2016; Xu, 2020).

2. MÉTODOS

Os microdados das Pesquisas Origem-Destino (O-D) utilizados para este estudo foram retirados dos canais oficiais dos respectivos governos locais de Buenos Aires (Ministerio de Transporte, 2018), São Paulo (Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô), 2017) e Montevideo (Intendencia de Montevideo,

2016). Para o processamento e a visualização dos dados, foi utilizado o software RStudio (versão 2023.03.1), com aplicação de funções de organização, tratamento, limpeza e cruzamento de variáveis.

2.1. Desenhos territoriais: centro e periferia

Em São Paulo, considerou-se como centro o conjunto de zonas delimitadas pelo "mini anel viário", correspondente ao centro expandido, conforme definição da própria pesquisa O-D. Em Buenos Aires, a centralidade foi definida pela "Primera Corona", que abrange a Ciudad Autónoma e os partidos limítrofes; a periferia corresponde aos demais partidos do conurbano bonaerense. Em Montevideo, utilizaram-se os setores censitários dos municípios B, C e CH para representar o centro urbano, em contraste com outras áreas mais afastadas. Embora simplificada, essa classificação permite identificar tendências gerais da distribuição territorial e sua relação com o acesso ao transporte público, reconhecendo a existência de centralidades periféricas ou periferias invisibilizadas em regiões centrais.

2.2. Arranjos familiares: presença ou ausência de crianças

Para compreender a influência dos arranjos familiares nos deslocamentos cotidianos, foi considerada como infância a população com menos de 12 anos, com base no Estatuto da Criança e do Adolescente (ECA, 1990), internacionalmente reconhecido. A partir disso, os domicílios foram classificados entre aqueles com ou sem crianças. Espera-se, assim, identificar padrões de uso do transporte público relacionados a viagens curtas, com vários destinos e alta frequência, vinculadas às tarefas reprodutivas cotidianas, frequentemente assumidas pelas mulheres.

2.3. Recortes de renda

A estratificação socioeconômica foi incorporada com base nos dados disponíveis em cada pesquisa. Em Buenos Aires, utilizou-se o indicador de decil de Nível Socioeconômico (NSE); em Montevideo, o Índice de Nível Socioeconômico (INSE), com escala de 0 a 100; e em São Paulo, os valores absolutos de renda familiar. Para permitir a comparação entre os três contextos, todos os indicadores foram transformados em quintis, garantindo uma abordagem relativa que considera as desigualdades locais, permitindo observar tendências e disparidades nos padrões de uso do transporte público.

2.4. Deslocamentos a pé

As diferenças metodológicas entre as pesquisas O-D impactam diretamente a comparação entre as cidades. Em São Paulo, os deslocamentos a pé são computados apenas quando se constituem como modo exclusivo e, para motivos que não sejam trabalho ou estudo, é exigida uma caminhada de no mínimo cinco quadras. Em Buenos Aires, também há um corte de três quadras mínimas, o que exclui uma proporção significativa de viagens curtas. Em Montevideo, por outro lado, todos os deslocamentos a pé são considerados, independentemente da distância. Essas diferenças afetam especialmente a captura de trajetos femininos - mais fragmentados e associados às tarefas de cuidado.

3. RESULTADOS

As comparações entre Buenos Aires, Montevideo e São Paulo mostram diferenças significativas na divisão modal dos deslocamentos cotidianos, revelando particularidades de cada contexto urbano. De modo geral, o transporte público apresenta maior participação em Buenos Aires (36,9%) e São Paulo (32,4%), enquanto em Montevideo esse percentual é sensivelmente menor (26,4%). Esses dados gerais revelam que o transporte público permanece como o principal modo de deslocamento em Buenos Aires, enquanto em Montevideo ele perde espaço para os modos motorizados individuais. São Paulo apresenta uma distribuição mais equilibrada entre os três principais modos (público, individual e a pé), o que pode refletir tanto a diversidade territorial da metrópole quanto as desigualdades em termos de acesso e dependência modal. Essa visão agregada, contudo, oculta disparidades relevantes quando observados os recortes interseccionais de gênero, renda, presença de crianças no domicílio e localização centro-periferia, apresentados a seguir.

Os dados analisados mostram que, nas três cidades, as mulheres utilizam mais o transporte público do que os homens, tanto no centro quanto na periferia. Os maiores diferenciais por gênero foram registrados em Montevideo, onde 28% das mulheres do centro usam transporte coletivo, frente a 18% dos homens. Na periferia, a diferença se mantém (31% contra 23%). Em Buenos Aires, os percentuais absolutos são mais

altos: 45% das mulheres do centro usam transporte público, frente a 39% dos homens; na periferia, 39% e 32%, respectivamente. Já em São Paulo, os dados mostram equilíbrio no centro (27% mulheres, 25% homens) e maior uso na periferia (39% mulheres, 31% homens). Esses resultados, como apresentados na Figura 1, revelam como gênero e localização urbana afetam o padrão de deslocamento e reforçam a dependência das mulheres em relação ao transporte público - especialmente em contextos periféricos.



Figura 1: Uso do transporte público por gênero e localização urbana em Buenos Aires, Montevideo e São Paulo

Já a análise por renda e gênero revela padrões distintos entre as três metrópoles estudadas, conforme detalhado na Figura 2, a seguir. Em Buenos Aires, observa-se uma elevada utilização do transporte público entre todos os grupos de renda, inclusive os de renda alta, com destaque para as mulheres (40%). Esse cenário contrasta com São Paulo e Montevideo, onde o transporte coletivo é majoritariamente utilizado por pessoas de renda média e baixa, evidenciando um viés socioeconômico mais marcado. Em Montevideo, por exemplo, mulheres de renda baixa apresentam o maior percentual (27%) de uso, enquanto homens de alta renda registram apenas 15%. Em São Paulo, as mulheres de renda média (41%) e baixa (40%) lideram no uso do transporte público, enquanto entre os homens, esses percentuais são de 32% e 36%, respectivamente. Os dados sugerem que, embora o transporte público cumpra um papel importante de conectividade nas três cidades, seu uso ainda é fortemente condicionado por desigualdades de renda e gênero.

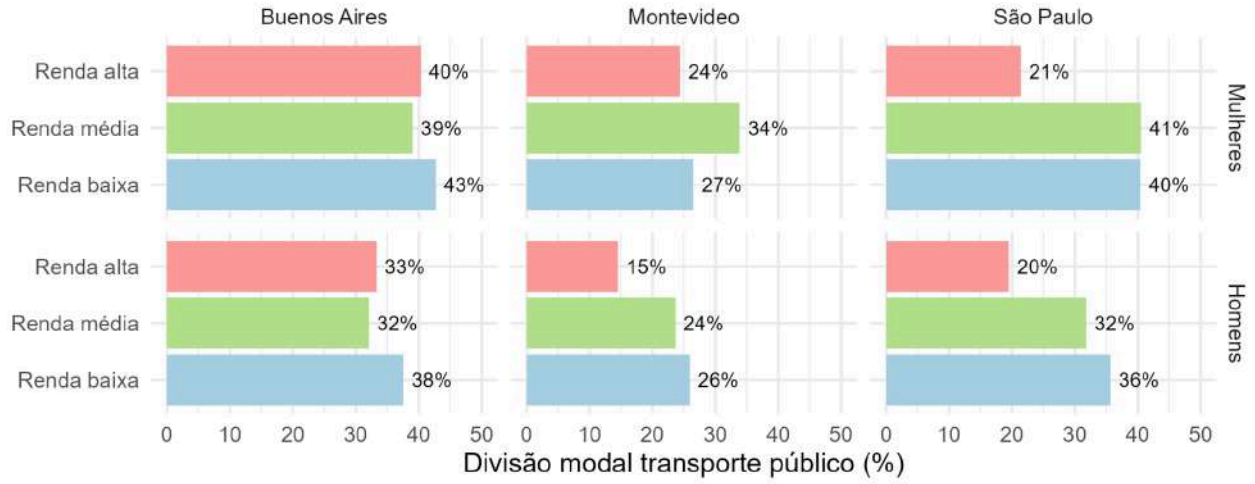


Figura 2: Uso do transporte público por gênero e faixa de renda em Buenos Aires, Montevideo e São Paulo

A Figura 3, abaixo, mostra que nos diferentes arranjos familiares propostos, a presença de crianças no domicílio tende a impactar de forma mais significativa o padrão de deslocamento das mulheres do que dos

homens. Nas três cidades estudadas, observa-se uma diminuição na proporção de viagens em transporte público entre mulheres com crianças em comparação àquelas sem, com destaque para Buenos Aires, onde a diferença muda de 46% (mulheres sem crianças) para 34% (mulheres com crianças). Em São Paulo, a queda é parecida, de dez pontos porcentuais - de 40% para 30%. Montevideo, apesar de menor diminuição, também mostra uma queda de 31% para 26%, de mulheres sem e com crianças, respectivamente. De modo geral, os homens mostram uma estabilidade maior no uso do transporte coletivo frente à variação no arranjo familiar, enquanto as mulheres demonstram maior sensibilidade a esse fator. Esses resultados reforçam a hipótese de que as responsabilidades de cuidado ainda recaem desproporcionalmente sobre as mulheres, influenciando seus padrões de mobilidade.

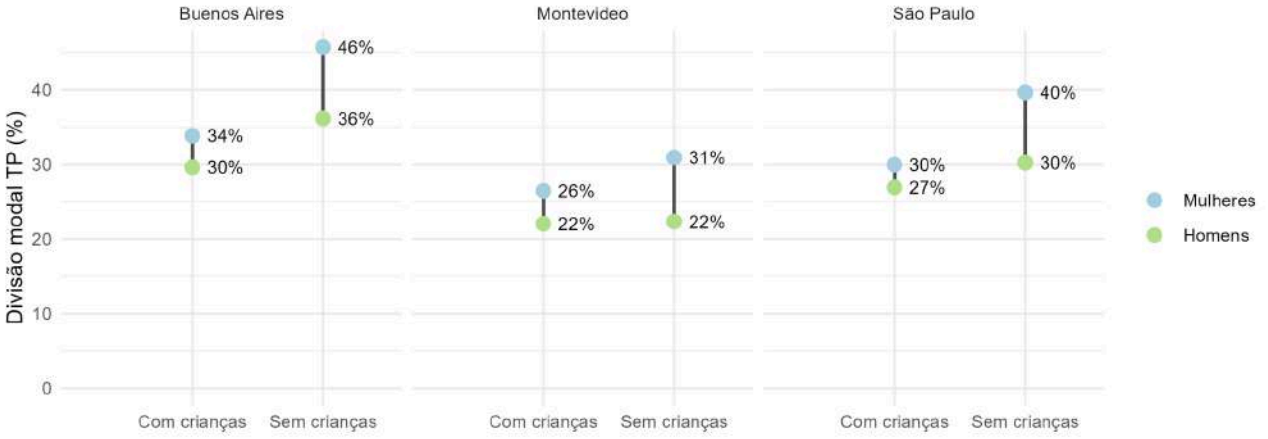


Figura 3: Uso do transporte público por gênero e presença/ausência de crianças em Buenos Aires, Montevideo e São Paulo

4. CONCLUSÕES

As análises apresentadas evidenciam padrões recorrentes de desigualdade no uso do transporte público nas três metrópoles latino-americanas estudadas. As mulheres, especialmente aquelas com menores rendas, revelam maior dependência do transporte coletivo, o que reforça a necessidade de políticas públicas sensíveis às desigualdades de gênero, classe e território. A sobreposição entre os papéis de cuidado e as limitações no acesso a modos de transporte mais eficientes impacta diretamente a mobilidade cotidiana desses grupos.

Convém reconhecer, contudo, algumas limitações do estudo. As análises foram conduzidas com base em estatísticas descritivas e enfrentaram desafios metodológicos relevantes, como a divergência estrutural entre os formatos das bases de dados - organizadas de forma unificada em São Paulo e segmentada em Buenos Aires e Montevideo - e a dificuldade de compatibilização de variáveis-chave, como renda e fatores de expansão. Ademais, a ausência de informações sobre raça, orientação sexual e identidade de gênero nas pesquisas Origem-Destino analisadas restringe o aprofundamento de uma abordagem interseccional mais abrangente sobre as desigualdades na mobilidade urbana.

Outro desafio metodológico refere-se à heterogeneidade nos critérios de registro das viagens a pé. Enquanto São Paulo e Buenos Aires impõem cortes mínimos de distância (cinco e três quadras, respectivamente), Montevidéu contabiliza todos os deslocamentos de pedestres. Considerar essas diferenças é fundamental, pois a adoção de critérios distintos pode alterar de forma significativa a participação relativa da caminhada, sobretudo entre mulheres, cujos trajetos curtos vinculados ao cuidado tendem a ser subestimados. Esse aspecto reforça a importância da cautela na comparação direta entre cidades.

Nesse sentido, os achados aqui apresentados abrem caminhos promissores para pesquisas futuras que busquem integrar outras dimensões sociais à análise da mobilidade. Investigações que combinem dados quantitativos e qualitativos, bem como abordagens interseccionais mais amplas, poderão contribuir para uma compreensão mais profunda dos mecanismos que produzem e reproduzem desigualdades no acesso à cidade. Avançar nesse campo é fundamental para qualificar o planejamento e orientar políticas públicas que

promovam sistemas de transporte mais justos, responsivos e adequados às necessidades da diversidade urbana.

Agradecimentos

Agradecimentos a Agustín Greif, Diego Moreno, Nancy González e Paula Barrera pelas conversas e percepções compartilhadas sobre a mobilidade urbana em Montevideo e Buenos Aires. Reconhecimento especial à equipe da Universidade Federal do Ceará (Felipe Loureiro, Giovanna Rebouças, Renata Oliveira, Carolina Girão, Germana Nunes e Ana Carolina Castro) e aos participantes do workshop realizado em janeiro de 2024 - Adriana Souza (Câmara Legislativa do Distrito Federal), Renata Oliveira (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), Jéssica Lima (Universidade Federal de Alagoas) e Haydée Svab (Open Knowledge Brasil) -, cujas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento e aprofundamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Bastian, A. e M. Börjesson (2018) The city as a driver of new mobility patterns, cycling and gender equality: Travel behaviour trends in Stockholm 1985–2015. Travel Behaviour and Society, v. 13, p. 71–87. DOI: 10.1016/j.tbs.2018.06.003

Broach, J. e J. Dill (2016) Using predicted bicyclist and pedestrian route choice to enhance mode choice models. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2564, n. 1, p. 52–59. DOI: 10.3141/2564-06

Bulteau, J.; E. R. Torres e M. Tillous (2023) The impact of COVID-19 lockdown measures on gendered mobility patterns in France. Travel Behaviour and Society, v. 33, 100615. DOI: 10.1016/j.tbs.2023.100615

Brasil (1990) Estatuto da Criança e do Adolescente – ECA. Lei n. 8.069, de 13 de julho de 1990. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8069.htm (acesso em 11/07/2025).

Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô (2017) Pesquisa Origem e Destino: Região Metropolitana de São Paulo. Disponível em: https://transparencia.metrosp.com.br/dataset/pesquisa-origem-e-destino (acesso em 11/07/2025).

Craig, L. e T. P. Van Tienoven (2019) Gender, mobility and parental shares of daily travel with and for children: A cross-national time use comparison. Journal of Transport Geography, v. 76, p. 93–102. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.03.006

Cubells, J.; O. Marquet e C. Miralles-Guasch (2020) Gender and age differences in metropolitan car use. Recent gender gap trends in private transport. Sustainability, v. 12, n. 18, 7286. DOI: 10.3390/su12187286

Intendencia de Montevideo (2016) Encuesta de movilidad del Área Metropolitana de Montevideo. Observatorio de Movilidad. Disponível em: https://montevideo.gub.uy/observatorio-de-movilidad (acesso em 11/07/2025).

International Association of Public Transport – UITP (2024) 10 statistics of women in transport that show why public transport matters. UITP News, 8 mar. 2024. Disponível em: https://www.uitp.org/news/10-statistics-of-women-in-transport-that-show-why-public-transport-matters/ (acesso em 11/07/2025).

Mendes, B. e G. D. Orlandoni (2024) Disparidade de gênero no transporte urbano: uma revisão sistemática de literatura e processamento de pesquisas origem-destino na América Latina. Trabalho de Formatura, Universidade de São Paulo, n. 43.

Ministerio de Transporte (2018) Encuesta de movilidad domiciliaria: Movilidad en el Área Metropolitana de Buenos Aires. Programas y Proyectos Sectoriales y Especiales del Ministerio de Transporte. Disponível em: https://www.argentina.gob.ar/transporte/dgppse/publicaciones/encuestas (acesso em 11/07/2025).

Miralles-Guasch, C.; M. M. Melo e O. Marquet (2016) A gender analysis of everyday mobility in urban and rural territories: From challenges to sustainability. Gender, Place & Culture, v. 23, n. 3, p. 398–417. DOI: 10.1080/0966369X.2015.1013448

Singleton, P. A. e T. Goddard (2016) Cycling by choice or necessity?: Exploring the gender gap in bicycling in Oregon. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2598, n. 1, p. 110–118. DOI: 10.3141/2598-13

Xu, J. (2020) Generational trends of gendered mobility: How do they interact with geographical contexts? Journal of Transport Geography, v. 82, 102623. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102623

Bárbara Mendes (b.mendesribeiro9@gmail.com)
Monaliza Pinheiro (monaliza.pinheiro@usp.br)
Mateus Humberto (mateushumberto@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Prof. Almeida Prado, trav.2 nº. 83. Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil) – São Paulo, Brasil.

RESULTADO DA PESQUISA COM AGENTES DE OPERAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO DE BRASÍLIA PARA TREINAMNETO DE ATENDIMENTO A PASSAGEIROS AUTISTAS

Artur Carlos de Morais[1,2]; Gislane Ferreira de Melo[1]
[1]Universidade Católica de Brasília
[2]Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal

RESUMO
A literatura internacional aponta a falta de treinamento dos operadores do sistema de transporte público como uma das barreiras que dificultam pessoas com Transtorno do Espectro Autista (TEA) utilizar o sistema para deslocamentos autônomos e seguros. Assim este artigo tem por objetivo investigar o conhecimento sobre autismo dos agentes de operação, motoristas e cobradores, do sistema de transportes públicos coletivo por ônibus do Distrito Federal como parte inicial para a elaboração de um programa de treinamento para a inclusão de passageiros autistas. Feita pesquisa com os operadores, 177 responderam questionário impresso que mediu se operadores tinham informações sobre TEA e presença de autistas utilizando o transporte coletivo, 37% tiveram alguma informação sobre autismo e 89% tiveram passageiro autista durante seu trabalho, 49% com passageiros regulares. Foi solicitado para relatar experiências com passageiros autistas, 54 relatos gravados, 37 continham experiências na operação.

1. INTRODUÇÃO

Para adultos com autismo, a mobilidade independente é uma das maiores barreiras que impedem a sua integração na sociedade, (Lublin e Feely, 2016; Zalewska *et al*, 2016) e a empregabilidade, acesso a cuidados médicos (Lublin e Feely, 2016), o uso do transporte público é um preditor de melhores resultados educacionais e emprego para jovens autistas (Wilson *et al*, 2021). Autistas que usavam meios de transporte independentes tem quase cinco vezes maior chance de estar empregado em comparação com seus pares que não possuem independência para os deslocamentos (Zalewska *et al*, 2016).

No entanto as informações sobre as necessidades e os desafios de transporte enfrentados pela população autista são limitadas, dificultando o desenvolvimento de políticas e estratégias de atendimento às suas necessidades com sucesso (Lublin e Feely, 2016). Estudos relatam que aprender a dirigir pode ser difícil, e que usar o transporte público pode ser cheio de ansiedade para adultos autistas (Wilson *et al*, 2021). Porém o transporte público pode permitir a independência e facilita o engajamento e a participação de pessoas que não dirigem e é de baixo custo (Falkmer *et al*, 2015).

Em pesquisa na literatura de artigos que tratam da inclusão de autistas no transporte coletivo, alguns trabalhos apontam o treinamento de operadores como importante barreira para a sua utilização. Utilizando os argumentos autismo, mobilidade urbana, viagem, deslocamento e transporte foi feito pesquisa nas bases de publicação de artigos científicos no idioma português nos portais Scielo, Periódicos Capes e Google Acadêmico, utilizando os argumentos autism, public transit, transportation, urban mobility, pesquisou nos portais Sciencedirect, Pubmed, Science.gov e Scholar Google no período de 2015 a 2024, encontrando 2159 publicações, 373 em português e 1786 na língua inglesa.

Fazendo seleção, mantendo apenas artigos científicos, retirando os títulos repetidos restaram 11 na língua portuguesa e 98 na língua inglesa. Com a leitura dos resumos foram selecionados 54 artigos em inglês e 01 em português. Finalmente com a leitura completa desses artigos, foram selecionados 22 que tratavam do tema autismo e transportes público coletivo, todos no idioma inglês. Desse total, 08 apontavam a falta de treinamento e conscientização dos operadores de sistemas de transportes por ônibus, trem e metrô sobre TEA, como importante barreira para a inclusão dos autistas para viagens autônomas e seguras no transporte público.

Na pesquisa de Lubin e Feeley (2016) os pais sugerem a implementação do treinamento de operadores de transporte para dar suporte a pessoas do espectro autista seria um passo importante para tornar o transporte público uma opção viável para pessoas com TEA. Lim *et al*, (2021) é apresentado pelos pais a falta de assistência por parte da empresa operadora do sistema, Angell e Solomon, (2018) sugerem falta de treinamento de operadores para gerenciar efetivamente comportamento agressivo.

Também há citação da falta de financiamento para treinamento de motoristas (Dudley e Zwicker, 2016), falta de simpatia e prestatividade do motorista do transporte público (Deka *et al,* 2016, Lindsay, 2019), intolerância e discriminação por motoristas (Bolic Baric *et al*, 2024, Lindsay, 2019) e Pfeiffer et al, 2024 resumem com a afirmação da falta significativa de treinamento e conscientização sobre TEA para motoristas de transporte público.

Portanto para que o sistema de transportes público seja inclusivo para todos os usuários, independentemente de suas habilidades, é imperioso o treinamento dos operadores para todos os temas, inclusive o autismo. Assim o primeiro passo é responder ao questionamento do nível de conhecimento dos operados sobre o tema autismo. Portanto este trabalho tem por objetivo pesquisar junto aos operadores do transporte público do Distrito Federal o seu conhecimento sobre autismo e identificar ocorrências para preparar futuro programa de treinamento. Para tanto, ele se divide em 4 seções. Após essa introdução, tem-se o método da pesquisa. Na terceira será apresentado os resultados da pesquisa exploratória e sua análise. Para finalizar, as considerações finais.

2. MÉTODO

Para atender aos objetivos da pesquisa foi elaborado questionários a serem respondidos em duas etapas pelos agentes da operação, motoristas e cobradores, do Sistema de Transportes Públicos Coletivo por ônibus de Brasília. A primeira foi questionário impresso com respostas “sim” ou “não”. Esse questionário foi dividido em duas classes de perguntas, a primeira para saber se os respondentes tinham alguma informação sobre pessoas com deficiência (PcD) e autismo. A inclusão de pessoas com problemas de locomoção, deficiência visual e perda auditiva já é discutida há tempo, as respostas sobre PcD possibilita identificar o nível de informação dos operadores e fazer comparativo com as respostas sobre autismo. A segunda classe de perguntas foi direcionada para medir a utilização do transporte público por passageiros autistas na visão dos operadores. A segunda etapa foi uma entrevista semiestruturada com duas perguntas iniciais, a primeira para saber o conhecimento sobre a identificação do passageiro autista e a segunda para os participantes relatarem sua experiência com passageiros autistas durante sua jornada de trabalho. Os casos relatados foram gravados e posteriormente transcritos. Com esses relatos têm a pretensão de identificar experiências reais que poderão ajudar na elaboração do treinamento desses operadores.

3. RESULTADOS

Para a aplicação dos questionários, foi solicitada autorização da Secretaria de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal. Com o ofício de autorização, foram marcadas sete reuniões em dependências das empresas operadoras com total de 177 respondentes do questionário impresso e 54 relatos, com 33 relatando experiências de passageiros autistas durante sua jornada de trabalho. Responderam aos questionários e participaram das entrevistas colaboradores de empresas que trabalham em linhas dos transportes coletivos que cobrem todo Distrito Federal

3.1. Respostas ao Questionário Impresso

As respostas da primeira classe de perguntas (tabela 1) demonstram que poucos agentes da operação têm informação sobre o Transtorno do Espectro Autista, 37%, mesmo que 71% disseram conhecer o cordão de identificação. Aproximadamente 60% disseram ter informações dos direitos e como atender Pessoa com Deficiência, pelo fato da A Lei 12.764 de 2012 (Brasil, 2012) atribui à pessoa com Transtorno do Espectro Autista todos os direitos da Pessoa com Deficiência, percebe-se que o treinamento recebido sobre PcD não inclui o tema autismo.

Tabela 1: Nível de informação dos agentes de operação sobre PcD e autismo

Pergunta	Sim	Não
Você teve alguma informação sobre os direitos de Pessoas com Deficiência?	59%	41%
Você teve alguma informação sobre como fazer o atendimento de Pessoas com Deficiência?	60%	40%
Você tem alguma informação sobre o Transtorno do Espectro Autista?	37%	63%
Você conhece o cordão de identificação de autista?	71%	29%

As respostas à segunda classe de perguntas (tabela 2) demonstram que há em Brasília autistas utilizando transporte público coletivo, 87% dos respondentes já tiveram passageiros autistas e 49% responderam ter passageiros autistas regularmente. Esses valores demonstram haver quantidade de operadores transportando passageiro autista e superior aos 37% que responderam ter alguma informação sobre autismo. Fato que revela a clara necessidade de treinamento para os operadores sobre autismo e o seu atendimento no transporte público. Outra informação importante é que há poucos autistas se deslocando de transporte público de forma autônoma, 13% sem acompanhante.

Tabela 2: Passageiros autistas identificados pelos agentes de operação

Pergunta	Sim	Não
Durante o teu trabalho já teve algum passageiro autista?	88%	12%
Você tem passageiro regular que é autista?	49%	51%
O passageiro autista estava acompanhado?	87%	13%

3.2. Resultados da Etapa de Entrevista

A primeira pergunta foi para saber se os entrevistados conheciam o cordão que identifica o autismo. Existem dois cordões que identificam a pessoa com TEA, o cordão com símbolo do quebra cabeça, identificação internacional, criado em 1963 por Gerald Gasson, membro do National Autistic Society em Londres, e outro, com o desenho de girassóis, instituído pela Lei 14.624 de 2023 (Brasil, 2023) como o símbolo nacional de identificação de pessoas com deficiências ocultas. O autismo não tem fenótipo, não há possibilidade de encontrar um padrão visual para identificá-lo, assim o cordão com a figura de girassol é utilizado pelos autistas também. Portanto o autista usa qualquer um dos dois cordões. Os respondentes citaram os dois cordões, porém o cordão com o girassol é o mais conhecido pelos operadores respondentes.

A segunda pergunta abriu a oportunidade para relatos de situações vividas durante o trabalho. Houve 54 relatos, 37 relatos de experiência com passageiros autistas, tabela 3, questionamentos e observações, 27, e 05 com relatos experiência, questionamentos e observações

Tabela 3: Relatos sobre experiências com passageiros autistas

Comportamento	Quantidade de Relatos	Exemplos de Relatos
Agitado / gritar	13	Passei por uma situação com uma criança, ela queria só ir em pé, a mãe ficou tentando fazer ela sentar e a criança começou a chorar, gritar e se jogar no chão. Falei para mãe que podia deixar que o motorista iria bem devagar. Eu só pedi para a criança se segurar bem no ferrinho com as duas mãos e foi tranquilo até o final
Ficar na parte da frente do veículo	7	Numa viagem entrou um passageiro, dava pra ver que ele era novo, bem altão e bem e bem fortão. Ficava ali na frente, os passageiros queriam entrar não tinha como entrar. O cobrador falou vem para cá, ele vinha e daqui a pouco voltava. Quando foi para descer na parada dele, perguntei se era carteirinha, se não fosse tinha que passar na roleta. Ele deu o dinheiro para o cobrador e desceu pela portada frente. Todo dia ele descia pela frente. Um certo dia uma vizinha dele, estava no ônibus, falou que ele era autista.
Reação a mudança de motorista ou veículo	4	Duas crianças que pegam ônibus que eu trabalho todos os dias, se eu ou o motorista não está trabalhando eles não querem entrar no veículo, eles falam a amiga não está, o amigo não está, até se mudar o ônibus, não for o micro ônibus eles também não querem entrar.
Reagir a barulho	4	Reparei que são sensíveis ao barulho. Quando alguém aciona a campainha, tampava o ouvido
Exigir o mesmo assento	3	Eu tenho uma passagem uma passageira que vem todo dia comigo, aí ela tem mania de sentar-se na cadeira na frente do cobrador, pode estar quem for, quem tiver lá aquela bota para correr para sentar-se junto com a mãe dela, com uma boneca a tiracolo.
Reagir a falta de assento	3	Teve um passageiro quando entrou no ônibus e não tem lugar para ele, ele se deita no chão do corredor, no meio do ônibus, não tem ninguém que tire ele de lá, ninguém passa se não derem lugar para ele.

Outros relatos não estão contemplados na tabela 3, uma citação de reação do passageiro autista a forma de condução do veículo ("parar numa parada rapidamente tudo isso causa impacto na criança autista e causa crise. A forma de você dirigi, que você conduz, com calma, tudo isso ajuda a criança e a mãe"), outra para o retrovisor do ônibus estar quebrado ("passageiro criança que viajava todo dia até a Asa Norte, sempre ficava na frente, teve um dia que o retrovisor estava quebrado ele ficou incomodado com isso, a mãe foi obrigada a levá-lo para o final do ônibus"), comportamento inconveniente ("fica abraçando demais as mulheres, né? e tem algumas que não gostam, relatam isso. a gente eu queria saber também como é que eu posso estar ali agindo a respeito dessa situação.").

Foram apresentados 27 questionamentos ou observações. Os questionamentos são referentes a receber informações sobre o transtorno do espectro autista e de como agir em determinadas situações. Exemplos: - "se alguma coisa alterar a rotina dele, ele tem dificuldade de adaptar à nova rotina?", - "então, esse que a mãe está treinando para ir só, ele vai só, se trocar o carro, o motorista o conhece e ele conhece o motorista. O motorista tem alguma coisa para fazer para ajudar?", - "tem comportamentos diferentes entre autistas?", - "tem vídeo mostrando comportamento?".

Observações feitas pelos operadores focaram na necessidade de passar o conhecimento sobre o TEA. Exemplo: - "fazer uma cartilha para motorista e cobrador passar informação", - "tem uma passageira autista, ela é identificada e eu não sei lidar com ela, tenho dúvida de como tratar ela", - "há necessidade de treinamento e cartilha", "Uma questão que veio para facilitar foi o cordão de identificação, antigamente não tinha. Antigamente entrava no ônibus com esse tipo de comportamento e o motorista não sabia, poderia até expulsar do ônibus. Ainda falta treinamento de como lidar".

Quanto aos relatos sobre incomodo pelo barulho, foram citados os ruídos do motor, buzina, alerta de ré, campainha e do funcionamento do elevador para cadeirante. Uma observação adicional foi a prevalência de mulheres como acompanhante de passageiro autista, nos 37 relatos de experiência com passageiro autista, 28 identificaram seu acompanhante, sendo 26 relatos (93%) citaram mulher, 24 a mãe, 01 avó, 01 como passageira e apenas 02, o pai.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados verificados nesta pesquisa confirmam a necessidade de treinamento dos operados do transporte público de Brasília para atendimento de passageiros autistas. As respostas de 88% dos entrevistados informam que já tiveram passageiros autistas, sendo que 49% os passageiros eram regulares, mas apenas 37% dos operadores tiveram informação referente ao Transtorno do Espectro Autista (TEA), o que resultou em muitos questionamentos, durante as entrevistas, sobre como proceder em ocorrências com passageiros autistas.

Os relatos de experiências com passageiros autistas são importantes para direcionar os temas a serem abordados na elaboração de programa de treinamento dos agentes de operação e para a produção de política para o atendimento do autista. A exemplo, minimizar os barulhos que foram relatados, quanto ao barulho do motor, utilizar veículos elétricos; usar apenas sinais luminosos para informara ao condutor e a quem solicitou para suprimir o barulho da campainha; barulho do elevador, rampas que substituem elevadores.

REFERENCIAS

Angell A.M., O. Solomon .(2018). Understanding parents' concerns about their children with autism taking public school transportation in Los Angeles County. Autism. May;22(4):401-413. doi: 10.1177/1362361316680182..,

Bolic Baric, V.; Å. L. Ranada e J. Berg, (2024). *The whole journey chain with public transport for people with autism spectrum disorder and attention deficit hyperactivity disorder*. A scoping review. *Transp. Rev.* 2024, 1–25

Brasil (2012) *Lei Nº 12.764 de 27 de dezembro de 2012 que institui a Política Nacional de Proteção dos Direitosa Pessoa com Transtorno do Espectro Autista*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12764.htm. Acessado em 12 de fev. de 2024

Brasil (2023) *Lei Nº 14.624 de 17 de julho DE 2023 que Altera a Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015 (Estatuto da Pessoa com Deficiência), para instituir o uso do cordão de fita com desenhos de girassóis para a identificação de pessoas*

com deficiências ocultas. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/l14624.htm. Acessado em em 12 de fev. de 2024

Deka, D., C. Feeley e A. Lubin (2016). Travel Patterns, Needs, and Barriers of Adults with Autism Spectrum Disorder: Report from a Survey. *Transportation Research Record*, *2542*(1), 9-16. https://doi.org/10.3141/2542-02

Dudley, C. e J. Zwickerm (2016). *"Mind the Gap: Transportation Challenges for Individuals Living with Autism Spectrum Disorders." The School of Public Policy*, SPP Communiqué 8(2): 1–4. https://journalhosting.ucalgary.ca/index.php/sppp/article/view/42559/30442

Falkmer, M., T. Barnett, C. Horlin, O. Falkmer, J. Siljehav, S. Fristedt, H. C. Lee, D. Y. Chee, A. Wretstrand, & T. Falkmer, (2015). "Viewpointsof adults with and without Autism Spectrum Disorders on public transport," *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* Elsevier, vol. 80(C), pages 163-183. https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.07.019

Lindsay, S. (2019): Accessible and inclusive transportation for youth with disabilities: exploring innovative solutions, *Disability and Rehabilitation*, DOI: 10.1080/09638288.2018.1517194

Lim, P. Y; K. Penny, C. Henriette, F. Fritz (2021) Facilitating independent commuting among individuals with autism – A design study in Singapore, *Journal of Transport & Health*, Volume 21, https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101022

Lubin, A. e C. Feeley, (2016). Transportation Issues of Adults on the Autism Spectrum: Findings from Focus Group Discussions. *Transportation Research Record*, 2542(1), 1-8. https://doi.org/10.3141/2542-01

Pfeiffer, B., A. P. Davidson, E. Brusilovskiy, , C. Feeley, M. Kinnealey, e M. Salzer, (2024). Effectiveness of a peer-mediated travel training intervention for adults with autism spectrum disorders. Journal of Transport & Health, *35*, 101781. https://doi.org/10.1016/j.jth.2024.101781

Wilson, N.J., A. Stevens, P. Srasuebkul, M. Kersten, Z. Lin, J.N. Trollor, e S.R.C. Arnold, (2021). Exploring the relationship between community mobility and quality of life, employment and completing further education: Results from the Australian Longitudinal Study of Autism in Adulthood. *Transport and Health*, 22. doi.org/10.1016/j.jth.2021.101117

Zalewska, A., A, Migliore e J. Butterworth, (2016) 'Self-determination, Social Skills, Job Search, andTransportation: Is There a Relationship with Employment of Young Adults with Autism?' *Journal of Vocational Rehabilitation* vol. 45, no. 3, pp : 225 – 239 doi 10.3233/JVR-160825

Artur Carlos de Morais (arturcmorais@gmail.com)
Universidade Católica de Brasília – UCB, Pós Graduação em Educação Física. QS 07 – Lote 01 – EPCT – Taguatinga, Brasília/DF, Brasil
Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal. Anexo do Palácio do Buriti - 15º andar – Brasília/DF, Brasil
Gislane Ferreira de Melo (gmelo@p.ucb.br)
Universidade Católica de Brasília – UCB, Pós Graduação em Educação Física. QS 07 – Lote 01 – EPCT – Taguatinga, Brasília/DF, Brasil

SAÚDE MENTAL DE MOTORISTAS DO TRANSPORTE COLETIVO URBANO E SUA RELAÇÃO COM A ESCALA DE TRABALHO

Rogério Junio Reis Laktim, Fernando Toledo Ferraz, Ricardo Luiz Fernandes Bella
Universidade Federal Fluminense (UFF)

RESUMO
Este estudo apresenta fatores relacionados ao trabalho dos motoristas de transporte urbano que afetam sua saúde mental, com ênfase na influência da escala de trabalho. Levantou-se a questão de como a jornada e a escala interferem na qualidade de vida desses profissionais. Para tanto, realizou-se uma revisão bibliográfica, a fim de construir o referencial teórico, e uma revisão sistemática, para identificar pesquisas existentes. Os resultados evidenciam que longas jornadas, a ausência de pausas para descanso, as folgas alternadas em domingos e feriados e a pressão para cumprir horários prejudicam a saúde mental dos motoristas. Constatou-se a necessidade de mudanças na organização da jornada, da inclusão de pausas e valorização da categoria por meio de políticas públicas. Verificou-se, ainda, a escassez de estudos sobre o tema, o que indica a importância de ampliar as pesquisas que sirvam de base para ações voltadas à melhoria das condições de trabalho e saúde desses profissionais.

1. INTRODUÇÃO

O aumento dos transtornos mentais, como ansiedade e depressão, tem impactado negativamente a qualidade de vida da população, gerando sofrimento psíquico e adoecimento relacionados ao estresse ocupacional (Alcântara et al., 2016; Peters et al., 2021; Neumann et al., 2022). Tais problemas comprometem a produtividade, ocasionam afastamentos e aumentam a demanda pelos serviços de saúde.

Algumas profissões são consideradas penosas e, entre elas, Matos, Moraes e Pereira (2015) destacam a de motorista de ônibus, em razão das exigências de esforços físicos, que geram incômodos e sofrimento, bem como dos elevados níveis de sobrecarga psíquica e cognitiva impostos a esses trabalhadores. Na visão de Souza, Liberal, Saburido (2016), essa categoria profissional está entre as mais afetadas pelo sofrimento psíquico, em razão de ser uma atividade é rotineira, das condições de trabalho inadequadas e das jornadas excessivas, que acarretam riscos para os motoristas, para os passageiros e para a população em geral. Esses trabalhadores enfrentam inúmeras pressões decorrentes da rotina, marcada por diversas variáveis que interferem tanto no desempenho laboral quanto, sobretudo, em sua saúde. Sintomas psicológicos, como irritabilidade, distúrbios do sono e ansiedade, associados a comportamentos como absenteísmo e mudanças nos hábitos, impactam significativamente a saúde desses profissionais. (Casqueti, 2020).

Para o desenvolvimento do estudo, formulou-se a seguinte hipótese: a escala de trabalho dos motoristas interfere em sua saúde mental. Como questão norteadora, estabeleceu-se: a escala de trabalho dos motoristas de transporte urbano afeta sua saúde mental?

O objetivo geral do estudo é analisar os problemas laborais que afetam a saúde mental dos motoristas de transporte coletivo urbano. Como objetivos específicos, propõe-se: compreender a organização da escala desses profissionais; identificar os fatores estressantes presentes em sua atividade laboral; e apontar as dificuldades relacionadas à escala de trabalho que comprometem tanto a qualidade de trabalho quanto a saúde dos motoristas.

O estudo mostra-se relevante, uma vez que, para a maioria da população brasileira, o transporte coletivo é essencial à mobilidade diária, sobretudo nas grandes cidades, caracterizadas por alta densidade populacional e pela residência da população de baixa renda em áreas periféricas e distantes. Para esse público, o transporte coletivo representa a única alternativa viável de locomoção, embora seja frequentemente alvo de insatisfação, seja pela baixa qualidade percebida, pelos atrasos ou pelas condições dos veículos. Entretanto, pouco e considera as dificuldades enfrentadas pelos motoristas e os impactos que essas condições exercem sobre sua saúde mental. Segundo dados do IBGE (Rotaflux, 2024), aproximadamente 44% dos brasileiros utilizam transporte público, sobretudo nas grandes cidades, o que torna fundamental a compreensão das condições laborais dos motoristas.

Ainda segundo Rotaflux (2024), o transporte público influencia diretamente a qualidade de vida dos cidadãos e a economia local. Observa-se, em 2024, um aumento significativo no uso do transporte público nas grandes

metrópoles, decorrente dos investimentos em infraestrutura e das melhorias nos serviços, que têm incentivado a população a deixar os carros em casa. Apesar desses avanços, o transporte público ainda enfrenta desafios que precisam ser superados para garantir um serviço de qualidade à população.

Os problemas relacionados ao transporte público afetam não apenas a população, mas também a saúde dos motoristas, que trabalham oito horas por dia e enfrentam uma variedade de desafios. Torna-se, portanto, necessário conhecer a realidade do trabalho desses profissionais, a fim de socializar o conhecimento e buscar soluções que tornem sua atividade menos estressante e mais satisfatória. Nesse sentido, espera-se que o estudo contribua para a reflexão de acadêmicos e pesquisadores que desenvolvem projetos de pesquisa e inovação no transporte coletivo, em diversos países, visando oferecer melhores condições de trabalho aos motoristas e preservar sua saúde física e mental. Além disso, pretende-se que os resultados sejam compartilhados com gestores das empresas de transporte e com a sociedade em geral, para promover a conscientização sobre as condições de saúde desses profissionais e estimular a implementação de políticas públicas que valorizem a categoria, garantindo condições dignas de trabalho e de vida.

O estudo será estruturado em três seções:

Na primeira seção, serão apresentados os pressupostos teóricos que embasam a pesquisa, com base em artigos que identificam os fatores estressantes no trabalho dos motoristas e sua relação com o adoecimento mental. Na segunda, será descrito o percurso metodológico do estudo e, na terceira seção, serão discutidos e apresentados os resultados. Por fim, serão expostas as considerações finais, bem como as referências bibliográficas, que sustentaram o embasamento teórico da pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A atividade de motorista de transporte coletivo urbano está diretamente associada a riscos à saúde mental, com destaque para o estresse ocupacional, ansiedade e depressão (Neumann, Carlotto e Câmara, 2022; Alcântara, Silva e Pereira, 2016). Esses profissionais enfrentam longas jornadas, pressão para cumprir horários rigorosos e escalas de trabalho extensas, que restringem o descanso e o convívio familiar, fatores que contribuem agravam o adoecimento mental (Souza, Liberal e Saburido, 2016).

Alcântara et al. (2016) ressaltam que a escala de trabalho, somada a baixos salários e à necessidade de horas extras, aumenta a sobrecarga física e psíquica, frequentemente resultando em acidentes, absenteísmo e aposentadoria precoce. Neumann et al. (2022) acrescentam que a falta de autonomia na definição dos horários intensifica o sofrimento psíquico, evidenciando a necessidade de políticas públicas e medidas de gestão voltadas à reorganização das jornadas de trabalho.

Casqueti (2020) evidencia que as condições de trabalho dos motoristas, como a ausência de pausas adequadas, a fiscalização constante e a pressão por pontualidade, intensificam a fadiga e o estresse diário. Lin et al. (2023) e Lu e Liang (2022) acrescentam que o acúmulo de horas de condução, aliado a hábitos sedentários e à baixa qualidade do sono, pode desencadear transtornos cardiovasculares e problemas mentais severos.

Stamoulos e Prodromitis (2023) destacam a importância de estratégias voltadas à prevenção de riscos psicossociais no ambiente de trabalho, tais como a implementação escalas mais equilibradas, a melhoria da infraestrutura de apoio e a adoção de ações de saúde ocupacional que promovam o bem-estar dos motoristas.

Dessa forma, evidencia-se a necessidade urgente de repensar a organização da escala de trabalho, aprimorar a estrutura do serviço de transporte coletivo e valorizar a categoria, com o objetivo de reduzir os impactos negativos sobre a saúde mental desses profissionais.

3. METODOLOGIA

O percurso metodológico do estudo consistiu em uma revisão bibliográfica abrangente sobre a saúde mental dos motoristas de ônibus, seguida de uma revisão sistemática destinada à análise crítica dos artigos selecionados. Na revisão bibliográfica, foram identificadas as principais abordagens teóricas e os trabalhos mais relevantes; na revisão sistemática, selecionaram-se e analisaram-se artigos com o objetivo de responder

à questão da pesquisa: a escala de trabalho dos motoristas de transporte urbano afeta sua saúde mental?

Para o estudo, optou-se por uma abordagem qualitativa de caráter exploratório, com o objetivo de compreender o tema e identificar lacunas ainda existentes. Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica, baseada em material previamente elaborado por outros autores, permite ao pesquisador levantar a produção já publicada, aprimorar o conhecimento sobre o tema e analisar diferentes perspectivas, possibilitando a compreensão de uma realidade existente a partir de uma abordagem qualitativa.

Após a definição do tema, elaborou-se um plano de trabalho e, em seguida, realizou-se um levantamento bibliográfico com buscas de artigos a partir de 2015. As fontes consultadas incluíram livros, teses e dissertações, artigos e revistas científicas, bem como publicações on-line indexadas nos bancos de dados Literatura Latino Americana e do Caribe em Ciências Sociais e da Saúde (LILACS), Scientific Eletronic Library OnLine (SciELO). Na primeira leitura dos títulos, alguns artigos foram arquivados, enquanto outros foram descartados; também foram excluídos aqueles que abordam o tema de forma superficial, os que apresentavam apenas o resumo ou com dados imprecisos, que não respondiam ao questionamento proposto neste estudo.

Recolheu-se e analisou-se as principais contribuições sobre o tema, a partir dos descritores: saúde mental, motoristas de transporte urbano, escala de trabalho dos motoristas. Embora não tenha havido restrição de idioma, os critérios de inclusão priorizaram textos em Língua Portuguesa, enquanto foram excluídos artigos que abordam o tema de forma superficial ou sem fundamentação científica adequada.

A etapa da revisão sistemática incluiu a busca em bases de dados, avaliação da qualidade dos artigos, e organização de dados, conforme recomendado por Araújo et al. (2020), uma vez que esse método permite sintetizar, avaliar criticamente e interpretar pesquisas relevantes disponíveis sobre determinado tema. O objetivo foi identificar, organizar e avaliar a qualidade dessas pesquisas com base em uma metodologia confiável, rigorosa e verificável, ampliando a precisão e a representatividade dos resultados obtidos a partir do estudo de outros pesquisadores. A revisão sistemática é utilizada para orientar o desenvolvimento de projetos, identificar métodos de pesquisa, indicar direções para investigações futuras e garantir que seu conteúdo seja explícito e passível de reprodução (Rother, 2007; Marcondes, 2023).

Após a leitura integral dos materiais selecionados na revisão bibliográfica e sistemática, realizou-se uma análise interpretativa, com organização dos achados em categorias temáticas emergentes, como saúde mental dos motoristas, escala de trabalho, estresse, ansiedade e depressão. A partir dessa análise, buscou-se construir uma reflexão crítica sobre o trabalho dos motoristas de ônibus urbanos, a fim de compreender como ele tem afetado a saúde mental desses profissionais.

O processo da revisão sistemática foi conduzido com base nas recomendações do PRISMA (Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), cujas diretrizes fornecem um padrão claro e abrangente para a condução e relato de revisões sistemáticas, garantindo a transparência e a replicabilidade dos resultados, a integração dos achados da revisão bibliográfica e da sistemática proporcionou uma visão abrangente e detalhada sobre o tema, permitindo a identificação de padrões, lacunas e tendências na literatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para delimitar o tema, seguiu-se o protocolo PRISMA, priorizando artigos publicados a partir de 2015, em língua portuguesa, voltados à saúde mental de motoristas brasileiros de transporte coletivo urbano.

As buscas principais ocorreram no Google Acadêmico e em bases como Scopus, PubMed e Web of Science, utilizando termos relacionados à escala de trabalho, saúde mental e motoristas de ônibus. Embora tenham sido identificados milhares de resultados preliminares, a maioria foi excluída após análise de títulos, resumos e

textos completos, por não atender ao foco proposto.

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de seleção dos artigos, conforme a recomendação PRISMA.

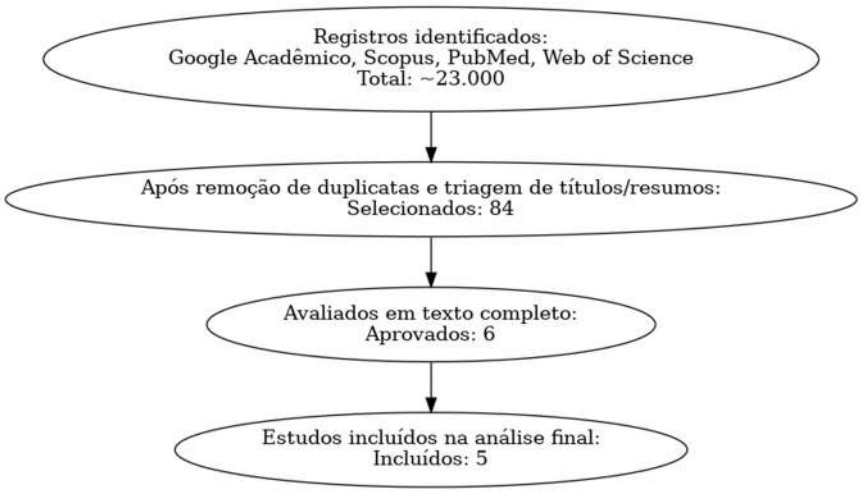


Figura 1: Fluxograma do processo de seleção dos artigos segundo protocolo PRISMA

O fluxograma (Figura 1) sintetiza o rigor metodológico da revisão sistemática, assegurando rastreabilidade e clareza no recorte final do corpus analisado.

Os estudos selecionados com maior aderência foram Alcântara, Silva e Pereira (2016); Souza, Liberal e Saburido (2016); Casqueti (2020); Neumann, Carlotto e Câmara (2022), e o artigo internacional de Boris et al. (2024), que realizou uma revisão sistemática específica sobre saúde mental em trabalhadores do transporte urbano.

A partir da análise qualitativa das 15 pesquisas incluídas, conforme detalhado na Tabela 1, evidencia-se que longas jornadas, turnos instáveis, pressão para cumprir horários e ausência de pausas adequadas afetam diretamente o bem-estar mental dos motoristas, favorecendo quadros de estresse, ansiedade, insônia, fadiga e sintomas de depressão.

Tabela 1: Fatores de risco no bem-estar psicológico dos profissionais

Fator de Risco	**Número de Pesquisas**	**Porcentagem (%)**
Longas jornadas e turnos alternados	12	80
Ausência de pausas adequadas	10	67
Sintomas de depressão e ansiedade	9	60
Pressão por pontualidade e fiscalização constante	8	53
Acúmulo de horas de condução, hábitos sedentários e baixa qualidade do sono	5	33
Medidas preventivas (abordagem)	3	20

Observa-se, de um modo geral, que os resultados indicam padrões consistentes: jornadas extensas, turnos alternados, falta de pausas e pressão por horários rigorosos como os principais fatores de risco à saúde mental dos motoristas de transporte urbano. Ressalta-se, no entanto, que há escassez de estudos que explorem estratégias de prevenção ou políticas públicas voltadas a minimizar esses impactos, reforçando a necessidade de novas pesquisas na área.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidenciou que a escala de trabalho impacta diretamente a saúde mental dos motoristas de transporte coletivo urbano, sobretudo devido a longas jornadas, turnos alternados e ausência de pausas adequadas. Esses

fatores favorecem quadros de estresse, ansiedade, insônia e sintomas de depressão, comprometendo o bem-estar desses profissionais.

As buscas realizadas em diferentes bases - PubMed, Scopus e Web of Science, Google Acadêmico, entre outras – indicam que há poucos estudos sobre a saúde mental dos motoristas de transporte urbano. Isso evidencia a necessidade de novas pesquisas, considerando que essa categoria desempenha um papel essencial para a sociedade, muitas vezes em detrimentos de sua saúde e qualidade de vida. Sugere-se, portanto, a realização de investigações adicionais que permitam ampliar o conhecimento sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcântara, V. C. G.; R. M. R. C. A. Silva e E. R. Pereira (2016). *As condições de trabalho e o mundo da vida de motoristas de ônibus: estudo fenomenológico.* Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br (acesso em 04/06/2025).

Araújo, W. J. e A. H. T. Casimiro (2020). *Cenários prospectivos: revisão sistemática na Lisa.* Revista Digital Biblioteconomia e Ciência da Informação, Emerald, Scopus e Web of Science.

Boris, E.; V. Gómez-Orti, S. A. Useche, L. Cedillo, D. W. H. Stephenson e P. Landsbergis (2024). *Mental health outcomes among urban public transport workers: A systematic literature review. Journal of Transport & Health.* Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jth.2024.101804 (acesso em 04/06/2025).

Casqueti, E. (2020). *Como anda a saúde mental de motoristas do transporte.* Disponível em: https://www.repositoriodigital.univag.com.br (acesso em 04/06/2025).

Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa* (4ª ed.). São Paulo: Atlas.

Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (6ª ed.). São Paulo: Atlas.

Lin, Y. J. et al. (2023). *The association of job fatigue with mental disorders among bus drivers.* Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, v. 49, n. 1, p. 75–83. DOI: https://doi.org/10.5271/sjweh.4065 (acesso em 04/06/2025).

Lu, C.-C. e J.-K. Liang (2022). *Exploring factors that influence the cardiovascular health of bus drivers for the improvement of transit safety. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, v. 29, n. 4, p. 1263–1272. DOI: https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2120259 (acesso em 04/06/2025).

Marcondes, R. e S. L. R. da Silva (2023). *O protocolo Prisma 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências.* Revista Brasileira de Pós-Graduação, v. 18, n. 39, p. 1–19. DOI: 10.21713/rbpg.v18i39.1894. Disponível em: https://rbpg.capes.gov.br/rbpg/article/view/1894 (acesso em 04/06/2025).

Neumann, G.; M. S. Carlotto e S. G. Câmara (2022). *Transtornos mentais comuns em motoristas de transporte coletivo de passageiros.* Disponível em: https://pepsic.bvsalud.org (acesso em 04/06/2025).

Peters, S. E. et al. (2021). *Working Conditions Influencing Drivers' Safety and Well-Being in the Transportation Industry: "On Board" Program.* International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 18, 10173. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph181910173 (acesso em 04/06/2025).

Rotaflux (2024). *Transporte público no Brasil 2024* – Dados IBGE. Disponível em: https://rotaflux.com.br (acesso em 29/05/2025).

Rother, E. T. (2007). *Revisão sistemática X revisão narrativa.* Disponível em: https://www.scielo.br (acesso em 04/06/2025).

Souza, M. B.; H. K. Liberal e R. A. L. Saburido (2016). *O motorista do ônibus urbano: o estresse na profissão.* Disponível em: https://repositorio.itl.org.br (acesso em 04/06/2025).

Stamoulos, G. e R. Prodromitis (2023). *Workplace Psychosocial Risks in Urban Transport: an exploratory approach of the existing perception of key stakeholders within transport organizations.* Hellenic Journal of Psychology, v. 20, p. 222–257. DOI: https://doi.org/10.26262/hjp.v20i3.9368 (acesso em 04/06/2025).

TREINAMENTO DE INDIVIDUOS AUTISTAS PARA UTILIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Artur Carlos de Morais[1,2]; Gislane Ferreira de Melo[1]
[1]Universidade Católica de Brasília, [2]Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal

RESUMO
Adultos com Transtorno do Espectro Autista (TEA) tem dificuldades do uso de transporte público devido a diversas barreiras ambientais, por exemplo, fatores físicos e sensoriais; fatores atitudinais; requisitos sociais e falta de treinamento para vencer essas barreiras. O objetivo de artigo é apresentar revisão sistemática da literatura de artigos científicos publicados nos últimos 10 anos, período de 2015 a 2025, que apresentem resultados de treinamento com autistas para a utilização de transportes públicos coletivos com autonomia. Foram encontrados cinco artigos, três estudos norte-americanos, um português e um dinamarquês. Os 03 artigos norte-americanos apresentam treinamento com viagens reais e os outros dois utilizam realidade virtual para gerar habilidades necessárias para as viagens.

1. INTRODUÇÃO

A literatura é farta em associar positivamente a mobilidade com inclusão social e acesso a várias oportunidades, incluindo, mas não se limitando a empregos, educação, bens e serviços (Lim *et al*, 2021). Porém pessoas diagnosticadas com Transtornos do Espectro Autista (TEA) enfrentam desafios para se locomoverem, fato que os impedem o acesso à saúde, a participação na comunidade e as oportunidades de emprego (Pfeiffer *et al*, 2024). A falta de habilidades do autista para transporte, contribuem para a subutilização do transporte público (Kersten et al., 2020), assim frequentemente eles dependem de terceiros para se deslocar ou utilizam serviços de transporte (Pfeiffer et al, 2020, Dudley e Zwicker. 2016). Essa dependência gera sobrecarga para seus cuidadores, 70% dos cuidadores abrem mão de atividades importantes para atender às necessidades de transporte de seus filhos e eles próprios, os autistas, perdem atividade importantes devido à falta de disponibilidade de pessoas para os acompanhar nos deslocamentos (Feeley *et al*., 2015 Morais e Morais, 2024).

Para as viagens com autonomia, os autistas apresentam dificuldades e preocupações. Especificamente para a utilização dos transportes públicos coletivos, objeto deste estudo, as dificuldades podem ser citadas: como chegar ao ponto de ônibus e estação de trem sem ajuda, entrar e sair de trens ou ônibus (Thériault e Morales, 2022), planejar uma viagem de transporte público, executar a sequência correta de passos para ir de um destino a outro (Pfeiffer *et al*, 2024). As preocupações para a utilização do transporte público são: encontrar um assento, a simpatia e prestatividade do motorista do transporte público, a forma como outros passageiros do transporte o tratarão (Thériault e Morales, 2022), barulho dos veículos de transporte em movimento (Bao *et al*, 2024), entre outros.

Portanto um transporte acessível representa uma das principais barreiras do autista à participação na vida econômica e comunitária (Feeley *et al*., 2015), independência de transporte aumenta a capacidade de engajamento em emprego e educação para pessoas autistas (Wilson *et al,* 2021). Pfeiffer *et al*. (2024) relatam que uma pesquisa nos EUA com indivíduos com TEA, 65% dos participantes relataram que o uso do transporte público melhoraria sua qualidade de vida e 73% relataram que seriam mais propensos a usar o transporte público se tivessem treinamento especial. Na pesquisa de Lubin e Feeley (2016) alguns pais demonstram estarem abertos à possibilidade de seu filho adulto usar o transporte público, desde que recebesse treinamento de viagem.

O treinamento em transporte é a prática de ensinar aos indivíduos as habilidades necessárias para ser capaz de se movimentar de forma independente para satisfazer os seus desejos e necessidades quotidianas (Davis, 2024). Esse treinamento é abrangente, intensivo e de curto prazo, projetado para ensinar indivíduos a viajar com segurança e independência em transporte público para destinos visitados regularmente (Pfeiffer et al, 2024). Jovens adultos autistas que buscam fazer a transição para a idade adulta e viver com maior independência, faz-se necessário treinamento eficaz em transporte e mobilidade (Awsumb et al., 2022), aprender a usar vários meios de transporte (Hong et al., 2017).

Assim este trabalho tem por objetivo apresentar a revisão sistemática da literatura, de artigos científicos que tratam do treinamento de pessoas autistas para a utilização de transportes públicos, no período de 2015 a 2025. Para tanto, ele se divide em 4 seções. Após essa introdução, tem-se o método da pesquisa. Na terceira será apresentado os resultados da revisão da literatura. Para finalizar, as considerações finais.

2. MÉTODO

Para atender ao objetivo deste trabalho, foi pesquisado nas bases de publicações de artigos científicos nos idiomas português e inglês no período de 2015 a 2025. A seleção dos artigos seguirá os seguintes passos: separar pelo título das publicações que pode indicar a possibilidade de ser um estudo que trate do treinamento de autistas para utilização de sistema de transportes públicos coletivos, excluir os títulos repetidos; retirar da seleção as publicações que não são artigos científicos; eleger os artigos através da leitura dos resumos. Com os artigos selecionados será feita a leitura integral de cada artigo. Para o idioma português serão pesquisados nos portais Scielo, Periódicos Capes e Google Acadêmico com os argumentos autismo com transporte público e treinamento. Para artigos em língua inglesa serão pesquisados os portais Sciencedirect, Pubmed, Science.gov e The American Journal of Occupational Therapy utilizando os argumentos autismo, public transit e training.

3. RESULTADOS

Foram encontradas 366 publicações, todas na língua inglesa e seleção feita conforme apresentado na figura 1

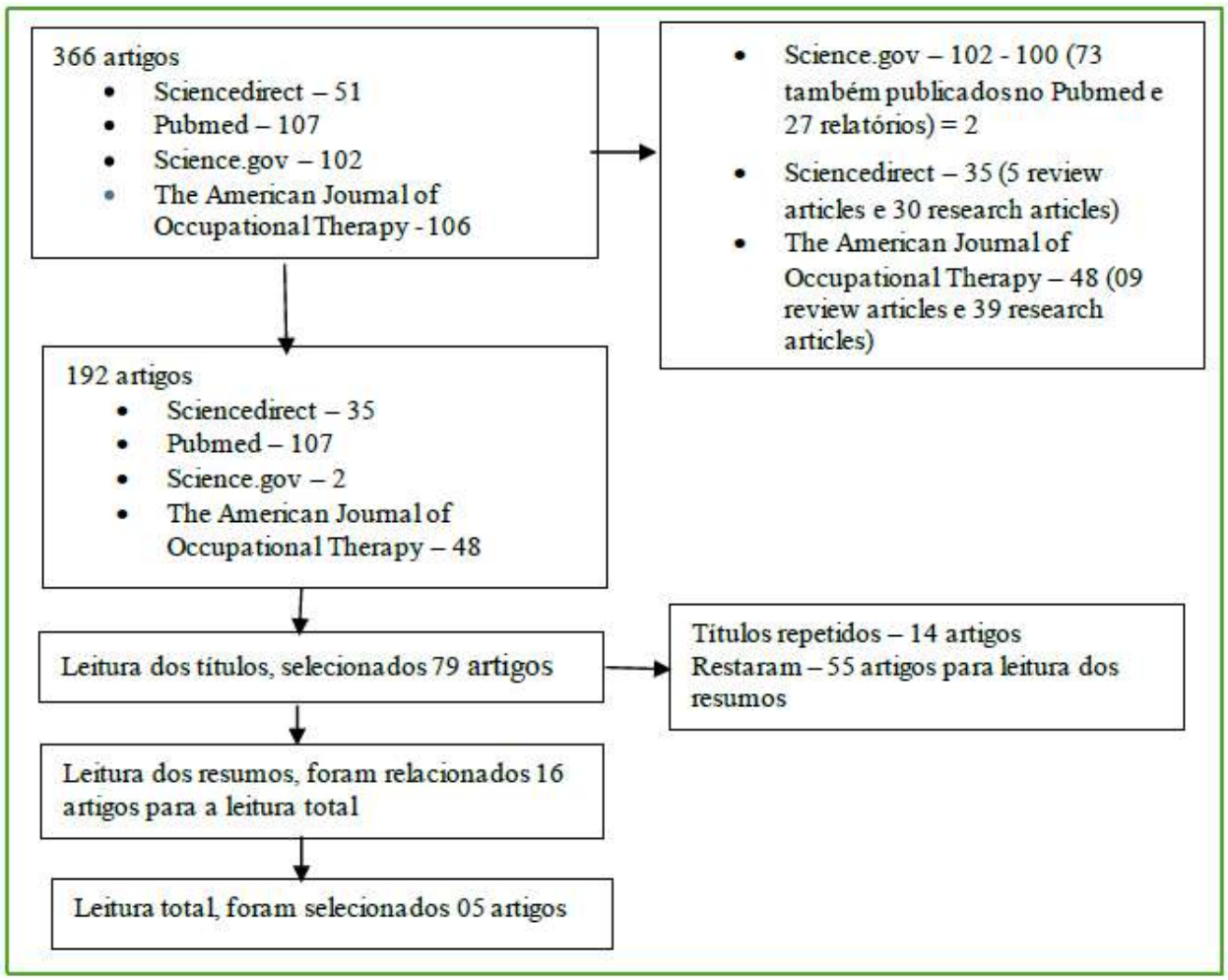


Figura 1: Seleção de Artigos

Os 05 artigos selecionados que apresentavam treinamento de autistas para o uso do transporte público coletivo, em 02 artigos o treinamento através de realidade virtual, Simões et al, (2018) e Adjorlu et al. (2025), 03 artigos

Pfeiffer et al. (2024), Pfeiffer (2022) e Pfeiffer et al. (2020). Na tabela 1 são apresentados os 05 artigos e seus objetivos, métodos e resultados

Tabela 1: Artigos de treinamento de Indivíduos TEA para a Utilização de Transportes \públicos

Autor	Objetivo	Método	Resultados
Pfeiffer *et al.* (2024)	Avaliar a eficácia e a viabilidade de um treinamento sistemático em viagens mediado por pares para melhorar a independência de viagens em transporte público para adultos autistas	Um ensaio clínico randomizado para determinar a eficácia de um programa de treinamento em viagens mediado por pares em habilidades de viagem. Usou o Guia de treinamento de viagem do Kennedy Center (2012). 38 indivíduos no grupo controle e 37 no grupo experimental.	O grupo que recebeu intervenção mediada por pares melhorou significativamente as habilidades de viagem necessárias para usar o transporte público
Pfeiffer (2022)	Examinar o impacto de um programa abrangente de intervenção de TO fornecido por meio do suporte de pares nas habilidades de viagem de indivíduos com TEA	38 jovens e adultos em idade de transição com TEA, com idades entre 16 e 27 anos participaram de treinamento usando plano de oito etapas para o ensino de deslocamento independente em transporte público do Kennedy Center (2012)	Os resultados deste estudo fornecem suporte preliminar para o uso de um programa de intervenção de viagem estruturado e abrangente.
Pfeiffer *et al.* (2020)	Examinar o impacto de um programa de treinamento de viagem nas habilidades de viagem de indivíduos com deficiência intelectual e de desenvolvimento	69 homens e 18 mulheres com DDI e/ou TEA, idades entre 15 e 77 anos. Foram 6 sessões, cada uma durando cerca de 90 minutos para um total de quase 10 horas de treinamento. Usou o Guia de treinamento de viagem do Kennedy Center (2012)	O estudo identificou que todos os participantes obtiveram ganhos substanciais em competências necessárias para viagens independentes em transporte público
Simões *et al.* (2018)	Desenvolver jogo que definisse um “ambiente seguro” onde os jogadores se familiarizassem com o processo de pegar um ônibus e validar se ele poderia ser usado de forma eficaz.	Os jogadores foram colocados em uma cidade tridimensional e submetidos a um conjunto de tarefas que envolviam pegar ônibus para chegar a destinos específicos. Dez participantes com TEA passaram por entre 1 e 3 sessões de treinamento, um grupo de controle de 10 participantes receberam 1 sessão	Encontrou um aumento estatisticamente significativo nas medidas de conhecimento do processo de andar de ônibus, uma redução na atividade eletrodérmica (AED), métrica usada para medir a ansiedade,
Adjorlu *et al.* (2025)	Explorar o potencial da Realidade Virtual (RV) como intervenção para enfrentar os desafios de adolescentes autistas para uso do transporte público	Simular em realidade virtual de uma estação de trem em colaboração com uma escola especializada, permitindo que alunos autistas praticassem de tarefas essenciais de transporte, verificar horários, comprar passagens e navegar em plataformas em um ambiente seguro e controlado.	Melhorias nas habilidades dos alunos para compreender horários, reconhecer placas de transporte e gerenciar sistemas de check-in

O treinamento proposto por Pfeiffer *et al.* (2020) ocorre com viagens reais no transporte público, onde o instrutor vai gradualmente diminuindo assistência e supervisão, utilizando o currículo de treinamento em viagens do Kennedy Center (Kennedy Center, Inc., 2012), um plano de oito etapas (Tabela 2).

Tabela 2: Passos do o “The Kennedy Center’s travel training guide and curriculum (TCG)”

Passos	Ação do Instrutor

1	Explicar o processo de treinamento e modelagem das habilidades necessárias
2	Treinar das habilidades para chegar ao ponto ou estação de ônibus de forma independente
3	Ensinar a escolha da rota de transporte público, com o instrutor modelando o comportamento apropriado e fornecendo instruções quando necessário
4	Acompanhar o aluno na viagem, discutindo os procedimentos de emergência conforme necessário (por exemplo, perder um ponto, pegar o ônibus errado)
5	Acompanhar o aluno à distância
6	Acompanhar o aluno de um carro
7	Encontrar o aluno no destino
8	Fornecer suporte telefônico de acompanhamento para discutir problemas e determinar o progresso um e três meses após o treinamento

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que esse deslocamento autônomo do autista ocorra é necessário a etapa do seu treinamento. Esta revisão sistemática da literatura demonstrou que as pesquisas referentes ao treinamento do autista para a utilização do transporte público são muito escassas, uma pequena quantidade de artigos científicos publicados nos últimos 10 anos, cinco artigos, sendo três com viagens reais e dois virtuais. Mesmo sendo poucas publicações, elas demonstram que o treinamento, virtual ou real, conseguem resultados satisfatórios para que o autista possa adquirir habilidades que proporcionam a ele se deslocar de transportes públicos com maior autonomia.

No Brasil, o tema autonomia do deslocamento do autista é inexistente de publicações científicas no seguimento de transportes. portanto há a necessidade de implementar pesquisas para o desenvolvimento de métodos de treinamento de indivíduos com TEA possam se deslocar pela cidade utilizando os sistemas de transportes públicos com autonomia, assim poder ter mais acesso a emprego, educação, cuidados com a saúde. Mesmo que sejam pesquisas para aplicar o "The Kennedy Center's travel training guide and curriculum (TCG)", ou até criar programas próprios.

REFERÊNCIA

Adjorlu, A., Rosendahl, C.S., Lanther, M.B., Ahmad, P.K. (2025). Virtual Station: Virtual Reality as a Bridge Towards Real Independence in Public Transportation for Autistic Children and Adolescents. In*: Brooks, E., Edstrand, E., Møller, A.K., Bjørner, T. (eds) Design, Learning, and Innovation. DLI 2024. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 604. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85663-1_2

Awsumb, J., M. Schutz, E. Carter, B. Schwartzman, L Burgess e J. Lounds Taylor. (2022). Pursuing Paid Employment for Youth with Severe Disabilities: Multiple Perspectives on Pressing Challenges. *Research and Practice for Persons with Severe Disabilities,* 47(1), 22-39. https://doi.org/10.1177/15407969221075629

Bao, L.; F. N.Maybauer,; K. Hartz; L. P. R. Pelzer; Lang, (2024): On the Journey to Inclusive Mobility: A Solution for Neurodivergent Public Transport Users. Mensch und Computer 2024 - Workshopband. DOI: 10.18420/muc2024-mci-src-261. Gesellschaft für Informatik e.V.. MCI: Student Research Competition. Karlsruhe. 1.-4. September 2024.

Davis, M. (2024) *Positive Impacts of Transportation and Mobility Training for Autistic Young Adults*, A Starred Paper Proposal Submitted to the Graduate Faculty of St. Cloud State University In Partial Fulfillment in Requirements For the Degree Master of Science in Special Education.disponível em: https://repository.stcloudstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1218&context=sped_etds#:~:text=One%20way%20to%20improve%20an,work%2C%20home%20or%20activities%20for. Acessado em: 16 fev. 2025

Dudley, C. e J. Zwicker. (2016). "Mind the Gap: Transportation Challenges for Individuals Living with Autism Spectrum Disorders." *The School of Public Policy, SPP Communiqué* 8(2): 1–4. https://doi.org/10.11575/sppp.v9i0.42559

Feeley, C.; D. Deka, A. Lubin e M. McGackin (2015) Detour to the Right Place: A Study with Recommendations for Addressing the Transportation Needs and Barriers of Adults on the Autism Spectrum in New Jersey. Disponível

em: https://www.autismnj.org/wp-content/uploads/2016/05/Detour_to_the_Right_Place_Technical_Report_2015.pdf. Acesso em 25 jun. 2024

Hong, E. R., J. B. Ganz, K. Morin, J. L. Davis, J. Ninci, L. Neely, e M. B. Boles. (2017). Functional Living Skills and Adolescents and Adults with Autism Spectrum Disorder: A Meta-Analysis. *Education and Training in Autism and Developmental Disabilities*, 52(3), 268–279. https://www.jstor.org/stable/26420399

Kennedy Center, Inc. (2012). Travel training guide. Trumbull, CT: Kennedy Center, Inc. (no doi)

Kersten M, K. Coxon, H. Lee e N. J. Wilson (2020). Independent Community Mobility and Driving Experiences of Adults on the Autism Spectrum: A Scoping Review. *Am J Occup Ther*. Sep/Oct;74(5):7405205140p1-7405205140p17. doi: 10.5014/ajot.2020.040311..

Lim, P. Y.; P. Kong, H. Cornet, F. Frenkler (2021) Facilitating independent commuting among individuals with autism – A design study in Singapore, *Journal of Transport & Health*, Volume 21, https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101022

Lubin, A. e C. Feeley, (2016). Transportation Issues of Adults on the Autism Spectrum: Findings from Focus Group Discussions. *Transportation Research Record*, 2542(1), 1-8. https://doi.org/10.3141/2542-01

Morais, A. C. e O. M. Morais (2024). (IN)dependência nos Deslocamentos de Diagnosticados com Transtorno do Espectro Autista (TEA): Um Estudo Piloto. Anais XXXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Florianópolis – Brasil Rio de Janeiro: ANPET

Pfeiffer, B.; A. Sell, K. B. Bevans, Initial evaluation of a public transportation training program for individuals with intellectual and developmental disabilities: Short report, *Journal of Transport & Health*, Volume 16, 2020,100813, ISSN 2214-1405, https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100813

Pfeiffer, B.; Effectiveness of a Public Transportation Intervention Program for Individuals With Autism Spectrum Disorder. *Am J Occup Ther* July 2022, Vol. 76(Supplement_1), 7610510206p1. doi: https://doi.org/10.5014/ajot.2022.76S1-PO206

Pfeiffer, B., A. P Davidson, E. Brusilovskiy, C. Feeley, M. Kinnealey e M. Salzer, (2024). Effectiveness of a peer-mediated travel training intervention for adults with autism spectrum disorders. *Journal of Transport & Health*, *35*, 101781. https://doi.org/10.1016/j.jth.2024.101781

Simões M, M. Bernardes, F. Barros, M. Castelo-Branco (2018). Virtual Travel Training for Autism Spectrum Disorder: Proof-of-Concept Interventional Study. JMIR Serious Games. 2018 Mar 20;6(1):e5. doi: 10.2196/games.8428. PMID: 29559425; PMCID: PMC5883078

Thériault, W.; E. Morales (2022). Accessibility and social participation in urban settings for people with autism spectrum disorder (ASD) or an intellectual disability (ID). *Journal of accessibility and design for all*, 2022, vol.VOL 12, núm. 1, p. 155-79, https://doi.org/10.17411/jacces.v12i1.352

Wilson, N.J., A. Stevens, P. Srasuebkul, M. Kersten, Z. Lin, J.N Trollor e S.R.C. Arnold (2021). Exploring the relationship between community mobility and quality of life, employment and completing further education: Results from the Australian Longitudinal Study of Autism in Adulthood. *Transport and Health*, 22. doi.org/10.1016/j.jth.2021.101117

Artur Carlos de Morais (arturcmorais@gmail.com)
Universidade Católica de Brasília – UCB, Pós-graduação em Educação Física. QS 07 – Lote 01 – EPCT – Taguatinga, Brasília/DF, Brasil
Secretaria de Estado de Transporte e Mobilidade do Distrito Federal. Anexo do Palácio do Buriti - 15º andar – Brasília/DF, Brasil
Gislane Ferreira de Melo (gmelo@p.ucb.br)
Universidade Católica de Brasília – UCB, Pós-graduação em Educação Física. QS 07 – Lote 01 – EPCT – Taguatinga, Brasília/DF, Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS COMO POLO GERADOR DE VIAGENS: INVISIBILIDADE DIANTE DOS DESAFIOS DE MOBILIDADE NO CAMPUS

Eric Rosa Santana[1], **Ana Paula Ferreira da Silva**[1], **Carla Cristina da Silva**[1], **Poliana de Sousa Leite**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia

RESUMO
Este estudo avalia o impacto da implantação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UFG em Aparecida de Goiânia sobre o desenvolvimento urbano local. Utilizou-se análise temporal de imagens de satélite CBERS-4A (2020-2025), processadas via classificação supervisionada por máxima verossimilhança no QGIS 3.34. Os resultados indicam expansão urbana de 2,96% na área de influência, caracterizada por predominância rural, serviços restritos e condição de terminal viário, evidenciando segregação espacial. Conclui-se que intervenções estruturais em infraestrutura viária, incluindo a implementação do anel viário, são essenciais para mitigar o isolamento e potencializar o desenvolvimento socioeconômico regional.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A segregação espacial expressa o isolamento e a invisibilização de certos territórios e populações urbanas. Villaça (2001; 2011) aponta que ela é uma das características mais marcantes das cidades e a principal manifestação da desigualdade social. Fortuna (2019) define invisibilidade urbana como a exclusão simbólica e prática de territórios que, embora habitados, permanecem fora do planejamento e da ação do poder público. No Brasil, isso afeta principalmente periferias, ignoradas pela lógica formal da urbanização, o que reforça desigualdades (LLORENS, 2015).

A interiorização do ensino superior público é uma estratégia de desconcentração territorial e desenvolvimento regional. As instituições atuam como catalisadoras do crescimento urbano nas comunidades em que se inserem (DUARTE; RABELO, 2024), mas sua eficácia depende da existência de planejamento urbano e infraestrutura de mobilidade adequada.

Com base na Teoria da Localização (CARVALHO, 2011), nos princípios de uso do solo e sustentabilidade urbana (BARBIER, 1987) e da Teoria dos Meios Inovadores (GREMI), este artigo investiga se a implantação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás, em Aparecida de Goiânia, contribui para o desenvolvimento urbano ou reforça a invisibilidade diante dos desafios de mobilidade. Ademais, será utilizado Sistema de Informação Geográfica (GIS) para contabilizar e mapear o aumento de área urbanizada através de imagens de satélite fornecidas pelo satélite sino-brasileiro CBERS-4. Esta análise auxiliará a averiguar se o crescimento está alinhado com as expectativas de planejamento urbano para o município.

1.1. Polo Gerador de Viagem

.O Plano Diretor de Aparecida de Goiânia não define claramente o que é um polo gerador de viagem, mas a Lei Complementar nº 152/2018, alterada pela nº 179/2020, menciona “pólo atrativo de trânsito” para áreas comerciais e residenciais com mais de 50 unidades (APARECIDA DE GOIÂNIA, 2018). Já o Plano Diretor de Goiânia considera como polo gerador aqueles empreendimentos com grande impacto viário, exigindo Estudo de Impacto de Tráfego para instituições de ensino com área a partir de 2.000 m² ou mais de 600 alunos por turno, e Estudo de Impacto de Tráfego menos detalhado para instituições com área construída entre 360 e 2.000 m² ou 100 a 601 alunos (GOIÂNIA, 2023)

1.2. Desenvolvimento Urbano

O desenvolvimento urbano é um processo contínuo que envolve dimensões sociais, políticas e territoriais (LLORENS, 2015). Este processo requer ações integradas entre governo e sociedade, visando sustentabilidade e equidade (BARBIER, 1987). Para Lynch (1960), a mobilidade depende da infraestrutura física, como ruas e calçadas, sendo rede viária, saneamento e energia elementos básicos para o crescimento urbano (IPE, 2024).

2. POLO GERADOR DE VIAGEM COMO ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO

O desenvolvimento urbano envolve decisões influenciadas por interesses políticos, exigindo articulação entre governos para enfrentar desigualdades (BRANDÃO, 2004). Vasconcelos e Antonello (2019) destacam que o

conceito de "meio inovador", do GREMI, associa o crescimento regional à cooperação entre empresas, universidades e governos, com políticas que incentivem inovação e empreendedorismo.

2.1. Ensino Superior e Transformações no Território Urbano

As Instituições de Ensino Superior (IES) atuam como Polos Geradores de Viagens, atraindo grande fluxo de pessoas e exigindo infraestrutura urbana adequada (SILVA; FERNANDES, 2020). No Brasil, a política de interiorização das universidades federais, iniciada em 2003 com o REUNI, promoveu o acesso ao ensino superior em regiões antes excluídas, estimulando o desenvolvimento socioeconômico local (UNB, 2018).

Entre 2003 e 2011, o número de municípios atendidos dobrou e as matrículas aumentaram em 70%, com impacto visível, como no entorno da Universidade Federal de Catalão, onde se observou a intensificação da ocupação urbana (DUARTE; RABELO, 2024). No entanto, a implantação em áreas com infraestrutura limitada gerou desafios, como baixa atratividade e dificuldade de formar turmas regulares, mostrando que a expansão física não garantiu, por si só, o acesso pleno ao ensino (SANTOS; AMARAL; LUZ, 2023)

2.2. Teoria da Localização

A Teoria da Localização analisa os fatores que influenciam a distribuição espacial de atividades econômicas e orienta políticas públicas para reduzir desigualdades regionais (CARVALHO, 2011). Este trabalho utiliza as teorias clássicas, especialmente a de von Thünen, que relaciona renda da terra à distância do mercado (CARVALHO, 2011), para estudar a localização da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás (UFG). A análise, com apoio do QGIS (ferramenta de geoprocessamento) e da Teoria dos Meios Inovadores (GREMI).

2.3. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás (UFG)

A Universidade Federal de Goiás – Campus III está situada na zona rural de Aparecida de Goiânia, no Bairro Santo Antônio, com acesso pela BR-153 e pela Avenida Santana, que conecta diversos bairros até a estrada municipal de 3 km que leva ao campus (UFG, 2023). A instituição possui capacidade para 1.250 alunos e é atendida por uma linha exclusiva de ônibus com sete viagens diárias definidas pela Companhia Municipal de Transportes Coletivos (CMTC) que é uma empresa pública de interesse privado. (UFG, 2023).

Utilizando o Google Earth, uma análise de 5 km ao redor do campus universitário revela uma zona de transição urbana. Essa área se caracteriza pelo desenvolvimento de bairros como Alvorada Oeste, Jardim Miramar e Rosa dos Ventos, além da presença de um polo industrial e unidades prisionais. Com a delimitação dessa área é possível observar na figura 1de localização para identificar padrões de ocupação e infraestrutura que configuram esta zona como um espaço de transição urbana.

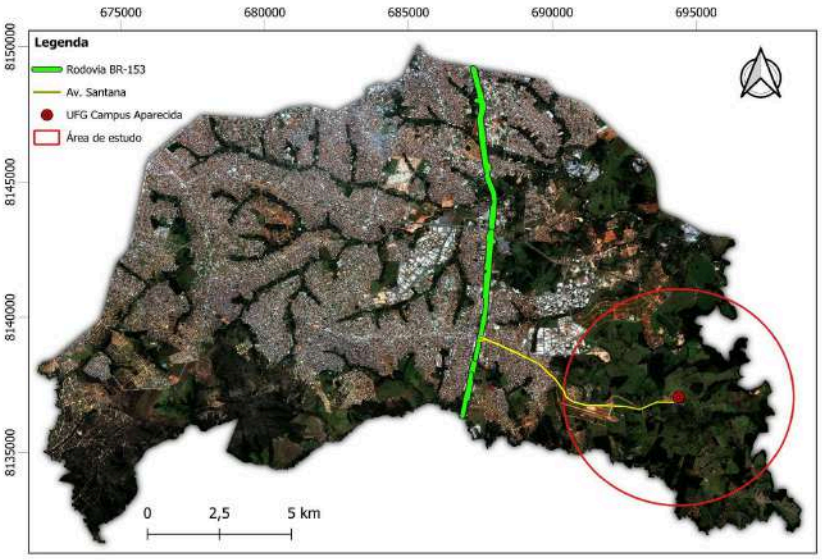


Figura 1: Mapa de localização Universidade Federal de Goiás. Fonte: Autores.

3. METODOLOGIA

A metodologia avalia imagens de satélite em diferentes períodos e buffer de influência, mapeando o uso e ocupação do solo com o algoritmo de máxima verossimilhança, que classifica áreas urbanas, rurais e vegetação. Para realizar esta etapa, utilizou-se o plugin *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) no QGIS 3.34 para processar e categorizar as classes do estudo.

As imagens utilizadas são do satélite CBERS-4A, disponibilizadas pelo INPE, adquiridas entre 2020 e 2025 pelas câmeras WPM, no nível de processamento 4. Com resoluções de 2 m (pancromática) e 8 m (multiespectrais), foram usadas todas as bandas, exceto a infravermelha, conforme os objetivos do estudo. As imagens permitem monitoramento ambiental, análise do uso e ocupação do solo e apoio ao planejamento urbano e territorial. Após a etapa de configuração da imagem de satélite são recolhidas amostras de zonas urbanizadas e não urbanizadas, que são zonas de vegetação baixa e zonas de mata densa.

Conhecendo a resolução espacial da imagem analisada, é possível quantificar o crescimento urbano (LIU et al., 2010) através da expressão (1) e (2).

$$UPI_{i,t\sim t+n} = (ULA_{i\sim t+n} - ULA_{i,t}) * 100/TL_i \quad (1)$$

$$UII_{i,t\sim t+n} = [(ULA_{i\sim t+n} - ULA_{i,t})/n] * 100/TLA_i \quad (2)$$

Onde $UPI_{i,t\sim t+n}$, $UII_{i,t\sim t+n}$, $ULA_{i\sim t+n}$ e $ULA_{i,t}$ são índices de proporção de urbanização e a sua intensidade dentro de uma unidade i de espaço e um período de tempo $t\sim t+n$ e as áreas de uso do solo urbano por anos $t+n$ e t, respectivamente. TLA_i refere-se à área espacial total de unidade i. UPI refere-se a porcentagem total de área urbana ocupada entre os anos 2020 e 2025, enquanto que UII é usado para avaliar o ritmo e intensidade sobre vários tempos diferentes, calibrando a média anual da expansão urbana.

4. RESULTADOS

A análise geográfica observada na figura 2 revelou que, embora a obra do campus estivesse concluída, ele só iniciou suas atividades após a finalização da estrada de acesso, fator que impulsionou a urbanização entre 2021 e 2022. Também foi identificado o início da construção do polo aeronáutico, com crescimento urbano de oeste para leste. Ainda assim, a área ao redor do campus configura-se como um ponto de terminação viária, majoritariamente rural e com oferta limitada de serviços básicos.

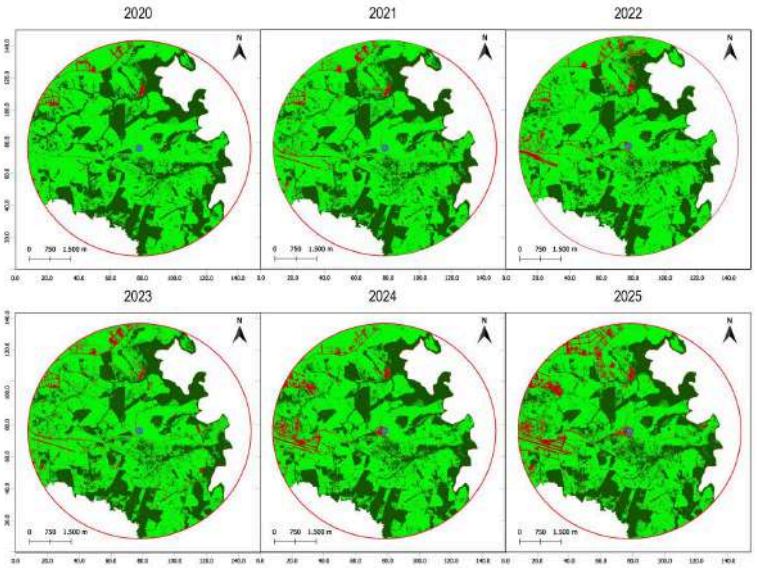


Figura 2: Análise de Uso e Ocupação do Solo na Área de Influência Definida. Fonte: autores.

A análise visual auxilia na detecção de padrões de crescimento urbano na região ao redor do Campus Aparecida de Goiânia. Conforme a Teoria de von Thünena a ocupação e o uso do solo ao redor de uma cidade tendem a se organizar de forma concêntrica, partindo do centro urbano em direção à periferia, baseando-se na rentabilidade das atividades econômicas e na acessibilidade ao mercado central. Christaller (1996) destaca que assentamentos se desenvolvem conforme sua posição na rede hierárquica de acessibilidade, com locais melhor conectados crescendo mais rápido.

O gráfico elaborado quantifica a porcentagem de crescimento dentro do raio de 4km observado. Nota-se que a região tem demonstrado crescimento urbano, mas de apenas 2,96% entre os anos de 2020 e 2025. É importante destacar que a própria construção do Campus e a infraestrutura necessária para o seu funcionamento como as vias de acesso influenciaram este resultado.

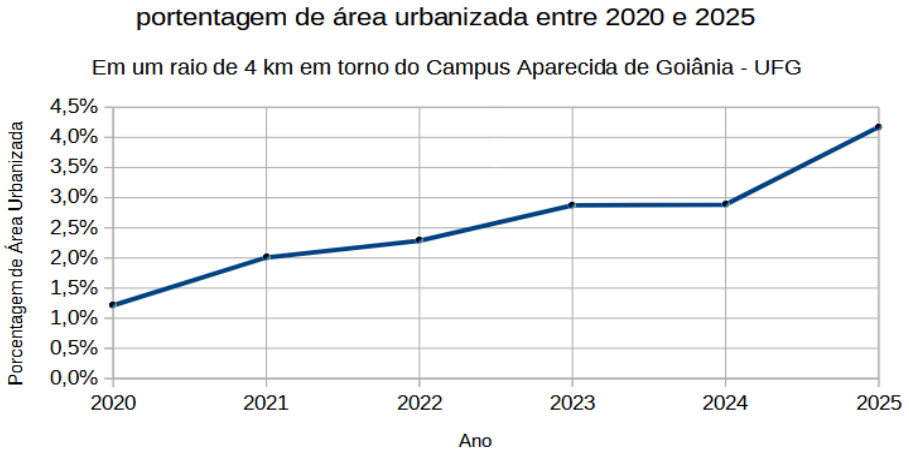


Gráfico 1: Crescimento de Área Urbana Dentro da Região de Influência do Estudo. Fonte: Autores

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da região ao redor do campus da UFG em Aparecida de Goiânia mostra que, embora planejado como Polo Gerador de Viagens, ainda não exerce plenamente esse papel. A região onde a instituição está instalada é um ponto de terminação viária, com predominância rural e baixa disponibilidade de serviços, o que contribui para segregação espacial, desigualdades sociais e limita o desenvolvimento urbano.

Para que o campus possa efetivamente impulsionar o crescimento e a transformação do território, conforme a teoria da localização e dinâmica dos polos geradores, é importante transcender essa condição de isolamento. A dependência da mobilidade em infraestrutura física e a importância de estar inserido em corredores viários estratégicos para um desenvolvimento acelerado reforçam a necessidade de intervenções estruturais.

Nesse contexto, a implementação de insfraestrutura ampliada, que não se limite apenas ao acesso direto ao campus. A proposta de construção de novos prédios públicos na região alinha-se com as estratégias de fortalecimento da presença institucional e da diversificação dos serviços para atrair população e investimentos, estimulando um desenvolvimento socioeconômico local. A implantação do anel viário, previsto no plano de mobilidade de Aparecida, configura-se como solução estratégica para integrar o campus da UFG a outras áreas da cidade, promovendo acessibilidade, circulação e superação dos desafios de mobilidade e invisibilidade que ainda marcam a região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APARECIDA DE GOIÂNIA. Lei Complementar nº 152, de 09 de outubro de 2018. Institui os instrumentos de controle de uso e ocupação do solo do Município de Aparecida de Goiânia. Disponível em: https://www.aparecida.go.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/LEI-COMPLEMENTAR-MUNICIPAL-No-152-2018-USO-DO-SOLO.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

BARBIER, E. The concept of sustainable economic development. Environmental Conservation, v. 14, n. 2, 1987.

BRANDÃO, Carlos Antonio. Teorias, estratégias e políticas regionais e urbanas recentes: anotações para uma agenda do desenvolvimento territorializado. Revista Paranaense de Desenvolvimento, Curitiba, n. 107, p. 57-76, jul./dez. 2004. Disponível em: https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/103/106. Acesso em: 22 abr. 2025.

CARVALHO, Willer Luciano. Metodologia de análise para a localização de escolas em áreas rurais. 2011. xiv, 215 f. Tese (Doutorado em Transportes) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

DUARTE, Lorrane Pereira; RABELO, Marcos Napoleão. A universidade como um polo gerador de viagem e o crescimento das suas áreas de influência. Revista Foco, v. 17, n. 7, p. 1–24, 2024. DOI: https://doi.org/10.54751/revistafoco.v17n7-098.

FORTUNA, Carlos. Urbanidades invisíveis. Tempo Social, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 135–151, abr. 2019. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ts/a/Zr66RNYxnk648hr5xXzwTmz/abstract/?lang=p. Acesso em: 13 jul. 2025.

GOIÂNIA. Lei nº 10.977, de 28 de junho de 2023. Dispõe sobre o instrumento do Estudo de Impacto de Trânsito no Município de Goiânia. Diário Oficial do Município de Goiânia, 28 jun. 2023. Disponível em: https://www.goiania.go.gov.br/html/gabinete_civil/sileg/dados/legis/2023/lo_20230628_000010977.html. Acesso em: 12 maio 2025.

IPE – INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL. Infraestrutura urbana. Brasília, 26 fev. 2025. Atualizado em 06 jun. 2025. Disponível em: https://ipe.df.gov.br/infraestrutura-urbana/. Acesso em: 13 jul. 2025.

LIU, Y.; LI, X.; LI, S.; LIU, R. A GIS-based buffer gradient analysis on spatiotemporal dynamics of urban land use and impact of land-use policies: a case study of Beijing, China. Procedia Computer Science, v. 1, n. 1, p. 2433–2440, 2010.

LLORENS, Francisco Albuquerque. A abordagem do desenvolvimento econômico territorial. In: COSTAMAGNA, P. S.; ROZZI, Sergio Perez (org.). Abordagem, estratégias e informação para o desenvolvimento territorial: as aprendizagens do ConectaDel. 1. ed. ConectaDEL, 2015.

LYNCH, Kevin. The image of the city. Cambridge: The M.I.T. Press, 1960.

SANTOS, Fransuellen Paulino; AMARAL, Pedro; LUZ, Luciana. Expansão do ensino superior e a distribuição regional das universidades brasileiras. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, v. 25, e202317, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202317. Acesso em: 12 maio 2025.

SILVA, C. A. A.; FERNANDES, L. G. R. Análise dos Polos Geradores de Viagem do tipo Instituição de Ensino Superior na cidade de Juiz de Fora. Juiz de Fora: Faculdade Doctum, 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Câmpus Aparecida de Goiânia. Disponível em: https://ufg.br/p/27463-campus-aparecida-de-goiania?atr=es&locale=es. Acesso em: 27 abr. 2025.

VASCONCELOS, Lucas Henrique Campos; ANTONELLO, Ideni Terezinha. Perspectivas teóricas sobre desenvolvimento regional. Sociedade e Território, v. 31, n. 2, p. 263–281, 2019. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/17957. Acesso em: 10 jan. 2023.

VILLAÇA, Flávio. Espaço intraurbano no Brasil. São Paulo: Studio Nobel/FAPESP, 2001.

VILLAÇA, Flávio. São Paulo: segregação urbana e desigualdade. Estudos Avançados, v. 25, n. 71, p. 37–58, 2011.

Eric Rosa Santana (eric.rosa@discente.ufg.br)
Ana Paula Ferreira da Silva (anaferreira2@discente.ufg.br)
Carla Cristina da Silva (carla.carla@discente.ufg.br)
Poliana de Sousa Leite (polianaleite@ufg.br)
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás
Estrada Municipal, Quadra e Área Lote 04 - Bairro Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia - GO, Brasil.

VIVENCIANDO AS CIDADES PARA AS PESSOAS: RELATO DE EXPERIÊNCIA NA 24ª EDIÇÃO DO EVENTO DOMINGO NO CAMPUS

Natália Machado Vieira[1], Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos[1], Mateus Gonçalves da Silva[2], Luiza Maciel Costa da Silva[3], Ana Paula de Oliveira Freitas[4], Dimas Alberto Gazolla Palhares[1]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), [2]Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), [3]Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), [4]Mobilithas

RESUMO
Pensar as cidades a partir das pessoas é fundamental para priorizar o cotidiano, os encontros e o direito à permanência com dignidade e inclusão. A mobilidade urbana e suas diversas dimensões são elementos centrais para garantir acesso equitativo e promover justiça socioespacial. O objetivo desse trabalho é apresentar a prática pedagógica do grupo de voluntariado SOnhANDO A PÉ, realizada durante o evento "Domingo no Campus" (UFMG), com foco na sensibilização sobre caminhabilidade, acessibilidade e mobilidade ativa. A atividade contou com estações interativas e sensoriais, além de uma roda de conversa, com reflexões críticas sobre o uso dos espaços urbanos por diferentes pessoas e realidades. A proposta valorizou especialmente o olhar das infâncias e de grupos vulnerabilizados. Os resultados evidenciaram forte engajamento e aprendizado dos participantes, apontando o potencial das metodologias participativas na formação cidadã e na transformação urbana, mesmo diante de limitações de tempo, materiais e aprofundamento das discussões.

1. CONTEXTO E REFERENCIAL TEÓRICO

A mobilidade urbana configura-se como um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento sustentável das cidades e para a promoção da justiça social, ao influenciar diretamente o acesso da população a direitos básicos como saúde, educação, trabalho e lazer (Silva; Yazbek, 2014). No entanto, o modelo predominante de mobilidade, pautado na priorização do transporte motorizado individual, tem intensificado os desafios ambientais e sociais nas áreas urbanas. Entre os impactos mais visíveis estão o agravamento da poluição atmosférica, o aumento das emissões de gases de efeito estufa, do congestionamento viário, a expansão horizontal com crescimento das distâncias origem-destino e a ocupação desigual do espaço urbano. Além disso, essa lógica de deslocamento tem comprometido a segurança de grupos vulneráveis, como pedestres, ciclistas, crianças, idosos e pessoas com deficiência, dificultando a construção de cidades mais humanas e acessíveis (Vasconcellos, 2013; NACTO, 2021). Frente a esse cenário, torna-se necessário adotar estratégias que aliem planejamento urbano, participação social e processos formativos, capazes de promover uma cultura de mobilidade ativa, segura e inclusiva.

Nesse processo de transformação das formas de deslocamento e do modo como a cidade é percebida e vivida, a educação assume papel central. Para além do ensino formal, práticas educativas de caráter não escolar vêm se mostrando fundamentais ao possibilitarem o diálogo direto com os territórios, o reconhecimento das experiências locais e a mobilização comunitária em torno da construção de cidades mais equitativas. Como afirmam Silva e Moraes (2020) a educação para a mobilidade não deve restringir-se à transmissão de normas de trânsito ou à defesa genérica da sustentabilidade, mas sim fomentar a consciência crítica sobre os modos de ocupação e circulação no espaço urbano, articulando saberes técnicos e cotidianos. Freitas *et al*. (2024) reforçam essa perspectiva ao destacarem que as ações de educação desenvolvidas em ambientes abertos, colaborativos e sensíveis ao contexto concentram potências de mobilização social, especialmente quando conectadas a experiências concretas dos sujeitos em seu entorno urbano.

A vitalidade urbana se constrói a partir de fatores como a diversidade de usos, a presença contínua de pessoas e a capacidade de adaptação dos espaços às necessidades da comunidade (Jacobs, 2000). Um dos aspectos centrais dessa perspectiva é o conceito de mobilidade urbana sustentável, que propõe um conjunto de políticas voltadas à valorização dos modos ativos de deslocamento e ao fortalecimento dos transportes coletivos, amplificando a inclusão social e mitigando os impactos ambientais do crescimento urbano (Ministério das Cidades, 2007). A caminhada e o uso da bicicleta não apenas contribuem para a melhoria da mobilidade, mas também reforçam a saúde, a qualidade de vida e a humanização das cidades (Bantel, 2005). Nesse sentido, os campi universitários funcionam como espaços estratégicos para promover o encontro de pessoas, sobretudo a pé ou de bicicleta, de forma proveitosa, segura, confortável e interessante (Silva, 2025; Speck, 2017). Esses princípios orientam a construção de um Campus Vivo, onde o pedestre é reconhecido como protagonista do espaço público e a paisagem urbana é valorizada a partir da experiência do caminhar (Silva, 2025).

Nesse contexto, o evento extensionista "Domingo no Campus", promovido principalmente no Campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), desde 2015, oferece uma programação gratuita e aberta ao público, com atividades culturais, educativas e de lazer voltadas ao fortalecimento do vínculo entre universidade e sociedade (Rego *et al*., 2021). Ao ocupar o espaço universitário de forma lúdica e participativa, o evento tem se consolidado como uma plataforma para o debate de temas urgentes, como saúde coletiva, meio ambiente e mobilidade urbana, a partir de ações que valorizam o convívio social e a formação cidadã.

A ação educativa descrita neste artigo foi realizada durante a 24ª edição do evento, em outubro de 2024. Intitulada “Campus Vivo: vivenciando as cidades para as pessoas”, a atividade foi idealizada pelo grupo SOnhANDO A PÉ, em parceria com o projeto Escola em Duas Rodas, e propôs uma experiência imersiva voltada à reflexão sobre caminhabilidade, acessibilidade e uso democrático do espaço urbano. O presente artigo objetiva demonstrar como a prática pedagógica se consolida como uma estratégia de promoção do pensamento crítico, estímulo às práticas de cidadania ativa e fortalecimento do diálogo entre universidade e comunidade na construção de uma cidade mais justa, inclusiva e voltada para as pessoas.

Educar para a mobilidade urbana é também transformar os espaços e, consequentemente, as formas de vivência e consciência cidadã. Ao propor ambientes urbanos mais plurais, promove-se a presença das pessoas nas cidades e forma-se uma população capaz de refletir sobre o território que ocupa, reivindicando cidades mais justas, acessíveis e sustentáveis (Gehl, 2010). Essa abordagem está em consonância com as metas das agendas internacionais, especialmente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 11, que orienta ações voltadas à construção de cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (ONU, 2015). No contexto universitário, ao vivenciar o campus como espaço de encontro, cultura e mobilidade ativa, os participantes passam a compreender a cidade não apenas como infraestrutura, mas como uma construção coletiva, atravessada por vínculos, direitos e sentidos de pertencimento (Tuan, 1975; Santos, 2006).

2. METODOLOGIA

O Domingo no Campus é um evento gratuito promovido pela Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) da UFMG, em parceria com as pró-reitorias de Administração (PRA), de Recursos Humanos (PRORH) e de Assuntos Estudantis (Prae), além do Núcleo de Acessibilidade e Inclusão (NAI), da Coordenadoria de Assuntos Comunitários (CAC) e do Centro de Comunicação (Cedecom), com apoio da Fundação de Apoio da Universidade Federal de Minas Gerais (Fundep). Realizado desde 2015, o evento tem como objetivo aproximar a universidade da comunidade, por meio de atividades culturais, educativas e de lazer abertas a públicos de todas as idades. Interrompido durante a pandemia e retomado em 2022, o evento alcançou sua 24ª edição em 13 de outubro de 2024, reunindo 39 atividades que incluíram apresentações musicais e de dança, oficinas de arte e literatura, brincadeiras infantis, feiras de adoção de animais e agroecológica, blocos de carnaval, jogos e outras práticas recreativas (Aquino, 2015; Pró-Reitoria de Extensão, 2022, 2024).

O SOnhANDO A PÉ é um projeto informal e voluntário, formado por profissionais das áreas de arquitetura, urbanismo, engenharia e geografia, que atuam pela promoção de cidades mais acessíveis, inclusivas e seguras. Criado em 2021, o grupo estimula a reflexão sobre mobilidade ativa a partir da escuta das infâncias e da produção de dados qualitativos. Além de atuar de forma independente, também está cadastrado como projeto de extensão na UFMG. Sua primeira atuação estruturada ocorreu por meio do Lab.MaP – Laboratório de Ação Direta pela Mobilidade a Pé, que impulsionou o desenvolvimento de sua identidade, metodologia e materiais educativos, como roteiros, vídeos, podcasts e cartilhas lúdicas (LAB.MAP, 2021). Desde então, o projeto tem se consolidado em escolas, eventos comunitários e instituições, sendo reconhecido com prêmios como o CAU-MG (2022) e o PMU (2024). Ao partir do olhar de crianças e outros grupos negligenciados, reafirma que pensar a cidade de forma inclusiva é também uma prática política e social.

Para a 24ª edição do Domingo no Campus, o grupo SOnhANDO A PÉ, em parceria com o grupo Escola em Duas Rodas, propôs uma dinâmica inédita envolvendo bicicleta, direito à cidade, mobilidade ativa e educação. A atividade foi direcionada a públicos de diferentes faixas etárias e teve como objetivo sensibilizar os participantes para a mobilidade urbana sob múltiplas perspectivas. Estruturada em três estações interativas, abertas simultaneamente das 9h às 10h30, e seguida por uma roda de conversa às 10h45, a proposta utilizou a espacialidade do campus como um laboratório urbano para reflexão crítica sobre a necessidade de (re)criar cidades mais acessíveis, inclusivas e sustentáveis para todos. As estações funcionaram de forma flexível, sem

ordem pré-definida, permitindo que os participantes escolhessem livremente quando e como participar de cada uma delas, favorecendo o protagonismo e a experimentação.

De forma mais específica, a primeira estação abordou a caminhabilidade na perspectiva das crianças, tomando como referência a altura média de uma criança de aproximadamente três anos (95 cm). Para isso, foi utilizado um periscópio invertido, desenvolvido pelos integrantes do SOnhANDO A PÉ com base no modelo difundido pela *Global Designing Cities Initiative* (GDCI, 2022), que permitia aos adultos experimentar a cidade sob o olhar de uma criança. Essa vivência sensorial evidenciou obstáculos e inseguranças normalmente invisíveis para adultos, como barreiras físicas, baixa visibilidade, sinalizações desproporcionais e outros elementos urbanos.

A segunda estação teve como foco a caminhabilidade de pessoas com deficiência visual, de forma a evidenciar como a falta de adequações urbanas impacta a autonomia e a segurança desse grupo. Inicialmente, os participantes receberam explicações sobre a função do piso tátil, suas limitações, bem como instruções sobre a maneira adequada de oferecer auxílio a pessoas cegas ou com baixa visão durante seus deslocamentos. Em seguida, foram vendados e, munidos de bengalas de bambu, percorreram um trajeto guiado, composto por trechos com e sem piso tátil. Essa simulação permitiu aos participantes não apenas vivenciar os obstáculos físicos enfrentados cotidianamente por pessoas com deficiência visual, mas também refletir sobre as barreiras que reforçam a exclusão desse grupo no espaço urbano.

Na terceira estação, a bicicleta foi apresentada como um modo de transporte urbano sustentável, saudável e eficiente. Conduzida pelo grupo Escola em Duas Rodas, a atividade disponibilizou bicicletas para que os participantes percorressem uma rota demarcada, aprendessem técnicas básicas e recebessem instruções para circulação segura em áreas urbanas, abordando também aspectos de convivência entre ciclistas, pedestres e motoristas. Além do aprendizado prático, a estação promoveu reflexões sobre os benefícios da bicicleta para a saúde, a mitigação dos impactos ambientais e a redução do tráfego motorizado.

Ao término das estações, às 10h45, foi realizada uma roda de conversa com todos os participantes. Esse momento foi concebido como um espaço coletivo de síntese e troca de percepções, no qual os participantes foram incentivados a compartilhar suas impressões, destacando aspectos positivos e negativos das experiências vivenciadas nas três estações. A discussão favoreceu a escuta ativa, a interação entre diferentes perspectivas e a construção coletiva de conhecimento, ampliando o entendimento sobre as múltiplas dimensões da mobilidade urbana e os desafios enfrentados por diferentes grupos sociais no uso do espaço público. A roda de conversa possibilitou a identificação de percepções individuais que se transformaram a partir da vivência prática, revelando a potência da metodologia para provocar reflexões críticas e sensibilizar os participantes quanto à responsabilidade coletiva na construção de cidades mais humanas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O público presente no evento Domingo no Campus demonstrou grande interesse em participar das atividades propostas nas três estações. A Estação 1, que propunha uma vivência sob a perspectiva de uma criança com até 95 cm de altura, registrou maior adesão por parte de jovens e adultos, com perfis etários e socioeconômicos diversos. As Estações 2 e 3, por sua vez, foram majoritariamente frequentadas por crianças entre 3 e 12 anos, com diferentes características biométricas e origens sociais. A recepção às dinâmicas foi predominantemente positiva, não havendo registro de críticas por parte dos participantes.

Na estação “Cidade 95”, ficou evidente para os participantes que as estruturas projetadas para o ambiente urbano não consideram a perspectiva do plano altimétrico, nem o campo de visão e a orientação segura para a caminhabilidade das crianças. Como exemplo, destacou-se a impossibilidade de visualizar sinalização vertical de trânsito e de transporte coletivo durante o trajeto. Na estação “Caminhabilidade para Pessoas com Deficiência Visual”, todos os participantes relataram sensação de caminhabilidade segura e orientada ao percorrer o trecho com piso tátil, em contraste com a insegurança e desorientação no trecho sem esse recurso. Observou-se que grande parte dos participantes, incluindo crianças, jovens e adultos, demonstrava desconhecimento em relação aos diferentes tipos de piso tátil, como o direcional e o de alerta, bem como sobre as finalidades desses elementos, apesar de já os terem visto em espaços públicos. Já na estação “Bicicleta e Mobilidade Urbana”, constatou-se grande interesse das crianças pelo uso da bicicleta, embora ainda a associassem predominantemente ao lazer. Quando questionadas sobre a utilização da bicicleta como modo de

transporte nos deslocamentos cotidianos, muitas expressaram desejo de utilizá-la, mas relataram não fazê-lo devido à insegurança percebida por seus responsáveis, que acabam desencorajando o uso desse modo nos deslocamentos diários.

De acordo com os relatos dos participantes, verificou-se que as crianças demonstraram boa capacidade de avaliar aspectos positivos e negativos dos deslocamentos a pé ou de bicicleta, especialmente nos contextos específicos apresentados nas estações. No entanto, essa compreensão ainda não se estende, de forma clara, para uma noção mais ampla de mobilidade urbana em diferentes contextos espaciais da cidade. Quanto aos adultos, observou-se que, embora muitos já apresentem uma pré-compreensão sobre a importância dos temas abordados, principalmente sobre a mobilidade urbana sustentável e a acessibilidade urbana, os deslocamentos ativos ainda não fazem parte de forma significativa de suas rotinas cotidianas.

A diversidade etária e social dos participantes reforçou o caráter democrático da iniciativa, evidenciando seu potencial de alcance e engajamento comunitário. As dinâmicas comprovaram-se eficazes não apenas na sensibilização, mas também na transmissão de conhecimentos sobre acessibilidade e mobilidade urbana. Ademais, a proposta estimulou reflexões sobre o modelo urbano vigente e reafirmou a relevância da extensão universitária, ao articular o saber técnico-científico com as vivências da comunidade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atividade relatada evidenciou o potencial das práticas extensionistas como ferramentas de formação cidadã, sensibilização social e construção coletiva do conhecimento.

Entre as principais limitações identificadas, destaca-se a curta duração destinada à realização das atividades, que comprometeu o aprofundamento das experiências e a participação dos presentes em todas as estações. Adicionalmente, algumas restrições materiais, como o uso de bengalas improvisadas, podem ter reduzido a fidelidade de simulações sensoriais. Outro aspecto diz respeito à mobilização para a roda de conversa, que poderia ter sido maior, ampliando o engajamento dos participantes e enriquecendo a conclusão da atividade.

Com vistas ao aprimoramento da proposta, recomenda-se a ampliação do tempo destinado às estações, a qualificação dos recursos pedagógicos empregados e a atuação de mediadores capacitados para conduzir reflexões mais aprofundadas, especialmente com o público infantil, além de estratégias para estimular maior adesão à roda de conversa final. A adoção de mecanismos de registro das percepções dos participantes, como murais interativos, formulários ou relatos orais, pode contribuir para a sistematização das experiências e subsidiar análises mais abrangentes. Ademais, sugere-se integrar a atividade a outras ações formativas, tanto no âmbito do próprio evento quanto em iniciativas correlatas, garantindo continuidade ao processo de sensibilização e ampliando seu impacto.

As experiências relatadas neste trabalho evidenciam o potencial transformador das práticas extensionistas como instrumentos de formação cidadã, sensibilização social e construção coletiva do conhecimento. A atividade desenvolvida destacou o engajamento dos participantes, a eficácia das metodologias interativas e o valor das vivências sensoriais para fomentar reflexões críticas sobre acessibilidade, caminhabilidade e mobilidade urbana. A valorização dos olhares infantis e de grupos vulnerabilizados reforça a urgência de incorporar essas perspectivas aos processos de planejamento urbano, tornando-os mais inclusivos e responsivos. Além disso, a ação reafirmou a centralidade da universidade como agente de transformação social, ao articular ensino, pesquisa e extensão em diálogo direto e significativo com a comunidade.

A experiência demonstrou que, quando articuladas ao ensino e à pesquisa, ações extensionistas podem gerar impactos significativos e inspirar práticas voltadas a cidades mais inclusivas e centradas nas pessoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aquino, C. (2015) Câmpus da UFMG vira parque no domingo. *Estado de Minas*. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/06/01/interna_gerais,653446/campus-da-ufmg-vira-parque.shtml (acesso em 28/06/2025).

Bantel, G. (2005) Bicicletas, veículos não motorizados (VNM). *Revista dos Transportes Públicos* – ANTP – Ano 27. Disponível em: http://files.antp.org.br/2016/4/6/revista-completa-106.pdf (acesso em 27/06/2025).

Freitas, A. P. de O.; Cardoso, L.; D'ÁVila, R. F. (2024) Ciência cidadã e a (re)descoberta da caminhabilidade sob a ótica infantojuvenil. Cadernos Metrópole, v. 26, n. 60, p. 805–827. DOI: 10.1590/2236-9996.2024-6018.

Gehl, J. (2015) Cidades para Pessoas. Tradução Anita Di Marco. São Paulo: Perspectiva.

Global Designing Cities Initiative. The Reverse Periscope Companion Guide: How Do Kids Experience Streets? [S.l.]: Global Designing Cities Initiative, 2022. Disponível em: https://globaldesigningcities.org/streets-for-kids/. Acesso em: 30 jun. 2025.

Jacobs, J. (2000) Morte e vida de grandes cidades. São Paulo: Martins Fontes.

LAB.MAP - Laboratório de Ação Direta pela Mobilidade a Pé. A jornada do Lab.MaP contada pelas equipes. São Paulo: Como Anda, 2021. Disponível em: https://comoanda.org.br/lab-map/. Acesso em: 26 jun. 2025.

Ministério das Cidades. (2007) Programa Brasileiro de Mobilidade por Bicicleta – Bicicleta Brasil. Caderno de Referência para elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades. Brasília: Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana.

NACTO – National Association of City Transportation Officials. (2021) Desenhando ruas para crianças. Disponível em: https://globaldesigningcities.org/pt/publication/desenhando-ruas-para-criancas/. Acesso em: 26 de junho de 2025.

ONU. (2015) Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Assembleia Geral da ONU. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf (acesso em 27/06/2025).

Pró-Reitoria de Extensão (2022) De volta em 2022, Domingo no Campus recebe atividades para compor sua programação. *PROEX*. Disponível em: https://www.ufmg.br/proex/noticia/de-volta-em-2022-domingo-no-campus-recebe-propostas-de-atividades-para-compor-programacao/).

Pró-Reitoria de Extensão (2024) 24ª edição do Domingo no Campus tem programação diversa dedicada às crianças. *PROEX*. Disponível em: https://www.ufmg.br/proex/noticia/24a-edicao-do-domingo-no-campus-tem-programacao-diversa-dedicada-as-criancas/).

Rego, M. C. M.; Dias, C. S.; Alves, M. D. R. (2021) Extensão universitária como espaço de aprendizagem e cidadania: experiências com ações educativas em saúde e meio ambiente. Revista InterfacEHS, v. 16, n. 1, p. 47–62.

Santos, M. (2006) A Natureza do Espaço: técnica e tempo, razão e emoção. 4ª Ed. 2ª reimpressão. São Paulo. Editora Universidade de São Paulo.

Silva, C. A.; Moraes, A. C. R. (2020) Educação para a mobilidade urbana sustentável: experiências e desafios. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 15, n. 1, p. 204–223. DOI: https://www.revistas.ufg.br/revbea/article/view/61096.

Silva, M. D. R. D. F.; Yazbek, M. C. (2014) Proteção social aos idosos: concepções, diretrizes e reconhecimento de direitos na América Latina e no Brasil. Revista Katálysis, v. 17, p. 102–110.

Silva, M. G. (2025) Campus vivo: o espaço universitário Morro do Cruzeiro (UFOP) como centro de integração urbana e qualidade de vida. 2025. 351 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Speck, J. (2017) Cidade Caminhável. Tradução Anita Di Marco, Anita Natividade. 1 ed. São Paulo, Perspectiva. 278p.

Tuan, Y. (1975) Place: An Experiential Perspective. Geographical Review, 65, pág. 151-165.

Vasconcellos, E. A. (2013) Mobilidade urbana e inclusão social. Revista dos Transportes Públicos, v. 35, n. 1, p. 5–24.

Natália Machado Vieira (nataliamv@ufmg.br)
Ana Luíza Rodrigues da Silva Santos (ana.santos5@aluno.ufop.edu.br)
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes (GEOTRANS/UFMG), Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil
Mateus Gonçalves da Silva (mateus.goncalves@aluno.ufop.edu.br)
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB), Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil
Luiza Maciel Costa da Silva (luizamaciel@cefetmg.br)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Departamento de Transportes, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte , MG, Brasil
Ana Paula de Oliveira Freitas (org@mobilithas.com.br)
Mobilithas, Rua Caetano de Azeredo, 577, Barreiro, Belo Horizonte, MG, Brasil
Dimas Alberto Gazolla Palhares (dagap@cce.ufmg.br)
Universidade Federal de Minas Gerais-Escola de Engenharia, Dept. Engenharia de Transportes e Geotecnia, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Transporte e Inclusão Social

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

IMPACTOS DE BARREIRAS À ACESSIBILIDADE EM ROTAS URBANAS PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Oldair José Pozzobon, Julia Bibiana Zschitschick Souza, Tatiana Cureau Cervo, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
O estudo visa identificar e discutir as principais barreiras à acessibilidade em rotas urbanas para pessoas com deficiência e seus impactos no transporte urbano. Para tanto, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, utilizando a metodologia ProKnow-C, com busca na base de dados *Scopus* entre 2015 e 2024. Selecionaram-se 36 artigos com foco em acessibilidade e infraestrutura urbana. Os resultados indicam que as barreiras afetam de maneira distinta segundo tipos de deficiência: barreiras físicas impactam mais intensamente pessoas com deficiência físico-motora e visual, enquanto deficiências auditiva e cognitiva são prejudicadas por sobrecarga sensorial e ausência de sinalização e estímulos visuais. Observa-se uma evolução temática das tecnologias assistivas para abordagens urbanísticas mais integradas. As evidências indicam a necessidade de soluções multissensoriais e específicas, capazes de garantir mobilidade segura e equitativa, e contribuem para orientar políticas públicas e intervenções que promovam ambientes urbanos inclusivos e acessíveis e planejar pesquisas futuras sobre o tema.

1. JUSTIFICATIVA E OBJETIVO

O transporte nas cidades é elemento indispensável para a inclusão social, viabilizando o acesso da população a serviços, oportunidades e o exercício pleno da cidadania. No entanto, para milhões de pessoas com deficiência (PcD), o ambiente urbano frequentemente impõe obstáculos que restringem a mobilidade e comprometem sua autonomia. A concepção de transporte inclusivo integra o princípio da equidade no acesso ao espaço urbano e aos serviços essenciais, colocando em evidência os desafios enfrentados por PcDs no uso cotidiano das infraestruturas de mobilidade. Nesse contexto a acessibilidade não se limita à presença de adaptações pontuais, mas exige uma abordagem sistêmica voltada à eliminação de barreiras nos transportes e ambientes construídos (Soares Müller *et al.*, 2024).

Estudos recentes têm demonstrado que a ausência de acessibilidade plena impacta negativamente diversos aspectos da vida das PcDs, desde o acesso ao trabalho e à educação até a participação social e serviços de saúde. Além disso, a literatura evidencia que as barreiras enfrentadas por esse público variam conforme o tipo de deficiência, exigindo soluções diferenciadas e integradas ao planejamento urbano (Gharebaghi *et al.*, 2017; Delboni Lomba e Godoy da Silva, 2023). Dessa forma, compreender as especificidades desses obstáculos é essencial para a construção de ambientes inclusivos.

Apesar de alguns avanços normativos e tecnológicos, persistem inúmeras barreiras na infraestrutura de transporte, que impõem limitações significativas à mobilidade desse público. A identificação sistemática dessas barreiras, bem como sua associação com os diferentes tipos de deficiência, é fundamental para orientar políticas públicas, projetos de infraestrutura e o desenvolvimento de tecnologias assistivas eficazes. Neste sentido, justifica-se a realização de revisões aprofundadas da literatura, a fim de reunir, analisar e categorizar evidências científicas sobre os principais obstáculos enfrentados por PcDs no ambiente urbano, de acordo com suas limitações específicas. Além disso, a RSL permite identificar soluções e estratégias que vêm sendo aplicadas para promover a acessibilidade, contribuindo para orientar intervenções mais eficazes e fundamentadas (Lima e Santiago, 2021).

Assim, este estudo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados de uma revisão sistemática da literatura (RSL) com foco na identificação e categorização das barreiras da infraestrutura de mobilidade à acessibilidade das PcDs em rotas urbanas. A partir das barreiras mapeadas, busca-se analisar quais tipos de deficiência são mais impactados por cada uma delas e compreender os efeitos que esses obstáculos geram na locomoção e na autonomia das PcDs.

2. METODOLOGIA

A metodologia ProKnow-C foi empregada para realização da RSL, com etapas sequenciais, conforme a Figura 1, baseadas em critérios objetivos de relevância científica, alinhamento temático e reconhecimento acadêmico (De Carvalho *et al*., 2020).

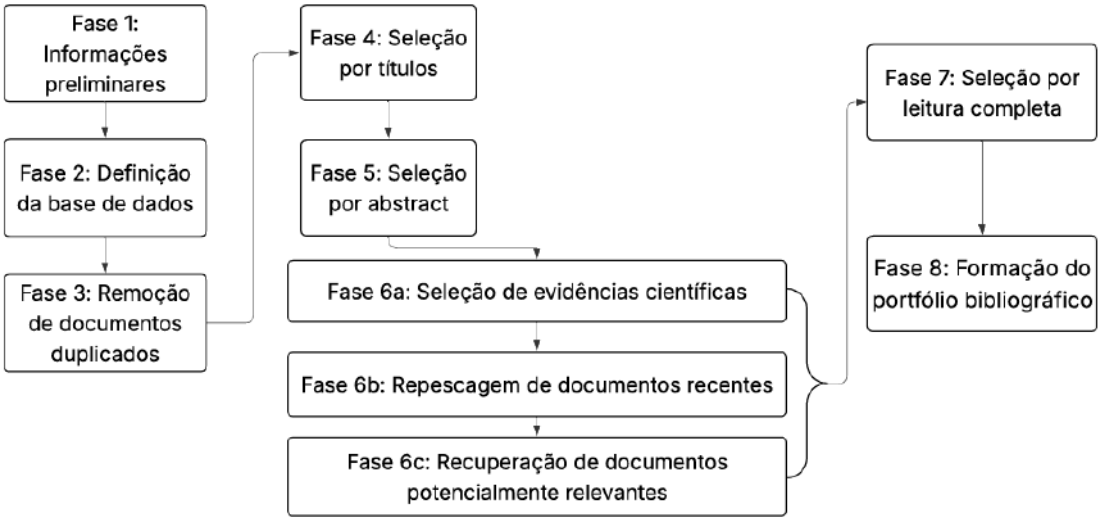


Figura 1: Fluxograma das fases da metodologia ProKnow-C

A busca foi realizada na base de artigos científicos *Scopus*, com documentos publicados no período 2015 a 2024, limitando-se às áreas de *Engineering* e *Social Sciences*. Utilizou-se a combinação de palavras-chave "(*disability* OR *impairment*) AND (*accessibility* OR *barrier*) AND (*route* OR *path* OR *pathway*)" (em português "deficiência", "limitação", "acessibilidade", "barreira", "rota", "caminho" e "trajeto", respectivamente). Os termos foram escolhidos para contemplar diferentes deficiências, aspectos relacionados à acessibilidade e barreiras, além de estudos voltados à definição de rotas, aplicando operadores booleanos para assegurar uma busca ampla e relevante. O inglês foi adotado por constituir o idioma predominante nas publicações indexadas na base *Scopus*, assegurando abrangência, representatividade internacional e compatibilidade com métodos de análise bibliométrica. Posteriormente, foi utilizado o software VosViewer para análise dos principais dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado da aplicação da metodologia ProKnow-C, o portfólio final constituiu-se de 36 documentos, todos com forte aderência ao tema de rotas acessíveis para PcDs. A Figura 2 evidencia os principais eixos temáticos e estruturas semânticas dos artigos selecionados, a partir da análise de co-ocorrência de palavras chave. A análise destaca a centralidade do termo "*accessibility*" ("acessibilidade"), conectado a conceitos como "*disability*" ("deficiência"), "*urban planning*" ("planejamento urbano"), "*assistive technology*" ("tecnologia assistiva") e "*barriers*" ("barreiras"). Esses termos orbitam dimensões tecnológicas, sociais e urbanísticas, refletindo a diversidade do campo. O mapeamento revela sua natureza interdisciplinar e a crescente complexidade das discussões contemporâneas sobre rotas acessíveis e mobilidade urbana inclusiva.

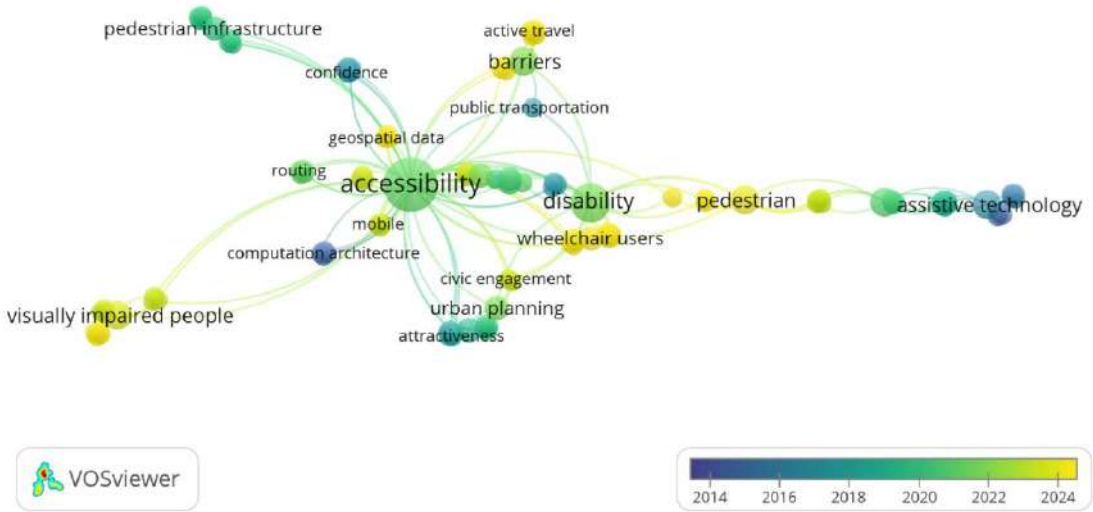


Figura 2: Mapa de co-ocorrência das palavras-chave dos artigos selecionados na RSL

A análise da coloração dos nós na Figura 2, que varia do azul (anos anteriores) ao amarelo (pesquisas mais recentes), permite identificar a evolução cronológica das discussões dos artigos selecionados. Os termos mais antigos, como "*assistive technology*" ("tecnologias assistivas"), "*computation architecture*" ("arquitetura computacional") e "*mobile*" ("celular"), revelam um foco inicial em soluções tecnológicas, com ênfase na criação de dispositivos e aplicações computacionais voltadas para a mobilidade de pessoas com deficiência (Gharebaghi *et al.*, 2017). No entanto, observa-se um deslocamento temático ao longo do tempo, com um aumento na incidência de termos como "*urban planning*" ("planejamento urbano"), "*pedestrian infrastructure*" ("infraestrutura para pedestres"), "*barriers*" ("barreiras") e "*public transportation*" ("transporte público"), indicando uma mudança para abordagens mais estruturais e sistêmicas, relacionadas ao ambiente construído e modos de transporte (Achillas *et al*., 2023).

A Figura 3 apresenta de forma sistematizada a relação entre diferentes tipos de deficiência e as principais barreiras identificadas na RSL. Observa-se que cada grupo enfrenta barreiras específicas no ambiente construído, revelando a necessidade de abordagens diferenciadas no planejamento urbano. Os resultados indicam que as barreiras impactam de forma mais intensa pessoas com deficiência físico-motora e visual, pois essas deficiências exigem uma interação constante e segura com o ambiente físico (Bozovic *et al.*, 2024).

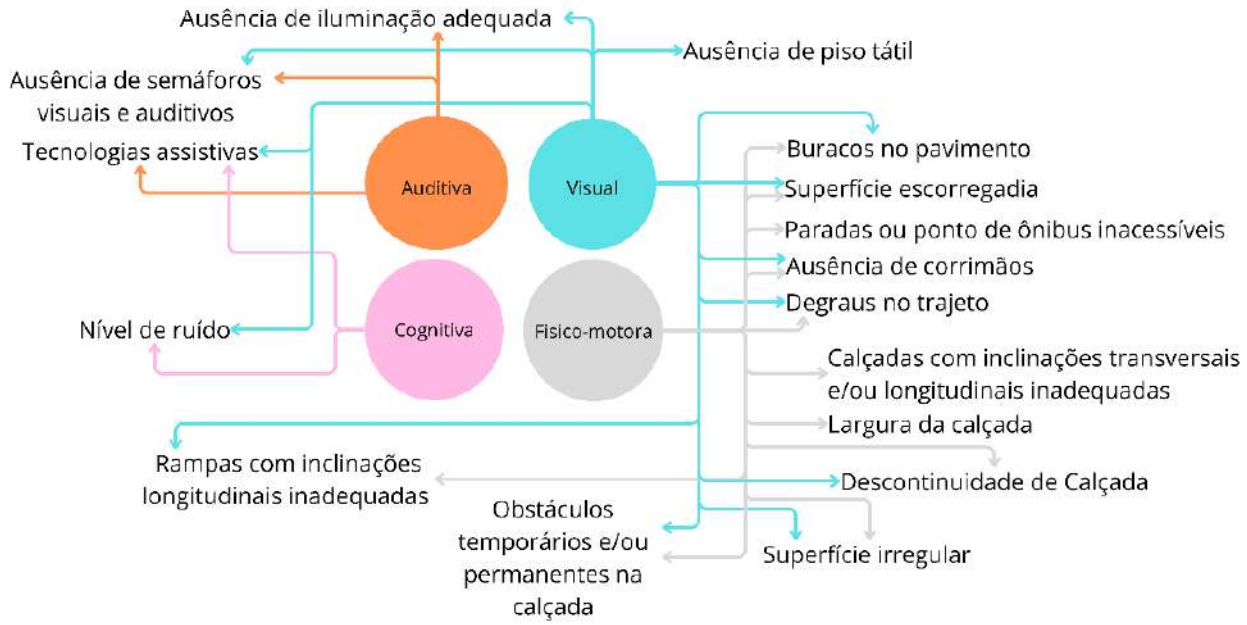


Figura 3: Deficiências e barreiras de acessibilidade em rotas urbanas identificadas na RSL

Para pessoas com deficiência físico-motora, a presença de barreiras urbanas como rampas com inclinações inadequadas, escadas sem alternativas acessíveis, pisos escorregadios, buracos no pavimento, superfícies irregulares, degraus no trajeto, ausência de corrimãos e paradas de ônibus inacessíveis, compromete diretamente a acessibilidade e a segurança, dificultando a locomoção desse público (Gharebaghi *et al.*, 2017). Além disso, a descontinuidade de calçadas e a presença de obstáculos temporários ou permanentes, como mobiliário urbano mal posicionado, impõem desvios forçados e inseguros. A largura insuficiente das calçadas, assim como a inadequação das inclinações longitudinais e transversais, agrava ainda mais o cenário, restringindo à mobilidade. Esses elementos reduzem a autonomia, dificultam o acesso à serviços e a participação em atividades cotidianas, promovendo exclusão social e representando uma violação ao direito fundamental de ir e vir, além de transgredir os princípios de equidade (Soares Müller *et al.*, 2024).

No caso de indivíduos com deficiência visual, a ausência de elementos de orientação e segurança, como pisos táteis, guias de balizamento, corrimãos, sinalização sonora e níveis adequados de iluminação, compromete a previsibilidade e a segurança do trajeto, aumentando o risco de quedas e episódios de desorientação (Adi *et al.*, 2024; Delboni Lomba e Godoy da Silva, 2023). Ademais, elevados níveis de ruído urbano podem interferir na eficácia de tecnologias assistivas auditivas, enquanto a total ausência de estímulos sonoros, como os semáforos adaptados, pode dificultar a orientação espacial. Degraus, desníveis e objetos da infraestrutura que

não estejam devidamente sinalizados intensificam as dificuldades de movimentação, especialmente em trajetos desconhecidos ou com obstáculos inesperados. Além disso, obstáculos aéreos, como placas, galhos ou estruturas suspensas, que não podem ser detectados pela bengala longa representam potenciais riscos de acidentes e lesões. Já a iluminação insuficiente agrava as barreiras enfrentadas por pessoas com baixa visão, prejudicando sua autonomia e capacidade de navegação segura no espaço urbano (Franco *et al.*, 2023).

Por outro lado, pessoas com deficiência auditiva são afetadas pela falta de semáforos visuais, tecnologias assistivas específicas e iluminação adequada, essenciais para a comunicação visual e a navegação segura, visto que dependem da leitura labial e de expressões faciais para interpretar o ambiente (Adi *et al.*, 2024; Isazade, 2023). Já indivíduos com deficiência cognitiva enfrentam dificuldades causadas pela sobrecarga sensorial, ruídos altos, ausência de tecnologias assistivas e sinalização clara. Igualmente, vias com excesso de bifurcações podem confundir, provocar desorientação e estresse, comprometendo sua autonomia. No entanto, barreiras físicas são menos impactantes para esses dois grupos (Franco *et al.*, 2023).

Portanto, a análise integrada dos dados da RSL revela que o impacto das barreiras urbanas varia de forma significativa conforme o tipo de deficiência, destacando a importância de adotar soluções multissensoriais, específicas e universalmente projetadas. Além disso, fica evidente a necessidade do aprofundamento de mais estudos e adequações nas infraestruturas visando garantir uma mobilidade urbana segura, autônoma e equitativa para todas as pessoas independente de suas limitações.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo identificar e discutir, por meio de uma revisão sistemática de literatura, as principais barreiras urbanas enfrentadas por PcDs no uso das infraestruturas de transporte urbano. Utilizando a metodologia ProKnow-C, foram selecionados 36 documentos de alta relevância científica, na base *Scopus*, abrangendo as áreas de Engenharia e Ciências Sociais nos últimos 10 anos, alinhados a rotas acessíveis.

A análise revelou que os estudos têm evoluído desde a criação de dispositivos e aplicações computacionais para focar na relação entre o ambiente construído e as características dos transportes com os PcDs. Além disso, foi percebido que as barreiras físicas impactam de forma mais intensa pessoas com deficiência físico-motora e visual, que dependem diretamente de um ambiente físico seguro e acessível. Por outro lado, pessoas com deficiência auditiva e cognitiva enfrentam desafios ligados à ausência de recursos visuais e sinalização clara e à sobrecarga sensorial, sendo menos impactadas por barreiras físicas.

Diante desses achados, destaca-se a urgência de soluções específicas e universalmente projetadas, capazes de contemplar as distintas necessidades de cada tipo de deficiência. Dessa forma, será possível subsidiar o desenvolvimento de estratégias mais sensíveis às realidades locais e voltadas à superação das barreiras identificadas. Além disso, ressalta-se a importância da formulação e implementação de políticas públicas intersetoriais, fundamentadas em abordagens multidisciplinares, que promovam a transformação do ambiente construído em espaços efetivamente inclusivos, seguros e acessíveis para toda a população.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados em diferentes contextos urbanos, com ênfase na escuta e participação das PcDs, sobretudo em regiões menos desenvolvidas, considerando suas diversas necessidades. Para as deficiências auditiva e cognitiva, recomenda-se investigar barreiras relacionadas à comunicação, previsibilidade do ambiente e clareza das informações, enquanto para as deficiências físico-motora e visual, sugere-se ampliar a análise das barreiras físicas e avaliar soluções multissensoriais e tecnologias assistivas, visando garantir mobilidade segura e autônoma.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processos 305384/2025-2 e 138253/2025-0) e da CAPES (Processo 88887.002592/2024-00).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achillas, C.; A. Garefis; D. Aidonis; D. Vlachos e C. A. Kontovas (2023) Auditing accessibility of pavements and points of interest in urban areas: The ‘Seek & Go’ tool. *Signals*, 4(3), 604–616.

Adi, H. P.; R. Heikoop e S. I. Wahyudi (2024) Enhancing inclusivity: designing disability friendly pedestrian pathways. *International Journal of Safety and Security Engineering*, v. 14, n. 3, p. 691–699.

Bozovic, T.; M. Zuidgeest; A. Currie e S. Delbosc (2024) How street quality influences the walking experience: an inquiry into the perceptions of adults with diverse ages and disabilities. *Journal of Urbanism*, v. 17, n. 1, p. 111–136.

De Carvalho, G. D. G.; C. C. Sokulski; W. V. da Silva; H. G. de Carvalho; R. V. de Moura; A. C. de Francisco e C. P. da Veiga (2020) Bibliometria e revisões sistemáticas: uma comparação entre o ProKnow-C e o Methodi Ordinatio. *Journal of Informetrics*, v. 14, n. 3.

Delboni Lomba, L. F. e J. Godoy da Silva (2023) Informed search algorithm for route optimization for visually impaired people: possibility of intelligent assistive technology. *Journal of Location Based Services*, v. 17, n. 2, p. 79–94.

Franco, M.; M. Biagi; G. Manes e M. Fantacci (2023) Accessible wayfinding for the visually impaired through sustainable smartphone-based sensing. In Anais do IEEE CCNC – 20th Consumer Communications & Networking Conference (Workshops Proceedings), pp. 1-6. Las Vegas, NV, USA.

Gharebaghi, A.; M. Esmailzadeh e A. A. Mostafavi (2017) A confidence-based approach for the assessment of accessibility of pedestrian network for manual wheelchair users. In: Peterson, M. (eds) Advances in Cartography and GIScience. ICACI 2017. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham.

Isazade, A. (2023) Advancement in navigation technologies and their potential for the visually impaired: a comprehensive review. *Spatial Information Research*, 31, 547–558.

Lima, M. R. V. e Z. M. P. Santiago (2022) Acessibilidade e mobilidade urbana como condição do direito de ir e vir das pessoas com deficiência: uma revisão sistemática da literatura. In: IX Encontro Nacional de Ergonomia do Ambiente Construído e X Seminário Brasileiro de Acessibilidade Integral, Blucher Proceedings, v. 10, 1135-1152.

Soares Müller, A. P.; V. Goulart Dorneles e A. Ruiz-Padillo (2024) Fuzzy geostatistical evaluation of micro-scale attributes of sidewalk accessibility: A Brazilian case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 126, 104018.

Oldair José Pozzobon (oldair.pozzobon@acad.ufsm.br)
Julia Bibiana Zschitschick Souza (julia.zschitschick@acad.ufsm.br)
Tatiana Cureau Cervo (cervo.tatiana@ufsm.br)
Alejandro Ruiz Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

Transporte e Meio Ambiente

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: INVESTIGAÇÃO DA SENSIBILIDADE CONSIDERANDO DIFERENTES PORCENTAGENS DE ÁREA TRINCADA

Marina Donato [1, 3], Bruno Guida Gouveia [2, 3], Marcelino Aurélio Vieira da Silva [3], Filipe Almeida Corrêa do Nascimento [3, 4]

[1]Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ – DTECH, [2]Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ – DCCT, [3]Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ – COPPE/PET, [4]Instituto Militar de Engenharia – IME

RESUMO

A avaliação de sensibilidade na Análise de Ciclo de Vida (ACV) permite identificar os parâmetros mais sensíveis, o que auxilia futuras pesquisas e decisões mais precisas. O objetivo deste trabalho é avaliar a sensibilidade da ACV em relação aos impactos ambientais, a partir da influência da área trincada (AT) nos revestimentos asfálticos como critério de dimensionamento. Assim, os cenários analisados foram elaborados considerando variações na composição da camada de subleito. Nesse contexto, o escopo foi delimitado as fases de extração de insumos, fabricação, usinagem e construção. Ainda, foram selecionados indicadores de alterações climáticas em equivalentes de CO_2. Conclui-se que as características dos solos influenciam significativamente na demanda de recursos e nas emissões geradas. Observou-se a redução das emissões com o aumento da porcentagem de AT, embora essa relação não seja linear em todas as categorias analisadas, evidenciando a importância de avaliar cada uma isoladamente ao se estimar o impacto ambiental.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As oportunidades de uso de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no cenário brasileiro estão atreladas ao comércio exterior. As empresas brasileiras que competem no mercado internacional exercem grande influência e pressão no setor público, bem como em empresas rivais do setor privado, pois a ACV pode agregar valor às marcas dos produtos industrializados e, assim, trazer boa reputação para as diversas marcas comerciais. Com relação às empresas nacionais, especificamente do setor primário, a ACV é adotada somente como ferramenta em processos de decisão interna, cujo intuito é, essencialmente, obter maior eficiência produtiva. Diante deste contexto, tem-se tornado cada vez mais recorrente avaliar o desempenho ambiental por meio da ferramenta ACV (IPEA, 2015).

Segundo Gouveia *et al*. (2023), a ACV é uma ferramenta complexa que envolve múltiplas variáveis e pressupostos, o que pode gerar incertezas e variações nos resultados. Por esse motivo, a norma ISO 14040 (ISO, 2009) recomenda a realização de análises de sensibilidade, com o intuito de estimar os efeitos das escolhas feitas relativas ao método, ou seja, à Análise de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), e das variações nos dados sobre os resultados obtidos (Azam *et al*., 2024; Zhang *et al*., 2025). Neste estudo, objetivou-se avaliar a sensibilidade da ACV aos impactos ambientais associados à variação da porcentagem de área trincada (AT) em revestimentos asfálticos como critério de dimensionamento. Os cenários foram elaborados considerando diferentes tipos de solo na composição da camada de subleito. A análise foi delimitada às fases de extração de insumos, fabricação de materiais, usinagem e construção, contemplando, exclusivamente, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) como indicador de impacto ambiental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção tem como objetivo apresentar o procedimento metodológico adotado para a implementação da ACV em pavimentos flexíveis rodoviários nacionais, com o intuito de avaliar a sensibilidade decorrente da variação da área trincada. O método proposto foi estruturado em seis etapas, conforme exposto em Donato (2023): (1) Determinação dos materiais das camadas; (2) Caracterização física e mecânica dos materiais; (3) Dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento; (4) Determinação do Inventário de Análise de Ciclo de Vida (IACV); (5) Determinação da Análise de Impacto de Ciclo de Vida (AICV); e (6) Análise de sensibilidade.

2.1. Exposição dos dados

Neste trabalho, foram desenvolvidos quinze cenários de análise com o propósito de avaliar a sensibilidade da ACV em pavimentos asfálticos, em função da variação da área trincada e do tipo de solo empregado na camada de subleito. Os cenários foram organizados a partir da combinação de três materiais distintos de subleito com cinco diferentes percentuais de área trincada (AT): 20%, 25%, 30%, 35% e 40% (Tabela 1). Para cada combinação, foi determinada a espessura da camada asfáltica necessária para atingir o nível de deterioração requerido.

A estrutura das demais camadas do pavimento foi mantida constante em todos os cenários. Os materiais utilizados nas camadas de revestimento, base e sub-base foram obtidos a partir do banco de dados do *software*

MeDiNa. Além disso, as espessuras da base e da sub-base foram fixadas em 15 cm e 30 cm, respectivamente, assegurando uniformidade nas condições estruturais. Os materiais de subleito analisados consistem em solos naturais coletados em diferentes pontos da rodovia BR-040, na cidade do Rio de Janeiro (RJ). O Solo 1 foi extraído no quilômetro 16, o Solo 2 no quilômetro 20 e o Solo 3 no quilômetro 22. Esses materiais foram caracterizados por meio de ensaios laboratoriais, conforme apresentado na Tabela 2, e utilizados nas simulações considerando sua respectiva umidade ótima.

Tabela 1: Definição de cenários de pavimentos com diferentes percentuais de área trincada e tipos de subleito.

AT (%)	Solo 1 (M1)	Solo 2 (M2)	Solo 3 (M3)
20	Cenário 1	Cenário 6	Cenário 11
25	Cenário 2	Cenário 7	Cenário 12
30	Cenário 3	Cenário 8	Cenário 13
35	Cenário 4	Cenário 9	Cenário 14
40	Cenário 5	Cenário 10	Cenário 15

Tabela 2: Resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais da camada de subleito.

Solo	Classificação MCT			Laboratório		Caracterização mecânica - MR						
	MCT	e'	c'	Wot[4]	MEAS[5] (g/cm³)	k_1[6] (MPa)	k_2[6] (MPa)	k_3[6] (MPa)	R^2	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	M_R (MPa)
Solo 1	LA' [1]	1,1136	1,3290	21,15	1,713	122,439	0,160	-0,240	0,76	0,072	0,071	164,49
Solo 2	NG' [2]	1,2785	1,8030	22,73	1,670	153,970	0,323	-0,268	0,60	0,053	0,051	144,95
Solo 3	LG' [3]	1,1375	1,8030	21,08	1,711	80,888	0,232	-0,354	0,64	0,053	0,051	136,43

Nota: [1] LA': Solo arenoso laterítico; [2] NG': Solo argiloso não laterítico; [3] LG': Solo argiloso laterítico; [4] Wot: umidade ótima; [5] MEAS: massa específica aparente seca; [6] k_1, k_2, k_3: parâmetros do M_R.

Para este estudo, adotou-se uma configuração hipotética de pista simples com 3,60 m de largura e sem acostamento, conforme a Classe I – B do Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais do DNER (1999), idealizada para fins acadêmicos. O tráfego foi baseado em uma via do Sistema Arterial Primário, com confiabilidade de 85% e vida útil de 10 anos, de acordo com os critérios mínimos de desempenho definidos pelo DNIT (2006; 2020) e utilizados pelo *software* MeDiNa. Considerou-se um Volume Médio Diário (VMD) de 1.500 veículos no primeiro ano, sem crescimento ao longo do tempo (taxa de 0%), e adotou-se um fator de veículo (FV) igual a 1, o que permitiu ao programa calcular automaticamente o Número Equivalente de Passagens do Eixo Padrão Rodoviário ($N = 5{,}48 \times 10^6$). De posse das espessuras das camadas, foram utilizados os dados do Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO (2025) do Estado do Rio de Janeiro, referente ao mês de janeiro de 2025. Adotou-se essa abordagem com intuito e fornecer suporte na elaboração do inventário da ACV. A consulta na Tabela 3 do SICRO (2025) se dá pela análise dos materiais utilizados no projeto e o levantamento do inventário. Os cálculos do quantitativo de materiais foram realizados para 1 km de via.

Tabela 3: Materiais e serviços para a construção do pavimento.

Camada	Descrição do serviço	SICRO
Revestimento	Concreto asfáltico - faixa C - areia e brita comerciais - CAP 50/70.	4011463
Imprimação	Imprimação com asfalto diluído	4011351
Base	Base estabilizada granulometricamente com mistura solo brita (70% - 30%) na pista com material de jazida e brita comercial.	4011256
Sub-base	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida.	4011227
Subleito	Subleito com material local (adaptado)	4011211

Fonte: Adaptado de SICRO (2025).

2.2. Levantamento do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A definição da Unidade Funcional (UF) desempenha um papel fundamental nesse processo, assegurando a consistência na condução da ACV e a interpretação adequada dos resultados. Neste estudo, a Unidade Funcional adotada é "km de via construído". Além disso, cabe destacar que as atividades do escopo da ACV foram limitadas pelas fases de extração e produção de insumos, fabricação dos materiais, usinagem, e transporte dos insumos necessários para as atividades previstas em cada etapa; e por fim, a construção que abrange a operação de equipamentos de engenharia. Com o escopo definido, estimaram-se as quantidades de materiais e calcularam-se os insumos por meio da ferramenta SICRO (2025). Na sequência, realizou-se a

compatibilização dos serviços obtidos com os dados do banco Ecoinvent 3.0, viabilizando a estruturação da ICV.

2.3. Determinação da Análise de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

Os dados relativos às emissões de gases de efeito estufa foram processados com o auxílio do *software* SimaPro 9.4.0.2, por meio do método de avaliação de impacto CML e com o uso do banco de dados Ecoinvent. Nesse contexto, com base nos cenários dos pavimentos analisados sob diferentes condições de área trincada, foram selecionados cinco indicadores representativos das alterações climáticas representada em equivalentes de CO_2. Destacaram-se: as emissões totais de dióxido de carbono (CO_2, em toneladas), as emissões de dióxido de nitrogênio (NO_2, em kg) e de metano (CH_4, em kg). O fator de conversão GWP_{100} foi adotado, dessa forma, foi possível aferir os potenciais impactos atmosféricos associados aos cenários avaliados.

2.4. Análise de sensibilidade

Em um esforço para se demonstrar a sensibilidade que os estudos de ACV, aplicados à pavimentação, podem apresentar, essa pesquisa avaliou: (1) a variação dos critérios de dimensionamento; (2) os distintos materiais para a camada de subleito; e (3) os impactos ambientais gerados por essas infraestruturas. O *software* SimaPro 9.4.0.2 disponibiliza as avaliações dos impactos ambientais de cada insumo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) por meio do indicador CO_2 equivalente (IPCC, 2014). Com base nesses resultados, classifica-se os insumos em categorias, visando a separação dos elementos de maior relevância em termos de impacto ambiental. Essa classificação buscou examinar o nível de emissões de gases de efeito estufa associado a esses insumos, e em relação aos critérios de dimensionamento por meio da variação da área trincada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise da espessura do revestimento asfáltico

Adotaram-se diferentes limites de área trincada (AT) para dimensionar as espessuras dos revestimentos visando atender à demanda de tráfego para um período de 10 anos. Assim, com as espessuras estabelecidas, foi verificado quanto tempo levaria para a superfície do revestimento trincar em 30%, o que foi nomeado de vida útil (VU). Observou-se que menores tolerâncias ao trincamento resultam em maiores espessuras de revestimento, conforme apresentando na Tabela 4.

Tabela 4: Espessura do revestimento e vida útil de cada cenário.

AT (%)	Solo 1 (M1)			Solo 2 (M2)			Solo 3 (M3)		
	Cenários	e (cm)	VU (meses)	Cenários	e (cm)	VU (meses)	Cenários	e (cm)	VU (meses)
20	Cenário 1	12,5	159	Cenário 6	13,0	162	Cenário 11	13,0	162
25	Cenário 2	11,5	139	Cenário 7	12,0	142	Cenário 12	12,0	142
30	Cenário 3	11,0	130	Cenário 8	11,0	120	Cenário 13	11,0	120
35	Cenário 4	10,0	113	Cenário 9	10,5	115	Cenário 14	10,0	108
40	Cenário 5	9,5	105	Cenário 10	9,5	100	Cenário 15	9,0	94

3.2. Análise do Impacto do Ciclo de Cida (AICV)

Observando-se a Tabela 5, os impactos ambientais, ou seja, a emissão dos GEE dos cenários 3, 8 e 13; 4 e 14; 5 e 10; 6 e 11; 7 e 12; os valores são os mesmos, pois os resultados do dimensionamento das espessuras adotadas para as camadas de revestimento são iguais.

Tabela 5: Quantidade de gases de efeito estufa emitida (contínua).

%AT	Parâmetros	Solo 1 (M1)	Solo 2 (M2)	Solo 3 (M3)
20	**Cenário**	**Cenário 1**	**Cenário 6**	**Cenário 11**
	Espessura do revestimento	**12,5**	**13**	**13**
	CO_2 (t)	144,42	148,91	148,91
	CH_4 (kg)	261,34	270,39	270,39
	N_2O (kg)	6,84	7,02	7,02
	$CO_{2\ Eq.}$ (t)	154,19	158,80	158,80
25	**Cenário**	**Cenário 2**	**Cenário 7**	**Cenário 12**
	Espessura do revestimento	**11,5**	**12**	**12**
	CO_2 (t)	136,87	140,47	140,47
	CH_4 (kg)	243,58	252,30	252,30
	N_2O (kg)	6,50	6,66	6,66
	$CO_{2\ Eq.}$ (t)	145,81	149,73	149,73

Tabela 5: Quantidade de gases de efeito estufa emitida (continuação).

%AT	Parâmetros	Solo 1 (M1)	Solo 2 (M2)	Solo 3 (M3)
30	**Cenário**	**Cenário 3**	**Cenário 8**	**Cenário 13**
	Espessura do revestimento	**11**	**11**	**11**
	CO_2 (t)	132,02	132,02	132,02
	CH_4 (kg)	234,23	234,23	234,23
	N_2O (kg)	6,29	6,29	6,29
	$CO_{2\ Eq.}$ (t)	140,66	140,66	140,66
35	**Cenário**	**Cenário 4**	**Cenário 9**	**Cenário 14**
	Espessura do revestimento	**10**	**10,5**	**10**
	CO_2 (t)	123,59	127,81	123,59
	CH_4 (kg)	216,14	225,18	216,14
	N_2O (kg)	5,93	6,11	5,93
	$CO_{2\ Eq.}$ (t)	131,60	136,05	131,60
40	**Cenário**	**Cenário 5**	**Cenário 10**	**Cenário 15**
	Espessura do revestimento	**9,5**	**9,5**	**9**
	CO_2 (t)	118,17	118,17	115,14
	CH_4 (kg)	206,48	206,48	198,06
	N_2O (kg)	5,70	5,70	5,56
	$CO_{2\ Eq.}$ (t)	125,84	125,84	122,53

Em relação à energia requerida, observa-se que os maiores e menores consumos foram iguais a todos os cenários. Desse modo, nota-se que as maiores quantidades de energia requerida para a construção de um quilômetro do pavimento rodoviário são para os cenários para uma AT de 20%. Por outro lado, os cenários que menos demandam energia são para uma AT de 40%. Ainda na Tabela 5, percebe-se que as pegadas ambientais de CO_2, N_2O e CH_4, geradas por cada cenário, decrescem à medida que se diminui a tolerância quanto AT. Sendo assim, constata-se o mesmo comportamento para o CO_2 equivalente.

3.3. Análise de sensibilidade

A Figura 1 apresenta a decomposição das emissões de GEE em diferentes categorias (combustível, energia, equipamentos, escavação, materiais e transporte). Em praticamente todas as categorias, observou-se que os cenários com 20% de AT (Cenários 1, 6 e 11) registraram as maiores emissões, ao passo que os com 40% de AT (Cenários 5, 10 e 15) apresentaram os menores valores. Embora a tendência geral seja de redução das emissões com o aumento da AT, em algumas categorias a relação não foi linear, reforçando a importância de analisar cada parâmetro individualmente.

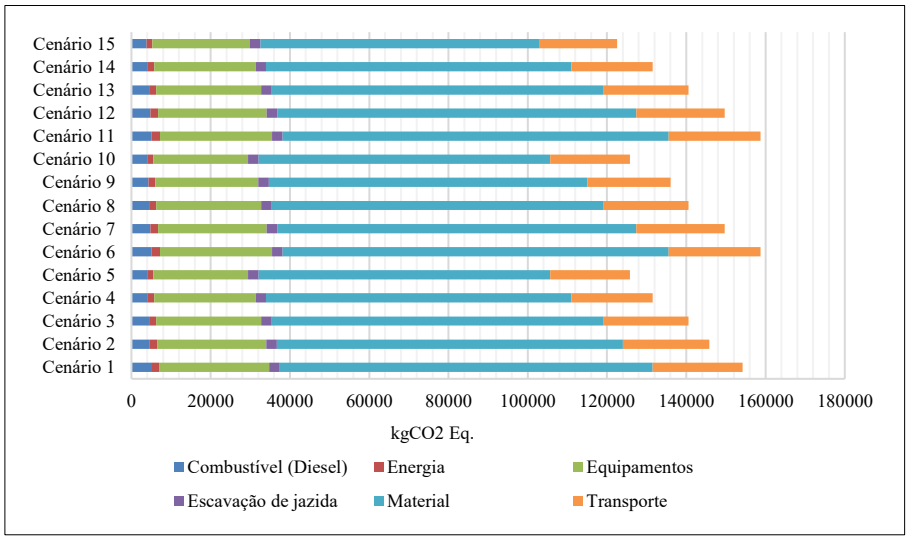


Figura 1: Impacto ambiental em $kgCO_2$ Eq. por categoria.

Em relação ao consumo de combustível, diesel, os Cenários 6, 11 e 1 registram os maiores valores, enquanto os Cenários 15, 10 e 5 apresentam os menores. Tendência semelhante é observada no consumo de energia e no uso de equipamentos, com os mesmos cenários se destacando, respectivamente, pelos maiores e menores consumos. Quanto à escavação de jazida, observa-se uma relativa uniformidade entre os cenários, sugerindo que essa etapa da construção de pavimentos permanece constante independentemente das demais variáveis.

No que se refere ao consumo de materiais, os cenários com maiores valores, 6, 11 e 1, contrastam com aqueles de menores valores, 15, 10 e 5. Ainda, a categoria Transporte também apresenta variações relevantes, com os Cenários 6, 11 e 1 exibindo as maiores emissões de GEE, enquanto os Cenários 15, 10 e 5 registram as menores. A análise dos cenários indica que há uma tendência de diminuição das emissões de GEE à medida que a porcentagem de área trincada aumenta. No entanto, essa tendência não é linear em todas as categorias, mostrando a importância de se considerar cada categoria individualmente ao avaliarmos o impacto ambiental.

Portanto, as características específicas dos solos podem exigir mais ou menos recursos para a construção das vias. Entre todos os cenários, o solo 1 (M1) tende a apresentar menores emissões de combustível, energia e equipamentos em comparação com os outros solos M2 e M3. Além disso, praticamente em todos os cenários com área trincada em 20% (Cenário 1, Cenário 6 e Cenário 11) ocorreu maior impacto ambiental. Por outro lado, praticamente em todos os cenários com área trincada em 40% (Cenário 5, Cenário 10 e Cenário 15) os impactos ambientais foram menores.

4. CONCLUSÃO

Ao avaliar a emissão de $CO_{2\ Eq.}$ por tempo de vida útil por quilômetro (t/km/mês) para a implantação dos pavimentos, observou-se que, em praticamente todos os casos, os cenários com 20% de AT apresentaram maiores impactos ambientais, enquanto os cenários com 40% de AT resultaram em menores emissões. Dessa forma, quanto maior a tolerância ao trincamento, menores foram as emissões associadas, embora essa relação não se mostre linear em todas as categorias analisadas.

A análise de sensibilidade dos materiais revelou que a porcentagem de área trincada no pavimento exerce influência direta sobre a quantidade de recursos necessários para a construção das vias. Assim, confirmou-se que os cenários com 20% de AT (Cenário 1, Cenário 6 e Cenário 11) apresentam maior impacto ambiental, ao passo que aqueles com 40% de AT (Cenário 5, Cenário 10 e Cenário 15) tendem a registrar impactos reduzidos. Por fim, destaca-se que, entre todos os cenários considerados, o solo 1 (M1) demonstrou menor consumo de combustível, energia e equipamentos em comparação com os demais tipos de solo, indicando melhor desempenho ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azam, Abdelhalim *et al*. (2024). Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction. *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, p. e03062.

Donato, M. (2023). *Avaliação das influências do comportamento hidromecânico no subleito por meio da Análise de Ciclo de Vida de pavimentos*. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ.

DNER (1999) *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais*. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. Rio de Janeiro: IPR. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normasemanuais/ manuais/documentos/706_manual_de_pr jeto_geometrico.pdf. Acesso em: 11 de agosto de 2022.

DNIT (2006) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de pavimentação*. 3ª edição - Publicação IPR - 719. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.

DNIT (2020) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico - empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos.* Manual de Utilização do programa MeDiNa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Convênio UFRJ/DNIT.

Gouveia, B. G.; Donato, Marina; da Silva, M. A. V. (2023). Avaliação da sensibilidade na Análise de Ciclo de Vida (ACV) aplicada a diferentes pavimentos asfálticos. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Santos.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland, p. 151.

IPEA (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA). (2015). *O uso da Análise de Ciclo de Vida (ACV) nas políticas públicas: condicionantes e estratégias de implementação da ACV no Brasil*. (Osmar Coelho Filho; Nilo Luiz Saccaro Júnior; Gustavo Luedemann, Org.). Boletim Regional, Urbano e Ambiental. IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada).

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). (2009). ABNT NBR. ISO 14040: 2009. *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: ABNT.

SICRO (SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS). Banco de dados - Rio de Janeiro/RJ - janeiro de 2025. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/sudeste/sudeste. Acesso em: 06 de junho de 2025.

Zhang, Haiwei *et al*. (2025). Life cycle assessment and sensitivity analysis of carbon emissions in full depth reclamation with portland cement and conventional pavement repair. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 1-15.

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE HVO E DA NECESSIDADE DE HIDROGÊNIO VERDE PARA A DESCARBONIZAÇÃO DOS PORTOS

João Vitor Lima Sousa[1], **Felipe Azevedo Rios Silva**[1], **Yaeko Yamashita**[1], **João Gabriel Gonçalves França Vasconcelos**[1], **Artur Rodrigues de Lima**[1]
[1]Universidade de Brasília

Resumo
O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição do óleo diesel comum pelo "diesel verde", o óleo vegetal hidrotratado (HVO) em equipamentos portuários, quantificando o consumo potencial de HVO, a demanda associada de hidrogênio verde (H_2V) para produção e sua competitividade. A metodologia baseou-se na simulação do consumo de um guindaste portuário em dois cenários (2025 e 2050), calculando o consumo de HVO, a demanda de H_2V e os custos comparativos com e sem créditos de carbono. Os resultados indicam que, embora o HVO seja inicialmente mais caro que o diesel comum, a inclusão de créditos de carbono e a otimização do processo produtivo podem torná-lo economicamente mais vantajoso até 2050. O estudo indica o potencial significativo do HVO como agente para a redução de emissões de gases de efeito estufa nas operações portuárias, fortalecendo a agenda de descarbonização do setor marítimo.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A transição energética é um processo de longo prazo, que envolve a substituição progressiva de fontes fósseis por renováveis, promovendo mudanças estruturais nos sistemas de produção, distribuição e consumo de energia (BRASIL,2022). Impulsionado por políticas públicas como a Política Nacional de Transição Energética (PNTE) e o Marco Legal do Hidrogênio Verde, sancionado em 2024, o Brasil destaca-se por possuir uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com mais de 80% da eletricidade proveniente de fontes renováveis (BRASIL, 2023).

No setor portuário, a transição energética assume importante papel ao transformar portos em hubs de descarbonização e centros logísticos para combustíveis de baixa emissão de carbono (WEI, 2023). Projetos pioneiros nos portos de Pecém, Suape e Santos, além de parcerias internacionais como a Green Ports Partnership, demonstram o alinhamento do setor portuário brasileiro às metas globais de redução de emissões e à integração de energias renováveis (PORTOS DO PARANÁ, 2023; BRASIL 2025).

Nesse contexto a descarbonização dos portos marítimos é uma prioridade global, alinhada às metas da Organização Marítima Internacional (IMO) de atingir emissões líquidas zero de gases de efeito estufa (GEE) até 2050 (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 2020). Nesse processo, o uso de combustíveis alternativos, como o "diesel verde", o óleo vegetal hidrotratado (HVO), destaca-se como solução viável e de rápida implementação, pois pode ser utilizado em motores convencionais sem necessidade de adaptações, reduzindo significativamente as emissões de CO_2 equivalente ao longo do ciclo de vida do combustível (TORRES, 2019).

O HVO é um biocombustível produzido a partir do hidrotratamento de óleos vegetais ou gorduras animais, processo no qual a matéria-prima reage com hidrogênio sob altas temperaturas e pressões, resultando em um combustível com propriedades físicas e químicas muito semelhantes ao óleo diesel de origem fóssil (ZEMAN, 2019), mas com significativa redução nas emissões globais de gases de efeito estufa. Para sua produção, é fundamental o uso de gás hidrogênio (H_2), e quando este é obtido a partir da eletrólise da água utilizando fontes de energia elétrica renováveis — como por exemplo solar, eólica, hidráulica, marés, geotérmica e biomassa — sem emissão direta de dióxido de carbono na atmosfera no seu ciclo de produção , trata-se do chamado hidrogênio verde (H_2V) (VELAZQUEZ ABAD, 2020; BRASIL, 2022). Dessa forma, o HVO representa uma das rotas tecnológicas para o uso concreto do hidrogênio verde, integrando-se à cadeia de combustíveis sustentáveis e contribuindo para a descarbonização do setor de transportes, especialmente em aplicações portuárias e marítimas (TORRES, 2019). Os portos marítimos podem se descarbonizar por meio de diversas estratégias integradas, que abrangem navios, equipamentos portuários e os modais de transporte terrestre conectados ao porto.

Além da redução de emissões, a adoção do HVO e do hidrogênio verde nos portos brasileiros pode fortalecer a competitividade internacional, gerar empregos qualificados e posicionar o país como referência em

soluções energéticas limpas para a logística marítima (SILVA; YAMASHITA; SANTOS, 2024). Contudo, desafios como o custo de produção do hidrogênio verde, a necessidade de infraestrutura específica e a comparação de custos frente a combustíveis fósseis permanecem centrais para a tomada de decisão e para a definição de políticas públicas e estratégias empresariais (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

Portanto, um artigo científico com esse enfoque contribui para o debate técnico e estratégico sobre como os portos podem liderar a agenda de descarbonização, avaliando o consumo potencial de HVO, a demanda associada de hidrogênio verde e a competitividade econômica dessas soluções frente ao cenário atual (TORRES, 2019; SILVA *et* al, 2024).

2. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE HVO, DEMANDA DE HIDROGÊNIO VERDE E COMPETITIVIDADE ECONÔMICA

O desenvolvimento da metodologia para avaliação do consumo de HVO, da demanda de hidrogênio verde (H_2V) e da competitividade econômica será divida em três etapas: (i) Quantificação do consumo de HVO; (ii) Cálculo da demanda de H_2V; (iii) Análise de Competitividade Econômica. Vale ressaltar que, os dados obtidos foram posteriormente inseridos na ferramenta *decarbonization system* desenvolvida pela *Nectere*, que permite a partir de dados prévios inseridos pelo usuário, realizar análises comparativas econômicas e ambientais entre o uso de diesel fóssil e HVO, além de quantificar as emissões de dióxido de carbono oriundas da queima desses combustíveis. Assim, o usuário pode selecionar equipamentos e embarcações previamente disponibilizadas na ferramenta ou inserir valores personalizados para realização das análises.

2.1. Quantificação do Consumo de HVO

Para estimar o consumo potencial de HVO nos portos marítimos, considera-se inicialmente o volume de diesel consumido, dado informado pelo usuário, como a fórmula molecular do HVO é semelhante à do diesel, admite-se uma substituição direta (*drop-in-fuel*) entre os dois combustíveis (D'AMBROSIO, 2022). Esse volume é então convertido em massa de HVO por meio da multiplicação pelo valor da densidade do combustível. Assim, esse processo constitui um importante passo para a estimativa das emissões associadas ao uso do HVO nas operações portuárias.

2.1.1. Cálculo das emissões

Para o cálculo das emissões, foi necessário converter o volume de combustível em massa, utilizando as unidades apropriadas, conforme descrito anteriormente. Esse procedimento foi aplicado tanto ao diesel quanto ao HVO. Como já mencionado, a fórmula química do HVO é semelhante à do diesel, diferenciando-se principalmente pelo maior nível de pureza do HVO. Essa característica resulta na redução ou eliminação da emissão de determinados poluentes, como material particulado, óxidos de enxofre (SO_x) e compostos aromáticos, que estão presentes na queima do diesel convencional. A estimativa das emissões de CO_2 foi realizada com base na composição média do diesel, cuja fórmula molecular aproximada é $C_{16}H_{34}$. Considerou-se a reação simplificada de combustão completa:

$$C_{16}H_{34} + 24,5\,O_2 \rightarrow 16\,CO_2 + 17\,H_2O \quad (1)$$

Com base nas massas molares, 226 g de diesel ($C_{16}H_{34}$) geram 704 g de CO_2. Isso corresponde à emissão de aproximadamente 3,16 kg de CO_2 para cada quilograma de diesel consumido. Essa mesma relação foi adotada para o HVO, em virtude da similaridade das composições moleculares e do processo de combustão. Assim, a massa total de CO_2 emitida foi determinada multiplicando-se a massa de combustível consumido pelo fator de emissão de CO_2, obtendo-se, dessa forma, a estimativa final das emissões associadas ao uso de diesel e HVO nas operações portuárias.

2.2. Cálculo da Demanda de Hidrogênio Verde (H_2V)

A estimativa da quantidade de hidrogênio necessária para a produção de HVO foi realizada com base no balanceamento da reação química envolvida no processo de hidrodesoxigenação (HDO). Considerou-se a reação estequiometricamente balanceada na forma:

$$C_{18}H_{34}O_2 + 3\,H_2 \rightarrow C_{18}H_{38} + 2\,H_2O \quad (2)$$

A partir dessa relação, determinou-se a proporção molar de hidrogênio requerida por unidade de

matéria-prima, permitindo o cálculo da massa de hidrogênio necessária em função da quantidade de óleo a ser convertido. Esse método possibilitou uma avaliação precisa do insumo de hidrogênio para o processo de produção do HVO.

2.3. Análise de Competitividade Econômica

A comparação econômica entre o uso de diesel e HVO foi realizada considerando quatro cenários distintos: o custo do abastecimento com diesel e com HVO sem inclusão de crédito de carbono, e o custo do abastecimento com diesel e com HVO incorporando o valor do crédito de carbono. Como o HVO apresenta uma redução aproximada de 85% nas emissões de CO_2 em relação ao diesel (GOMES et al., 2025), seu uso pode se tornar mais competitivo economicamente, dependendo do preço atribuído ao crédito de carbono no mercado. A ferramenta permite ao usuário simular esses diferentes cenários e avaliar em quais condições o HVO representa uma alternativa mais viável do ponto de vista financeiro e ambiental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para exemplificar a aplicação da metodologia e dos cálculos descritos, considerou-se um equipamento do tipo ship-to-shore crane (STS crane), responsável pela movimentação de contêineres no porto, com volume de tanque de 2.500 litros. Assim, foram definidos dois cenários para a análise: (i) cenário com preços na cotação atual dos combustíveis e do crédito de carbono e (ii) cenário com preços projetados para uma cotação futura. Os preços utilizados em cada cenário, assim como as demais variáveis definidas para a elaboração do estudo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Preços estimados para os cenários

Variáveis	Cenário 1 (2025)	Cenário 2 (2050)
Custo do Diesel (USD/l)	0,5	0,5
Custo do HVO (USD/l)	1,75	≈ 1(Solakivi, Paimander & Ojala, 2022)
Valor do crédito de carbono (USD/ton)	70,65	250 (Lee et al., 2024)
Eficiência do processo produtivo de HVO	63%	85%
Redução nas emissões de CO_2 do HVO em relação ao Diesel fóssil	85%	95%

Com base nos valores inseridos para cada cenários tem-se que, o primeiro resultado gerado refere-se à quantidade de hidrogênio necessária para a produção de HVO, que no primeiro cenário foi de 73,63 kg e no segundo 54,58 kg, evidenciando a diminuição da necessidade de insumos para a produção de HVO baseado na maturação do processo produtivo. Em seguida, foram comparados os custos do abastecimento nos dois cenários. Foram considerados os quatro casos: Diesel e HVO sem crédito de carbono, e Diesel e HVO com crédito de carbono. Como o HVO proporciona cerca de 85% de redução nas emissões de CO_2 em relação ao diesel, observou-se que, dependendo do preço do crédito de carbono, o HVO se torna economicamente mais vantajoso. A ferramenta permitiu a visualização dos custos totais em cada cenário, conforme representado na tabela 2.

Tabela 2: Resultados gerados pela ferramenta

Variáveis	Cenário 1 (2025)	Cenário 2 (2050)
Preço Diesel (sem crédito)	USD 1.250,00	USD 1.250,00
Preço Diesel (com crédito)	USD 1.723,14	USD 2.924,00
Preço HVO (sem crédito)	USD 4.375,00	USD 2.500,00
Preço HVO (com crédito)	USD 4.445,97	USD 2.751,10
Emissões de CO_2 Diesel (ton)	6,7	6,7
Emissões de CO_2 HVO (ton)	1	0,33
Quantidade de Hidrogênio necessária para produção de HVO	73,63 kg	54,58 kg

Os resultados apresentados na Tabela 2 evidenciam aspectos econômicos e ambientais relevantes para a avaliação da viabilidade do HVO como alternativa ao diesel convencional. No contexto de preços sem incentivos creditícios, observa-se que o HVO apresenta custo significativamente superior ao diesel em ambos os cenários analisados sendo 3,5 vezes maior no cenário 1 e duas vezes maior no cenário 2, contudo, a implementação de crédito de carbono demonstra potencial para reduzir substancialmente essa disparidade, particularmente no Cenário 2, onde o abastecimento utilizando HVO torna-se mais vantajoso do que o uso de diesel fóssil. Do ponto de vista ambiental, os dados confirmam a superioridade técnica do HVO, a figura 1

apresenta a comparação das emissões nos dois cenários, com emissões de CO_2 do HVO sendo significativamente menores em comparação às 6,7 toneladas geradas pelo diesel convencional. Esta redução de aproximadamente 95% das emissões de carbono representa vantagem competitiva substancial em contextos regulatórios que valorizam a descarbonização.



Figura 1: Redução nas emissões nos cenários 1 e 2

A análise da demanda de hidrogênio para produção de HVO revela variação significativa entre os cenários (73,63 kg no Cenário 1 e 54,58 kg no Cenário 2), indicando que otimizações no processo produtivo podem impactar diretamente os custos operacionais. Contudo, notou-se que a ferramenta utiliza dados de estequiométricos para a elaboração do cálculo de demanda de hidrogênio verde necessário para a produção de HVO, porém, seguindo os parâmetros presentes na literatura em estudos mercadológicos, desenvolvidos por (HAMELINCK, et al, 2021) estabeleceu-se que o consumo de hidrogênio verde por tonelada de HVO é de 41 quilogramas, desse modo haveria um acréscimo na quantidade real necessária, passando de 73,63 kg para 93,94 kg no cenário 1 e de 54,58 kg para 84,05 kg no cenário 2. Assim, esse acréscimo sugere que investimentos em eficiência tecnológica tornam-se ainda mais necessários e constituem fator determinante para a competitividade econômica do HVO no mercado energético.

Embora no primeiro momento o custo do abastecimento com HVO seja consideravelmente superior ao do diesel, considerando a concretização do segundo cenário projetado para 2050, a redução no valor do combustível e a inserção dos créditos de carbono no valor final reduz drasticamente essa diferença, tornando o uso do HVO relativamente mais atrativo do que o diesel fóssil. Cabe ressaltar que, no contexto da formação de preços, o governo pode atuar de forma direta mediante a concessão de incentivos fiscais destinados ao emprego de fontes energéticas renováveis, conferindo maior atratividade econômica ao HVO. Do ponto de vista ambiental, a redução nas emissões de CO_2 proporcionada pelo HVO em comparação ao diesel fóssil constitui vantagem competitiva significativa, gerando impactos positivos que se traduzem na obtenção de certificações ambientais e selos verdes. Ademais, o processo produtivo do HVO apresenta potencial de otimização, podendo, em determinadas configurações, alcançar níveis próximos à neutralidade de carbono, o que justifica sua adoção sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a viabilidade técnica e econômica do uso de óleo vegetal hidrotratado (HVO) em substituição ao óleo diesel fóssil em equipamentos portuários, considerando também a demanda por hidrogênio verde para sua produção. Os resultados obtidos indicam que o HVO é efetivo na redução das emissões de gases de efeito estufa, com diminuição de cerca de 95% nas emissões de CO_2 em comparação ao diesel convencional. A produção de HVO requer volume considerável de hidrogênio verde, mas essa demanda pode diminuir com o avanço tecnológico e ganhos de eficiência no processo de hidrotratamento.

Do ponto de vista econômico, o HVO apresenta custo inicial significativamente maior que o diesel fóssil. No cenário atual (2025), o preço do HVO sem incentivo de carbono foi aproximadamente 3,5 vezes superior ao do diesel. No entanto, projeções para 2050 indicam que, com a maturação da cadeia produtiva (maior eficiência) e a valorização do crédito de carbono (ex: USD 250/t), o custo efetivo do HVO pode tornar-se competitivo e até inferior ao do diesel (conforme resultados da Tabela 2). Essa convergência de custos é reforçada pelas políticas de incentivo a combustíveis renováveis e pelo fator regulatório, que privilegia tecnologias de baixas emissões.

Agradecimentos
O presente estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os

autores agradecem à agência pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Senado Federal. Comissão de Meio Ambiente. Projeto de Lei nº 1878, de 2022. Cria a Política que regula a produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde. Brasília, DF: Senado Federal, 2022. Disponível em: https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9180876. Acesso em: 01 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.770, de 21 de dezembro de 2023. Institui o Plano Nacional de Transição Energética (PNEnerg). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 dez. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/L14770.htm. Acesso em: 01 jun. 2025.

BRASIL. Ministério de Portos e Aeroportos. Pacto da Sustentabilidade do Ministério de Portos e Aeroportos já teve adesão de mais de 30 empresas. **gov.br**, Brasília, 3 jun. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2025/06/pacto-da-sustentabilidade-do-ministerio-de-portos-e-aeroportos-ja-teve-adesao-de-mais-de-30-empresas. Acesso em: 1 jul. 2025.

D'AMBROSIO, Stefano; MANCARELLA, Alessandro; MANELLI, Andrea. Utilization of hydrotreated vegetable oil (HVO) in a Euro 6 dual-loop EGR diesel engine: behavior as a drop-in fuel and potentialities along calibration parameter sweeps. *Energies*, [S.l.], v. 15, n. 19, p. 7202, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15197202. Acesso em: 30 jun. 2025

GOMES, Diogo Melo; NETO, Rui Costa; BAPTISTA, Patrícia; RAMOS, Cristiano Pereira; CORREIA, Cristina Borges; ROCHA, Rosário. A review of advanced techniques in hydrotreated vegetable oils production and life cycle analysis. Biomass and Bioenergy, [S.l.], v. 170, p. 106476, mar. 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195342500100X. Acesso em: 30 mai. 2025.

LEE, Hyunyong et al. Comparative Life Cycle Assessments and Economic Analyses of Alternative Marine Fuels: Insights for Practical Strategies. Sustainability, v. 16, n. 5, p. 2114, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/2114. Acesso em: 28 abr. 2025.

HAMELINCK, Carlo et al. Conversion efficiencies of fuel pathways for used cooking oil. Amsterdam: Studio Gear Up, 2021. Relatório encomendado por EWABA – European Waste Advanced Biofuels Association e MVaK – Mittelstandsverband abfallbasierter Kraftstoffe e.V. Disponível em: http://www.studiogearup.com. Acesso em: 27 jun 2025.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. London, 2020.

TORRES, Ezequiel Zago Bastos. O papel do óleo vegetal hidrotratado (HVO) na descarbonização do setor de transportes. 2019. Disponível em: https://iepuc.puc-rio.br/dados/files/2019/EZEQUIEL_ZAGO_BASTOS_TORRES.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Hydrogen Review 2022. Paris: IEA, 2022.

PORTO DO AÇU. Projeto de hidrogênio verde no Porto do Açu. Rio de Janeiro, 2023.

PORTO DO PECÉM. Hidrogênio verde: iniciativas e parcerias. Ceará, 2023.

PORTOS DO PARANÁ. Ports of Paraná set an unprecedented partnership with the Port of Rotterdam. **Ports of Paraná**, 2 jun. 2023. Disponível em: https://www.portosdoparana.pr.gov.br/english/Noticia/Ports-Parana-set-unprecedented-partnership-Port-Rotterdam. Acesso em: 1 jul. 2025.

SILVA, Felipe Azevedo Rios; YAMASHITA, Yaeko; SANTOS, Luis Claudio Rios. O papel do hidrogênio verde na descarbonização dos portos no Brasil. Revista Aracê, São José dos Pinhais, v. 6, n. 3, p. 10826-10857, 2024.

SOLAKIVI, Tomi; PAIMANDER, Aleksi; OJALA, Lauri. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 113, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500. Acesso em: 22 mai. 2025.

VELAZQUEZ ABAD, Anthony; DODDS, Paul E. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. Energy Policy, v. 138, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111300. Acesso em: 15 jun. 2025.

WEI, Huang; MÜLLER-CASSERES, Eduardo; BELCHIOR, Carlos R. P.; SZKLO, Alexandre. Evaluating the readiness of ships and ports to bunker and use alternative fuels: a case study from Brazil. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/jmse11101856. Acesso em: 1 jul. 2025.

ZEMAN, Petr; HÖNIG, Vladimír; KOTEK, Martin; TÁBORSKÝ, Jan; OBERGRUBER, Michal; MAŘÍK, Jakub; HARTOVÁ, Veronika; PECHOUT, Martin. Hydrotreated vegetable oil as a fuel from waste materials. Catalysts, v. 9, 337, 2019. Acesso em: 30 mai. 2025

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
João Vitor Lima Sousa (vitor_lima@egresso.ufg.br)
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Felipe Azevedo Rios Silva (felipearsilva@gmail.com)

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE COLETIVO DO DISTRITO FEDERAL ATRAVÉS DO ÓLEO VEGETAL HIDROTRATADO (HVO)

Felipe Azevedo Rios Silva[1], **João Vitor Lima Sousa** [1], **Ana Caroline Lima Silva**[1], **Hugo Gomes D'Amato Villardi**[1], **Joaquim José Guilherme de Aragão**[1]
[1]Universidade de Brasília

RESUMO
Este estudo quantifica o potencial de descarbonização do sistema de transporte coletivo por ônibus mediante a substituição do diesel fóssil por Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO). São comparados três cenários fundamentados em dados operacionais da frota e em uma abordagem *well-to-wheel* para estimar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a viabilidade econômica da transição. Foram avaliados três cenários: uma linha de base com diesel B12 e dois cenários de substituição integral por HVO, proveniente de óleo de cozinha usado (UCO) e de óleo de palma. Os resultados indicam que a frota atual emite aproximadamente 234 mil toneladas de CO_2 anualmente. A adoção de HVO-UCO poderia mitigar cerca de 199 mil toneladas de CO_2 por ano, uma redução de 85%. Conclui-se que o HVO representa uma tecnologia de transição estratégica, mas sua viabilidade está condicionada à sustentabilidade certificada da matéria-prima e mecanismos de precificação de carbono.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transporte é responsável por aproximadamente 20% das emissões globais de gases de efeito estufa, sendo o transporte rodoviário urbano uma fonte significativa de poluentes atmosféricos e CO_2 (ICCT, 2024). No Brasil, o transporte rodoviário representa cerca de 9% das emissões nacionais de CO_2, demandando urgente transição para tecnologias de baixo carbono (ICCT, 2024). O sistema de transporte coletivo do Distrito Federal constitui elemento central da mobilidade urbana da capital brasileira, operando com aproximadamente 3.049 ônibus que realizam 22.500 viagens diárias. A projeção para 2025 indica incorporação de 444 veículos adicionais, totalizando 3.493 ônibus na frota (SEMOB, 2024).

A transição energética no transporte público urbano alinha-se às metas climáticas nacionais, que estabelecem redução de 50% das emissões até 2030 e neutralidade climática até 2050 (Brasil, 2021). Neste contexto, várias rotas tecnológicas emergem como alternativas viáveis ao diesel convencional, uma delas é o chamado diesel verde, o óleo vegetal hidrotratado (HVO).

O Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) representa uma alternativa imediata ao diesel convencional, sendo produzido através de hidrotratamento de óleos vegetais e também gorduras animais. Este combustível parafínico, livre de aromáticos, enxofre e oxigênio, pode ser utilizado como substituto direto do diesel sem modificações nos motores como alternativa *drop-in-fuel* (d'Ambrosio, 2022). Para sua produção, é fundamental o uso de gás hidrogênio (H_2), e, quando obtido por meio da eletrólise da água com o uso de fontes de energia elétrica renováveis, como solar, eólica, hidráulica, de marés, geotérmica e de biomassa, sem emissão direta de dióxido de carbono na atmosfera em seu ciclo de produção, trata-se do chamado hidrogênio verde (H_2V) (Velazquez Abad, 2020; Brasil, 2022).

Segundo McCaffery *et* al. (2022), o HVO apresenta propriedades físico-químicas superiores ao biodiesel e diesel convencional, incluindo alto número de cetano, baixo teor de aromáticos e ausência de enxofre. Roque (2022) demonstrou em estudo experimental que o HVO puro apresenta reduções significativas nas emissões: NOx (30%), hidrocarbonetos (75%), monóxido de carbono (81%) e material particulado (55,3%) comparado ao diesel convencional. Estas reduções ocorrem devido às propriedades físico-químicas do biocombustível, como ausência de compostos aromáticos e maior número de cetano. Estudos de avaliação de ciclo de vida indicam que o HVO pode reduzir emissões de gases de efeito estufa em 50-90% comparado ao diesel fóssil, dependendo da matéria-prima utilizada (Gomes *et* al, 2025). A NTU (2020) reporta que o abastecimento com 100% de HVO é capaz de quase zerar a emissão de CO_2 e reduzir de 50% a 90% outros gases de efeito estufa em todo o ciclo de vida.

Torres (2019) analisou dados comparativos demonstrando que o HVO possui menores emissões de CO_2, NO e NO_2 entre os combustíveis avaliados, enquanto a Cummins (2022) reporta que as emissões de partículas podem ser reduzidas drasticamente, potencialmente em até metade.

Uma das principais vantagens do HVO é sua compatibilidade como combustível drop-in, podendo ser utilizado em motores diesel convencionais sem modificações (Mercedes-Benz, 2019). Esta característica permite implementação imediata na frota existente, diferentemente de outras tecnologias que requerem investimentos em infraestrutura.

A presente pesquisa objetiva avaliar o potencial de mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO_2) no sistema de transporte coletivo do Distrito Federal mediante a substituição do óleo diesel por óleo vegetal hidrotratado (HVO). Dentre os objetivos desta pesquisa, incluem-se a quantificação das emissões atuais de CO_2 da frota de ônibus do Distrito Federal, a estimativa do potencial de redução de emissões com diferentes concentrações de HVO, a análise da viabilidade econômica da implementação de HVO e a proposição de estratégias de implementação para descarbonização da frota.

2. MÉTODO E SUA APLICAÇÃO

A metodologia se baseia no estudo de caso de uma cidade e sua frota, juntamente com os dados operacionais fornecidos pela SEMOB-DF. Os dados foram obtidos junto à SEMOB-DF e aplicados em 3 cenários distintos a fim de mensurar o impacto do uso de HVO como substituto *drop-in* ao diesel fóssil:

- **Cenário 1 (REF):** Representa a linha de base, com a frota operando integralmente com diesel B12 (12% de biodiesel). As emissões e os custos deste cenário servem como referência para a análise comparativa.
- **Cenário 2 (HVO-UCO):** Simula a substituição completa do diesel por HVO produzido a partir de Óleo de Cozinha Usado (UCO), uma matéria-prima residual. Assume-se um fator de redução de GEE de 85% em relação ao ciclo de vida do diesel fóssil.
- **Cenário 3 (HVO-PALMA):** Simula a substituição completa por HVO produzido a partir de óleo de palma virgem. Este cenário considera um fator de redução de GEE de 52%, valor que considera as emissões associadas à Mudança no Uso da Terra (LUC).

O consumo anual de diesel foi estimado utilizando dados operacionais da frota (*eq.* 1) de acordo com Silva *et* al (2024):

$$C_{anual} = N_{veículos} \times D_{anual} / C_{específico} \quad (1)$$

Onde:
C_{anual} = Consumo anual de diesel (L/ano);
$N_{veículos}$ = Frota base;
$C_{específico}$ = Consumo por quilômetro;
D_{anual} = Quilometragem percorrida;

As emissões anuais de GEE (E_{CO2}) foram calculadas pela Equação 2, utilizando uma abordagem *Well-to-Wheel* (do poço à roda) de acordo com Silva *et* al (2024):

$$E_{CO2} = C_{combustível} \times FE_{CO2} \quad (2)$$

onde:
E_{CO2} = Emissões de CO_2 (kg/ano)
$C_{combustível}$ = Consumo de Combustível (L/ano)
FE_{CO2} = Fator de emissão de CO_2 (kg CO_2/L).

Para o diesel B12 (12% de biodiesel), foi utilizado o fator de emissão padrão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil, ajustado para a mistura. Todas as premissas operacionais, ambientais e econômicas utilizadas na modelagem estão consolidadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros Operacionais e de Linha de Base da Frota de Ônibus do DF.

Parâmetros Operacionais da Frota	Valor	Unidade	Fonte / Justificativa
Frota operacional ($N_{veículos}$)	3.049	ônibus	SEMOB-DF (2024)
Quilometragem total anual (D_{anual})	218.672.960	km/ano	Cálculo baseado em SEMOB-DF (2024)
Consumo específico médio ($C_{específico}$)	2,5	km/L	Estimativa de mercado

Consumo anual de combustível (C_{anual})	87.469.184	L/ano	Cálculo (Equação 1)
Fator de emissão do Diesel B12 (FE_{CO2})	2,68	$kgCO_2eq/L$	Padrão MCTI, ajustado para B12
Fator de Redução (HVO-UCO)	85%	-	Hamelink. (2021)
Fator de Redução (HVO-PALMA)	52%	-	Xu *et* al. (2022), incluindo LUC

O consumo de HVO foi considerado equivalente ao do diesel em volume (L/ano), uma premissa conservadora, pois alguns estudos relatam uma ligeira melhora na eficiência com HVO devido ao seu maior valor calorífico líquido (Xu *et* al., 2022). A análise econômica compara os custos operacionais anuais de cada cenário, considerando os dispêndios com combustível e as potenciais receitas advindas da comercialização de créditos de carbono. Para incorporar as incertezas de mercado, foram estabelecidos dois sub cenários econômicos:

- **Cenário Econômico A (Preços Atuais):** Utiliza cotações correntes para o diesel, HVO e créditos de carbono no mercado voluntário.
- **Cenário Econômico B (Preços Otimistas):** Projeta um cenário hipotético considerando preços otimistas com redução no custo de produção do HVO (maturidade tecnológica) e um preço de carbono significativamente mais elevado, reflexo de um mercado regulado e maduro ideal.

Tabela 2: Parâmetros e Premissas dos Cenários de Análise Econômica e Ambiental (Valores em USD)

Premissas Econômicas	Cenário A	Cenário B	Unidade
Custo do Diesel	1,20	1,20	USD$/L
Custo do HVO	1,75	1,00	USD$/L
Preço do Crédito de Carbono	7,00	70,00	/tCO_2eq

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo baseou-se no sistema de transporte coletivo do Distrito Federal, composto por 3.049 ônibus em operação em 2024. Os dados operacionais foram obtidos de fontes oficiais da SEMOB-DF.

A aplicação do modelo metodológico aos cenários definidos permite quantificar os impactos ambientais e econômicos da transição para o HVO. Os resultados, consolidados na Tabela 3, são discutidos de forma integrada a seguir, conectando os achados quantitativos às suas implicações estratégicas e de política pública.

Tabela 3: Análise Comparativa de Emissões (em toneladas de CO_2 equivalente/ano)

Indicador	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Emissões Totais (tCO_2eq/ano)	234.417	35.163	112.520
Emissões Evitadas (tCO_2eq/ano)	0	199.254	121.897
Redução de Emissões vs. REF	0%	85%	52%

No Cenário de Referência (REF), a frota de ônibus do DF emite 234.417 toneladas de CO_2eq por ano. A transição para o HVO-UCO (Cenário 2) reduziria as emissões para 35.163 tCO_2eq/ano, o que representa uma redução de 85% e um total de 199.254 tCO_2 evitadas anualmente. Em contraste, a adoção do HVO-PALMA (Cenário 3) resultaria em emissões de 112.520 tCO_2eq/ano. Isso corresponde a uma redução de 52% em relação à linha de base, com 121.897 tCO_2 evitadas anualmente. Embora ainda seja uma redução substancial, o benefício climático é 39% menor do que o alcançado com o HVO de matéria-prima residual.

A análise econômica revela que, sob as condições atuais de mercado (Cenário Econômico A), a transição para o HVO representa um desafio financeiro considerável. Os resultados estão detalhados na Tabela 4.

Tabela 4: Análise Comparativa de Custos Operacionais Anuais (Milhões de USD)

Indicador (Milhões USD/ano)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Cenário Econômico A (Cenário Real)			
Custo Anual do Combustível	$104,96	$153,07	$153,07
Receita de Créditos de Carbono	$0	($1,39)	($0,85)
Custo Operacional Líquido (A)	**$104,96**	**$151,68**	**$152,22**

Variação vs. REF	0%	+44,5%	+45,0%
Cenário Econômico B (Cenário Ideal)			
Custo Anual do Combustível	$104,96	$87,47	$87,47
Receita de Créditos de Carbono	$0	($13,95)	($8,53)
Custo Operacional Líquido (B)	**$104,96**	**$73,52**	**$78,94**
Variação vs. REF	0%	-29,9%	-24,8%

Valores entre parênteses representam receita (custo negativo).

No Cenário Econômico A (**Cenário Real**), o custo anual com diesel é de aproximadamente 104,96 milhões de dólares. A substituição por HVO, a um preço de 1,75 $/L, elevaria este custo para 153,07 milhões de dólares, um aumento de mais de 48 milhões de dólares. A receita gerada pela venda de créditos de carbono, a um preço de 7,00 $/tCO$_2$, é marginal. Para o HVO-UCO, a receita seria de apenas 1,39 milhão de dólares, resultando em um custo operacional líquido final de 151,68 milhões de dólares. Isso representa um sobrecusto de 44,5% em relação à operação com diesel, um sobrecusto que torna sua adoção em larga escala inviável para os operadores de transporte público sem subsídios diretos. A receita gerada pela venda de créditos de carbono no mercado voluntário brasileiro, cujos preços são atualmente modestos (7,00 $/tCO$_2$eq), é marginal e insuficiente para equalizar essa diferença, cobrindo menos de 3% do custo adicional.

Já no Cenário Econômico B (**Cenário Ideal**), a perspectiva muda drasticamente. Com o custo do HVO reduzido para 1,00 $/L e o preço do carbono valorizado a 70,00 $/tCO$_2$, a viabilidade econômica se torna alcançável. O custo anual do combustível HVO seria de 87,47 milhões de dólares. A receita com créditos de carbono para o HVO-UCO saltaria para 13,95 milhões de dólares, levando o custo operacional líquido final para 73,52 milhões de dólares. Neste cenário otimista, a operação com HVO-UCO se tornaria 29,9% mais barata que a operação com diesel. Para o HVO-PALMA, o benefício seria menor, mas ainda assim resultaria em um custo operacional 12,8% inferior ao do diesel.

A transição do Cenário A para o B não é um processo passivo, mas uma consequência direta da implementação de políticas públicas assertivas. O fator determinante é a precificação da externalidade negativa do carbono. Instrumentos como o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) são essenciais para internalizar o custo ambiental do combustível fóssil e, simultaneamente, remunerar financeiramente as alternativas de baixo carbono. A viabilidade econômica do HVO, portanto, não é uma questão puramente tecnológica, mas uma função direta do arcabouço regulatório e da valorização política da descarbonização.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição do óleo diesel por Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) no sistema de transporte coletivo do Distrito Federal é uma medida tecnicamente viável para a mitigação das emissões de CO_2, com um potencial de redução de até 85%, o que corresponde a evitar a emissão de quase 200 mil toneladas de CO_2 equivalente por ano. Porém a magnitude do benefício alcançado do HVO está condicionada à sustentabilidade de sua matéria-prima. O HVO derivado de resíduos, como o óleo de cozinha usado, apresenta um desempenho ambiental substancialmente superior ao de óleos virgens associados a um alto risco de emissões por Mudança no Uso da Terra. Este resultado evidencia a necessidade imperativa de políticas públicas que não apenas incentivem o uso de biocombustíveis avançados, mas que também estabeleçam mecanismos rigorosos de certificação e rastreabilidade para garantir a integridade ambiental de toda a cadeia de valor.

Do ponto de vista econômico, a viabilidade econômica da transição depende fundamentalmente da implementação de mecanismos de precificação de carbono, como um mercado regulado robusto, que internalize os custos ambientais dos combustíveis fósseis e remunere adequadamente as tecnologias de baixa emissão. Assim, o HVO de fontes sustentáveis posiciona-se como um combustível estratégico de transição, capaz de acelerar a descarbonização do transporte pesado urbano enquanto tecnologias de emissão zero se consolidam. Sua implementação bem-sucedida requer, contudo, uma ação coordenada entre o poder público e o setor privado, pautada em políticas que valorizem a análise de ciclo de vida e criem um ambiente de mercado favorável à inovação sustentável.

Agradecimentos
O presente estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores agradecem à agência pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Senado Federal. Comissão de Meio Ambiente. Projeto de Lei nº 1878, de 2022. Cria a Política que regula a produção e usos para fins energéticos do Hidrogênio Verde. Brasília, DF: Senado Federal, 2022. Disponível em:

BRASIL. Casa Civil. Brasil se compromete a reduzir emissões de carbono em 50% até 2030. Brasília, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/novembro/brasil-se-compromete-a-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030. Acesso em: 30 jun. 2025.

CUMMINS. Reduções de emissões a serem esperadas em suas operações de mineração com HVO. 2023. Disponível em: [https://www.cummins.com/pt/news/2023/11/03/emissions-reductions-expect-your-mining-operations-hvo] Acesso em: 3 jul. 2025.

D'AMBROSIO, Stefano; MANCARELLA, Alessandro; MANELLI, Andrea. Utilization of hydrotreated vegetable oil (HVO) in a Euro 6 dual-loop EGR diesel engine: behavior as a drop-in fuel and potentialities along calibration parameter sweeps. Energies, \[S.l.], v. 15, n. 19, p. 7202, 2022.

GOMES, Diogo Melo; NETO, Rui Costa; BAPTISTA, Patrícia; RAMOS, Cristiano Pereira; CORREIA, Cristina Borges; ROCHA, Rosário. A review of advanced techniques in hydrotreated vegetable oils production and life cycle analysis. Biomass and Bioenergy, \[S.l.], v. 170, p. 106476, mar. 2025.

HAMELINCK, Carlo. Conversion efficiencies of fuel pathways for used cooking oil. Amsterdam: Studio Gear Up, 2021. Relatório encomendado por EWABA – European Waste Advanced Biofuels Association e MVaK – Mittelstandsverband abfallbasierter Kraftstoffe e.V. Disponível em: [http://www.studiogearup.com]. Acesso em: 27 jun. 2025.

ICCT. The International Council on Clean Transportation. E-bus radar: análise operacional de ônibus elétricos em São Paulo. 2024. Disponível em: [https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/08/ID-201-%E2%80%93-PT-E-bus-radar_final2.pdf] Acesso em: 30 jun. 2025.

MCCAFFERY, C. et al. Effects of hydrogenated vegetable oil (HVO) and HVO/biodiesel blends on the physicochemical and toxicological properties of emissions from an off-road heavy-duty diesel engine. Fuel, v. 323, p. 124283, 2022.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Fator de emissão de CO_2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. Brasília, 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos] Acesso em: 30 jun. 2025.

MERCEDES-BENZ. Mercedes-Benz destaca vantagens do Biodiesel HVO para frotas de ônibus. 2019. Disponível em: [https://www.mercedes-benz-trucks.com.br/institucional/imprensa/releases/onibus/2019/9/21513-mercedes-benz-destaca-vantagens-do-biodiesel-hvo-para-frotas-de-onibus/]. Acesso em: 3 jul. 2025.

NTU. A Revolução do HVO. 2020. Disponível em: [https://ntu.org.br/novo/NoticiaCompleta.aspx?idArea=10\&idNoticia=1279]. Acesso em: 3 jul. 2025.

ROQUE, L. F. A. Modelagem e análise do ciclo de vida da produção e comercialização de diesel verde (HVO) e sua aplicação no modo dual-fuel com etanol em motores de ignição por compressão. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2022.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE DO DISTRITO FEDERAL – SEMOB. 2024. Disponível em: [https://semob.df.gov.br/]). Acesso em: 3 jul. 2025.

SILVA, A. C. L.; SILVA, F. A. R.; SOUSA, J. V. L.; YAMASHITA, Yaeko. Hidrogênio verde como combustível para o setor de transportes: um caminho para a descarbonização. In: 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2024, Florianópolis. Anais \[...], Florianópolis, 2024. v. 3.

TORRES, E. Z. B. O papel do óleo vegetal hidrotratado (HVO) na descarbonização do transporte marítimo. Monografia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2019.

VELAZQUEZ ABAD, Anthony; DODDS, Paul E. Green hydrogen characterisation initiatives: definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. Energy Policy, v. 138, 2020.

XU, H.; OU, L.; LI, Y.; HAWKINS, T.R.; WANG, M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel and Renewable Diesel Production in the United States. Environmental Science & Technology, v. 56, p. 7512–7521, 2022.

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
Felipe Azevedo Rios Silva (felipearsilva@gmail.com)
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília – DF, Brasil. CEP 70910-900
João Vitor Lima Sousa (vitor_lima@egresso.ufg.br)

CARACTERIZAÇÃO DE ZONAS DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA SOB A PERSPECTIVA DA URBANIZAÇÃO E DO TRANSPORTE DE CARGA

Mateus Joter da Silva, Bruno Reges Almeida de Brito, Bruno Vieira Bertoncini
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
O transporte urbano de carga (TUC) é um componente essencial da vida nas cidades, mas também um dos principais vetores de impactos ambientais, especialmente no que se refere à poluição atmosférica. Este estudo analisa a cidade de Fortaleza-CE a partir da interação entre três variáveis: entropia comercial, configuração física do espaço urbano (cânions urbanos) e concentração de dióxido de nitrogênio (NO_2). A cidade foi dividida em unidades espaciais padrão, nas quais cada variável foi quantificada e classificada para compor um índice de risco associado aos impactos do TUC. Os resultados revelam que a combinação entre a forma urbana e a distribuição das atividades econômicas molda desigualdades na exposição à poluição. O estudo reforça a necessidade de políticas públicas que considerem as particularidades espaciais e sociais no planejamento da logística urbana, bem como aponta caminhos para aprofundar a análise do fenômeno por meio de modelagens urbanas e ambientais.

1. INTRODUÇÃO

Conforme a ONU (2022), cerca de 55% da população mundial vive em cidades, percentual que pode chegar a 66% até 2030. As cidades se caracterizam por uma grande diversidade de atividades humanas, apresentando diferentes padrões de consumo e demandas econômicas que exigem processos logísticos cada vez mais eficientes. Essas dinâmicas socioespaciais consolidam o espaço urbano como o principal núcleo de desenvolvimento humano. No entanto, as cidades não são autossuficientes, dependendo do transporte de mercadorias para atender suas necessidades cotidianas. Nesse contexto, o transporte urbano de carga (TUC) emerge como a resposta da sociedade a essas demandas (Vieira et al., 2021) e mantém uma relação estreita com o desenvolvimento econômico (Wang et al., 2021).

Apesar de essencial, o TUC expõe o ambiente urbano a desafios relacionados ao seu funcionamento, envolvendo fatores de desenvolvimento urbano e de gestão territorial, que afetam o bem-estar econômico e social e a sustentabilidade das cidades (Hesse, 2004; Hall e Hesse, 2012). Além disso, os ambientes urbanos são heterogêneos, apresentando características distintas que influenciam a organização logística (Oliveira et al., 2018). Assim, torna-se necessário desenvolver estratégias logísticas robustas, capazes de atender às necessidades específicas de cada área urbana e mitigar os impactos negativos do TUC (Dablanc, 2011).

Embora indispensável, o TUC gera externalidades que afetam o meio ambiente e a sociedade, como congestionamentos, poluição visual e sonora, acidentes de trânsito e, especialmente para este estudo, a emissão de poluentes atmosféricos (Kin e Macharis, 2017; Yuan, 2018; Grondys, 2019). Esses impactos são amplos e produzem custos indiretos, que atingem de forma desigual grupos sociais com diferentes perfis de idade, raça e condição socioeconômica (Santos, 2024; Brusselaers, 2023).

A intensidade e a distribuição dos impactos do TUC dependem das características do ambiente urbano, podendo apresentar desigualdades territoriais (Yuan, 2018). As diferentes atividades econômicas geram padrões específicos de movimentação de cargas, resultando em impactos particulares de acordo com a função exercida pelo local na estrutura urbana, configurando os chamados perfis logísticos (Alho e Silva, 2015). Além disso, o ambiente construído influencia diretamente a dispersão dos poluentes emitidos pelo TUC. Em regiões com edifícios altos e vias estreitas, forma-se o chamado cânion urbano, que atua como uma barreira física, dificultando a dispersão dos poluentes e aumentando sua concentração nas vias (Vardoulakis et al., 2003; Gäal, 2017).

Diante disso, este estudo combina a análise dos perfis logísticos e dos cânions urbanos para comparar diferentes contextos intraurbanos, associando-os à concentração de NOx obtida por imagens de satélite. A cidade de Fortaleza foi classificada em diferentes áreas segundo o grau de preocupação com a concentração de poluentes, considerando três variáveis principais. O objetivo é compreender os padrões de exposição da população aos poluentes, evidenciando como as características do sistema de atividades e do ambiente construído interagem na intensificação ou mitigação da poluição atmosférica.

O objetivo central da pesquisa é caracterizar a cidade de Fortaleza quanto às interações entre perfis logísticos, cânions urbanos e concentração de NOx, identificando as regiões que demandam maior atenção em termos de gestão ambiental e logística. Para isso, foram seguidas as etapas: (a) zoneamento da cidade de Fortaleza em uma unidade espacial padrão; (b) identificação dos perfis logísticos; (c) identificação dos cânions urbanos; (d) quantificação da distribuição de NO_2; e (e) associação dessas variáveis para classificar as zonas conforme os impactos gerados, permitindo a comparação entre áreas e a identificação das zonas de maior risco. A estrutura do trabalho está organizada da seguinte forma: na seção 2, apresenta-se o método utilizado; na seção 3, os resultados obtidos; e na seção 4, a conclusão.

2. MÉTODO

Este estudo investiga a associação de variáveis da forma urbana e sua relação com a produção e dispersão de poluentes provenientes do TUC no ambiente urbano. Para isso a etapa metodológica segue as seguintes etapas: (a) Quantificação das variáveis da forma urbana, ou seja, entropia comercial e cânions urbanos; (b) Quantificação da concentração de NO_2; (C) Formulação do indicador de poluição atmosférica relacionada ao TUC. A primeira etapa, está baseada no trabalho de Silva et al. (2024), no qual foram analisadas as relações entre as variáveis de forma urbana. Da mesma forma, este trabalho utilizam uma unidade espacial de agregação em malha hexagonal, cujos polígonos medem 1700 m de lado, representando a mediana das viagens de carga em Fortaleza, o que resulta em um total de 147 células para Fortaleza (PASFOR, 2020; Pinheiro; Gonzalez Feliu e Bertoncin, 2025i).

2.1 Entropia Comercial e Cânions Urbanos

Utilizando o software QGIS e baseado no Plano de Acessibilidade de Fortaleza (PASFOR 2020), filtrou-se a base georreferenciada da RAIS para que obtivemos a localização de estabelecimentos varejistas e atacadistas do setor alimentício, setor de maior movimentação no TUC na cidade, e com melhor distribuição espacial (PASFOR, 2020). Posteriormente, calculou-se a entropia comercial nas hexágonos com um indicador de 0 a 1 crescente em termos da heterogeneidade observada (Alho e Silva, 2015), para refletir a proporção de estabelecimentos de determinada categoria e da quantidade de grupos nos quais eles se encontram. Dado mesma forma, os cânions urbanos foram catalogados utilizando a modelagem 3D das edificações de Fortaleza em um cálculo dos indicadores H/W, no qual H é a altura média em torna da via analisada e W é a média das seções transversais da via. Ponderados pelos comprimentos das vias enquadradas nos hexágonos, calculamos os índices de cânion médio.

2.2 Mensuração do NO_2

Utilizando a plataforma Google Earth Engine, extraiu-se a imagem média da distribuição de dióxido de nitrogênio na superfície em mol/m^2 do satélite Sentinel-5P decorrente do ano de 2024 – ciclo completo mais próximo ao estudo –, de forma que cada pixel da imagem corresponde à densidade citada. A escolha pelo referido gás baseia-se na recorrência na literatura da relação entre ele e o transporte de carga (Kijewska, 2016; Trip e Konings, 2014).

2.3 Agregação das Variáveis

Ao final, executamos a composição dos fatores, tornando-se necessário um método que possa graduá-los de maneira uniforme, já que estamos utilizando variáveis de naturezas distintas (dois indicadores e uma medida). Portanto, ao observar a literatura, optou-se por adaptar o método de da Silva et al. (2024), que classificou os cânions e entropias em composições de tercis. No caso deste estudo, para manter o intuito de estabelecer comparações no universo amostral, dividiu-se as variáveis pela "Medida de Separatrizes por Quintil" e classificou-se cada quintil de 1 a 5, em ordem crescente de seus intervalos. Em seguida, somamos essas classificações, resultando em um índice de 0 a 15, constituindo Níveis de Risco Poluição-TUC, no qual, quanto maior, mais impactado está sendo o espaço pela externalidade provenientes do TUC.

3. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das variáveis analisadas neste estudo. Na parte (a), que representa os cânions urbanos, observa-se um padrão que reflete a evolução urbana e a continuidade espacial das separatrizes. As zonas mais a leste e no extremo sul apresentam os menores índices de cânion médio, caracterizando áreas ocupadas mais recentemente, com padrões construtivos menos densos. Já a zona central e a nordeste apresentam os maiores índices de cânion, com destaque para uma área de altos valores a leste.

Essa região possui ocupação densa, edificações de grande altura e vias estreitas. Padrões elevados de cânion também são observados nas zonas noroeste e oeste; contudo, nessas áreas, embora a ocupação seja densa e as vias estreitas, o gabarito é baixo e os recuos laterais praticamente inexistentes, o que intensifica a formação de cânions e dificulta a dispersão dos poluentes.

Na parte (b), referente à entropia comercial, a distribuição apresenta-se aparentemente mais heterogênea e dispersa ao longo da cidade. Essa configuração ocorre porque aproximadamente 80% do território urbano está enquadrado em valores de entropia entre 0 e 0,572, enquanto apenas 20% da cidade se encontra na faixa entre 0,572 e 0,951, concentrando a metade superior do índice. Apesar dessa distribuição desigual, é possível identificar padrões espaciais relevantes, como a concentração mais expressiva da variabilidade comercial na zona leste, uma variabilidade baixa na zona sudoeste e valores medianos na região centro-norte. Importantes corredores comerciais estão localizados nos dois quintis superiores, enquanto áreas de menor entropia correspondem a regiões com baixa densidade de estabelecimentos.

Na parte (c), que apresenta a concentração média de NO_2 ao longo de 2024, nota-se uma clara gradação espacial, com concentrações mais baixas a leste e mais altas a oeste. Esse padrão pode ser explicado por dois fatores principais: (i) a ventilação predominante em Fortaleza ocorre de sudeste para noroeste, o que favorece a dispersão dos poluentes em direção à porção oeste da cidade, onde eles tendem a se acumular; (ii) em escala mais local, observa-se que as maiores concentrações de NO_2 coincidem com áreas que apresentam altos valores de cânion, especialmente nas regiões norte e oeste, enquanto valores mais baixos estão associados a áreas com menor formação de cânion, sobretudo a leste. Isso reforça a hipótese de que os cânions atuam como barreiras físicas, dificultando a dispersão dos poluentes.

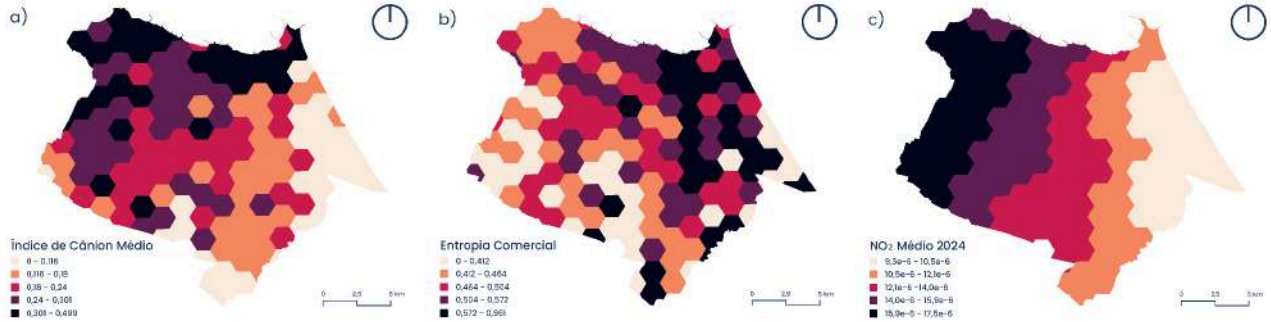


Figura 1: a) Cânion Médio; b) Entropia Comercial e; c) NO_2 Médio

A Figura 2 apresenta os Níveis de Risco Poluição-TUC, resultantes da combinação das variáveis analisadas. Os valores mais altos concentram-se nas regiões norte e noroeste, onde há coincidência espacial entre elevados índices de cânion e altas concentrações de NO_2, evidenciada por um Índice de Moran de 0,581, que indica forte associação espacial entre essas variáveis. Em contraste, a relação entre entropia comercial e NO_2 é praticamente inexistente (valor de -0,022), sugerindo que, embora áreas com maior diversidade de estabelecimentos possam gerar mais emissões, os poluentes não permanecem necessariamente no local de origem, sendo transportados pela dispersão atmosférica e acumulados em regiões onde os cânions dificultam a dispersão. Esse resultado evidencia que os cânions urbanos exercem papel central na concentração de poluentes, criando condições em que áreas com menor geração local de emissões podem, ainda assim, sofrer de forma significativa os impactos ambientais do transporte de carga.

A análise espacial indica que a direção predominante dos ventos, de sudeste para noroeste, aliada à sucessão de barreiras físicas formadas pelos cânions urbanos, aumenta a concentração os níveis de risco. Nas áreas a leste, mais próximas da principal fonte de ventilação, a maior velocidade dos ventos e a menor presença de cânions favorecem a dispersão, enquanto nas áreas centrais e, sobretudo, no oeste, os cânions intensificam a retenção do poluente, elevando os riscos ambientais. Essa dinâmica é particularmente preocupante do ponto de vista social, já que, segundo dados do Censo 2022 do IBGE, cerca de 45% dos domicílios de Fortaleza estão localizados nos dois quintis mais altos do índice de risco. Isso demonstra a necessidade urgente de políticas públicas que integrem planejamento urbano e gestão logística, com o objetivo de reduzir as desigualdades na exposição aos poluentes e mitigar os impactos do transporte urbano de carga sobre as populações mais vulneráveis.

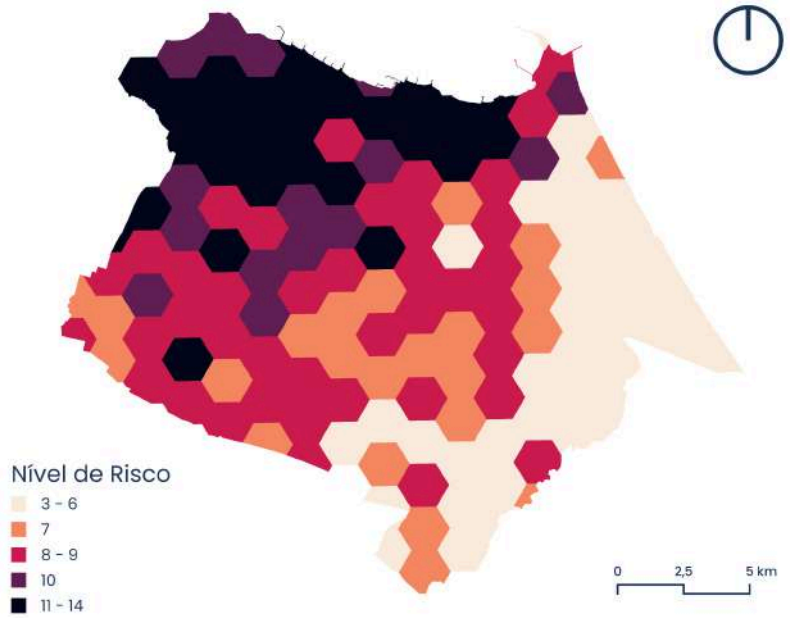


Figura 2: Níveis de Risco Poluição-TUC

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo identificar as zonas de Fortaleza mais afetadas pelas emissões de poluentes e compreender como essas concentrações se relacionam com o transporte urbano de carga (TUC), considerando tanto os padrões espaciais de atividade comercial, representados pela entropia, quanto os aspectos físicos da cidade, como os cânions urbanos. Os resultados revelaram que as regiões norte e noroeste concentram os maiores níveis de risco, onde a presença de cânions urbanos e altas concentrações de NO_2 coincidem espacialmente. Esse padrão indica que os poluentes não permanecem restritos aos locais de emissão, sendo transportados pela ventilação predominante de sudeste para noroeste e acumulando-se em áreas onde os cânions atuam como barreiras à dispersão. Assim, mesmo zonas que não são grandes emissoras podem sofrer os impactos ambientais do TUC, evidenciando uma desigualdade na distribuição dos efeitos da poluição atmosférica. Essa dinâmica é especialmente crítica do ponto de vista social, já que aproximadamente 45% dos domicílios da cidade estão localizados nas áreas com maior nível de risco, o que reforça a urgência de políticas públicas integradas que articulem o planejamento urbano, o zoneamento logístico e estratégias de mitigação dos impactos do transporte de carga sobre populações vulneráveis.

Além de demonstrar como as características físicas e funcionais da cidade influenciam a distribuição espacial da poluição, este estudo contribui para o desenvolvimento de ferramentas analíticas que podem apoiar gestores públicos, planejadores urbanos e operadores logísticos na formulação de soluções mais eficazes para reduzir os impactos ambientais do TUC. Recomenda-se, como desdobramentos futuros, o aprofundamento de algumas questões: (i) investigar o papel dos cânions urbanos não apenas como barreiras, mas também como potenciais túneis de propagação, dependendo de sua orientação em relação à direção dos ventos; (ii) aplicar a metodologia em cidades mais distantes da costa, onde os padrões de ventilação e dispersão atmosférica podem ser distintos; e (iii) desenvolver modelagens computacionais mais detalhadas, incorporando dados sobre a malha urbana, características das edificações e localização das principais fontes de emissão. Essas abordagens ampliariam a compreensão dos processos analisados e fortaleceriam a formulação de políticas que conciliem eficiência logística e justiça ambiental no contexto urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alho, A. R., e de Abreu e Silva, J. (2015) Utilizing urban form characteristics in urban logistics analysis: a case study in Lisbon, Portugal. Journal of transport geography, 42, 57–71. doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.11.002

Brusselaers, N., Macharis, C., e Mommens, K. (2023) The health impact of freight transport-related air pollution on vulnerable population groups. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987), 329, 121555. doi:10.1016/j.envpol.2023.121555

da Silva, M. J., de Brito, B. R. A., e Bertoncini, B. V. (2024) IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL EMISSOR DOS

CORREDORES DE CARGA URBANA A PARTIR DE CÂNIONS URBANOS E PERFIL LOGÍSTICOS. Anais do 38^o Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Obtido de https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/autores/mateus-joter-da-silva?lang=pt-br

Dablanc, L. (2011) City distribution, a key element of the urban economy: Guidelines for practitioners. City Distribution and Urban Freight Transport. Edward Elgar Publishing.

Gäal, L. P. M. (2017) Impacto da geometria urbana e da legislação de uso e ocupação do solo no microclima de cânions urbanos. PUC-Campinas. Obtido 10 de setembro de 2025, de https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/xmlui/handle/123456789/15128

Grondys, K. (2019) The impact of freight transport operations on the level of pollution in cities. Transportation research procedia, 39, 84–91. doi:10.1016/j.trpro.2019.06.010

Hall, P. V., e Hesse, M. (Eds). (2012) Cities, regions and flows. Not Avail.

Hesse, M. (2004). LAND FOR LOGISTICS: LOCATIONAL DYNAMICS, REAL ESTATE MARKETS AND POLITICAL REGULATION OF REGIONAL DISTRIBUTION COMPLEXES: Land for logistics. Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie [Journal of Economic and Social Geography], 95(2), 162–173. https://doi.org/10.1111/j.0040-747x.2004.t01-1-00298.x

Hesse, M. (2012) The city as a terminal: The urban context of logistics and freight transport. Ashgate Publishing, Londres, England.

Kijewska, K., Konicki, W., e Iwan, S. (2016) Freight transport pollution propagation at urban areas based on Szczecin example. Transportation research procedia, 14, 1543–1552. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.119

Kin, B., Verlinde, S., e Macharis, C. (2017) Sustainable urban freight transport in megacities in emerging markets. Sustainable cities and society, 32, 31–41. doi:10.1016/j.scs.2017.03.011

Oliveira, L. K., Barraza, B., Bertocini, B. V., Isler, C. A., Pires, D. R., Madalon, E. C. N., Lima, J., Vieira, J. G. V., Meira, L. H., Bracarense, L. S. F. P., Bandeira, R. A., Oliveira, R. L. M., e Ferreira, S. (2018) An overview of problems and solutions for urban freight transport in Brazilian cities. Sustainability, 10(4), 1233. doi:10.3390/su10041233

ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050. ([s.d.]) Brasil. Obtido 14 de julho de 2025, de https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050

Pinheiro, C. D. P., Gonzalez Feliu, J., & Bertoncini, B. V. (2025). Addressing spatial heterogeneity and MAUP in urban transport geography: A multi-scale analysis of accessibility and warehouse location. Journal of Transport Geography, 123(104078), 104078. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.104078

Santos, J. E. D. dos. (2024) Análise da vulnerabilidade da rede viária urbana na acessibilidade do transporte urbano de cargas sob a ótica da emissão de CO2. Ufc.br. Obtido 10 de setembro de 2025, de http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79221

Trip, J. J., e Konings, J. (2014) Supporting electric vehicles in freight transport in Amsterdam. Obtido de https://repository.tudelft.nl/file/File_eb225026-1154-4296-ae92-db1ca624278c?preview=1

Vieira, Y. E. M., Francisco, F. de R., Bandeira, R. A. de M., Silva Junior, O. S. da, D'Agosto, M. de A., e Vieira, J. G. V. (2021) Iniciativas do poder público para o transporte urbano de carga: perspectivas de impacto no cenário brasileiro. urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana, 13. doi:10.1590/2175-3369.012.e20200034

Wang, H., Han, J., Su, M., Wan, S., e Zhang, Z. (2021) The relationship between freight transport and economic development: A case study of China. Research in transportation economics, 85(100885), 100885. doi:10.1016/j.retrec.2020.100885

Yuan, Q. (2018) Mega freight generators in my backyard: A longitudinal study of environmental justice in warehousing location. Land use policy, 76, 130–143. doi:10.1016/j.landusepol.2018.04.013

Yuan, Q. (2021). Location of warehouses and environmental justice. Journal of Planning Education and Research, 41(3), 282–293. https://doi.org/10.1177/0739456x18786392

Mateus Joter da Silva (mateusjoter@alu.ufc.br)
Bruno Reges Almeida de Brito (bruno.debrito@det.ufc.br)
Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, R. Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza, CE, Brasil

CIDADES ESPONJA E INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE: CONEXÕES ENTRE SUSTENTABILIDADE URBANA E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA

Rafael Ferraz dos Santos[1], Valéria Xavier da Costa[1], Ciça Kaline Cruz Rosa[1], Rodrigo de Lima Nunes[1], Victor Hugo Souza de Abreu[2], Andrea Souza Santos[1]
[1]PET/COPPE/UFRJ, [2]DET/POLI/UFRJ

RESUMO
A intensificação de eventos climáticos extremos, causada pela mudança do clima, impõe desafios globais que exigem respostas urbanas adaptativas, integradas e sustentáveis. A urbanização acelerada e desordenada criou deficiências na gestão de águas pluviais, aumentando a vulnerabilidade das cidades. Nesse cenário, a cidade esponja surge como abordagem inovadora para absorção, retenção e reutilização da água da chuva, conectada ao tecido urbano. Infraestruturas de transporte, especialmente rodovias e vias urbanas, ganham papel central ao incorporar pavimentos permeáveis, sistemas de biorretenção e barreiras vegetativas, contribuindo para reduzir inundações, mitigar ilhas de calor e melhorar o ambiente urbano. Este estudo analisa o papel das cidades esponja como estratégia integrada de planejamento urbano sustentável, com ênfase em medidas adaptativas para infraestrutura de transporte, por meio de análise bibliométrica e revisão sistemática. Conclui-se que as SbNs trazem ganhos ambientais, operacionais e sociais, mas enfrentam entraves técnicos, normativos e institucionais; recomenda-se ampliar casos empíricos e políticas públicas para consolidar esse modelo.

Palavras Chave: Cidades esponja; Infraestrutura de transporte; Adaptação urbana; Sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

O conceito de "cidade esponja", introduzido por Van Rooijen (2005), tem ganhado relevância no planejamento urbano sustentável (HAMIDI *et al.*, 2021). Fundamentado na preservação dos ecossistemas, na recuperação de áreas degradadas e na integração de práticas sustentáveis ao ordenamento urbano, esse modelo busca tornar os centros urbanos mais resilientes diante dos impactos da mudança do clima (WANG e YI, 2016). Ao incorporar Soluções baseadas na Natureza (SbNs), propõe-se a conciliação entre estruturas urbanas e sistemas naturais. Diante da crescente frequência de eventos extremos, os sistemas convencionais de drenagem têm se mostrado insuficientes, agravando as inundações, alagamentos e a contaminação difusa em áreas urbanas. Nesse cenário, o paradigma das cidades esponja propõe tecnologias verdes voltadas à retenção, infiltração, purificação e mitigação dos fluxos hídricos (HLUSHCHENKO *et al.*, 2022). As infraestruturas de transporte, por sua capilaridade e presença territorial, tornam-se estratégicas para a aplicação dessas soluções. Destaca-se, nesse contexto, o conceito de "rua verde" ou "ruas completas", que integra drenagem sustentável, mobilidade ativa e qualificação dos espaços públicos por meio de dispositivos como valas de infiltração, jardins de chuva e bacias de bio-retenção (WANG e YI, 2016). Este estudo tem como objetivo analisar o papel das cidades esponja enquanto estratégia de adaptação urbana, com ênfase na integração de SbNs às infraestruturas de transporte. Para isso, discute-se a evolução conceitual do modelo, os limites das estruturas viárias tradicionais, os benefícios e desafios das SbNs no contexto do transporte urbano e o potencial das ruas verdes como soluções multifuncionais para o espaço urbano contemporâneo.

2. METODOLOGIA

Este artigo adota uma revisão sistemática da literatura, aliada à análise bibliométrica, com o objetivo de identificar como o conceito de cidade esponja tem sido aplicado às infraestruturas de transporte. A primeira etapa da pesquisa consistiu em uma busca na base de dados Scopus, utilizando a expressão: *("Sponge Cit*") AND ("road*" OR "highway*" OR "street*" OR "avenue*" OR "lane*" OR "boulevard*")*. Essa formulação foi elaborada para associar o termo central a diferentes tipologias viárias urbanas, considerando que essas palavras-chave, todas em inglês, refletem a predominância desse idioma na produção científica internacional. Para complementar essa análise e abranger aspectos relacionados à mitigação de inundações e à drenagem urbana sustentável — temas diretamente ligados à proposta das cidades esponja —, foi também realizada uma revisão bibliográfica adicional voltada especificamente para esses enfoques. A inserção dessas combinações, detalhadas na Tabela 1, resultou em 150 registros na referida base de dados.

A Figura 1 ilustra o processo metodológico onde, após a escolha da base de dados *Scopus* e das palavras chaves consideradas mais relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, foi criado um repositório das referências encontradas. Após *brainstorming* entre os autores, com base nos títulos e resumos dos estudos, determinou-se

os artigos a serem utilizados como referências para o desenvolvimento do presente estudo. Por fim, realizou-se análise detalhada dos estudos selecionados, escolha dos subtemas a serem desenvolvidos e apresentação dos resultados sistemáticos conforme Capítulo 4.

Tabela 1: Descrição das estratégias de busca aplicadas no presente estudo

Critérios	**Descrição**
Tópicos	*TS = ("Sponge Cit*") AND ("road*" OR "highway*" OR "street*" OR "avenue*" OR "lane*" OR "boulevard*")*
Método de pesquisa	Busca direta
Inclusão	Tempo de cobertura: todos os anos do banco de dados (2013-2025)
Base de Dados	Scopus
Data da Busca	15 de maio de 2025



Figura 1: Processo metodológico adotado

3. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

A estratégia de busca resultou em 150 publicações sobre o tema. A China concentrou 88% dos estudos (132), seguida pelos Estados Unidos com 6,7% (10), evidenciando o protagonismo chinês na integração entre SbNs e infraestrutura viária urbana (Figura 2).

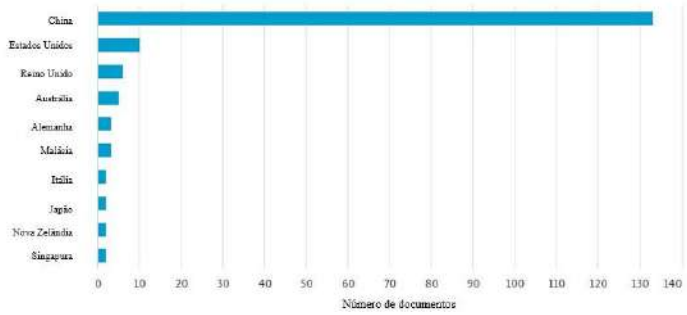


Figura 2: Gráfico documentos por país

A produção científica está concentrada entre 2013 e 2025, com crescimento contínuo até 2018 (15 publicações), leve queda em 2019, novo avanço até o pico em 2022 (28), e recuo posterior em 2024 (18). Em 2025, até a data da coleta, foram encontrados apenas dois artigos (Figura 3). A maioria dos documentos (76,7%) são artigos científicos, majoritariamente vinculados ao Ministério da Educação e universidades chinesas, o que reforça a liderança do país no desenvolvimento da temática.

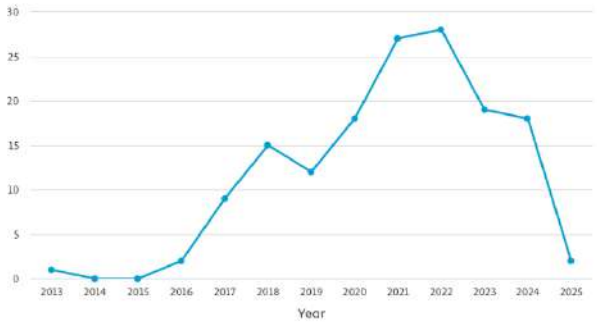


Figura 3: Gráfico temporal de produção de documentos

4. RESULTADOS SISTEMÁTICOS

A análise detalhada dos estudos reunidos no banco de dados possibilitou a realização de revisões sistemáticas, permitindo organizar e interpretar criticamente o vasto volume de informações provenientes de diferentes áreas do conhecimento. Tal abordagem foi viabilizada por uma metodologia de busca rigorosa, que assegurou a relevância e a consistência dos resultados. Nesta seção, são discutidos os principais tópicos identificados como centrais à temática durante o processo de revisão da literatura.

4.1. Evolução do Conceito de Cidades Esponja e Experiências Internacionais

O conceito de cidade esponja consolidou-se nos anos 2000 em articulação com abordagens como infraestrutura verde, desenvolvimento de baixo impacto (LID) e desenho urbano sensível à água (WSUD), que compartilham o objetivo de replicar processos hidrológicos naturais no ambiente urbano (WONG e BROWN, 2009). Sua difusão foi impulsionada pela incorporação das SbNs às agendas globais de adaptação climática e planejamento resiliente (LI *et al.*, 2017). Um marco dessa trajetória foi a atuação de Kongjian Yu, arquiteto responsável por projetos como o Parque Qiaoyuan, em Tianjin (2007), que utilizou zonas úmidas e bacias de bio-retenção para mitigar inundações e recuperar áreas degradadas (YU, 2012). A consolidação política e normativa do modelo ocorreu com o lançamento do *Sponge City Program*, na China, em 2015, a partir de diretrizes do Ministério de Habitação e Desenvolvimento Urbano-Rural (MOHURD, 2014), que estabeleceu metas de retenção de águas pluviais e fomentou intervenções como telhados verdes, pavimentos permeáveis e reservatórios de infiltração em 30 cidades-piloto (GRIFFITHS *et al.*, 2020). Avaliações indicam que, além da mitigação de inundações, os projetos têm gerado ganhos em resiliência urbana, conforto térmico e qualidade de vida, embora persistam desafios de manutenção e coordenação institucional (QI et al., 2021; BONCHEVA, 2022). A experiência chinesa tem influenciado iniciativas em cidades como Los Angeles, Daca e Rotterdam, além de fomentar parcerias internacionais, como a cooperação China–Reino Unido para o desenvolvimento urbano (DONG e HAN, 2011).

4.2. Limitações das Estruturas Viárias Tradicionais frente aos Novos Regimes de Precipitação

A eficácia das cidades esponja depende do reconhecimento das limitações das infraestruturas viárias convencionais, majoritariamente projetadas com base em parâmetros climáticos históricos. Essas estruturas mostram-se cada vez mais vulneráveis diante da intensificação dos eventos extremos, apresentando restrições quanto à capacidade de drenagem, durabilidade e desempenho funcional (ABU-EL-MAQSOOD *et al.*, 2016). O aumento da frequência e magnitude das chuvas sobrecarrega sistemas de escoamento dimensionados para volumes inferiores, resultando em alagamentos, degradação da base estrutural das vias e elevação do risco de acidentes. A exposição prolongada à saturação hídrica compromete o desempenho do pavimento asfáltico, gerando fissuras, desagregações e deformações (FERREIRA *et al.*, 2021), especialmente em áreas periféricas com drenagem deficiente, onde também se agravam processos erosivos e instabilidade de taludes (SILVA e LOPES, 2020). A obsolescência das redes pluviais, muitas vezes mal-conservadas e subdimensionadas, agrava o problema, sobretudo pela acumulação de resíduos e sedimentos (GHISI e FONSECA, 2022). A impermeabilização crescente do solo urbano intensifica o escoamento superficial, reduz a infiltração natural e pressiona ainda mais os sistemas existentes (FRANÇA e LOURES, 2019). Tais fragilidades comprometem a resiliência da malha viária, com impactos sobre a mobilidade, a logística e os custos operacionais. Além disso, os modelos de planejamento seguem baseados em médias pluviométricas históricas e normas técnicas defasadas, desconsiderando os cenários de intensificação dos extremos climáticos (IPCC, 2022). Isso evidencia a urgência de revisão dos critérios hidráulicos e estruturais (BARBOSA *et al.*, 2020) e da incorporação de soluções resilientes como ruas verdes, pavimentos permeáveis e sistemas de bioengenharia, alinhados à lógica das cidades esponja.

4.3. SbNs em Sistemas de Transporte Urbano: Benefícios e Limitações

As SbNs aplicadas ao setor de transportes se traduzem em dispositivos como pavimentos permeáveis, valas de infiltração, bacias de bio-retenção, telhados verdes em terminais e corredores viários vegetados. Esses elementos promovem a drenagem descentralizada, mitigam ilhas de calor, melhoram a qualidade da água e ampliam a biodiversidade urbana (IUCN, 2020; EC, 2021). Em termos operacionais, reduzem alagamentos em vias críticas, aumentam a infiltração nas bordas das faixas de rolamento e viabilizam o armazenamento temporário da água pluvial, reduzindo os picos de escoamento (ZHANG *et al.*, 2022). Do ponto de vista técnico, destacam-se a flexibilidade de adaptação a diferentes contextos urbanos e a integração com redes

cicloviárias e espaços públicos (CIRIA, 2015). Contudo, sua implementação enfrenta entraves como a ausência de normatização técnica, a escassez de profissionais capacitados e a carência de dados empíricos sobre seu desempenho estrutural e hidrológico (LI *et al.*, 2021). Em países com restrições financeiras, esses desafios se agravam pela falta de financiamento voltado à manutenção e ao monitoramento contínuo (FRANK *et al.*, 2019). Ainda que os custos iniciais sejam comparáveis aos das soluções convencionais, a avaliação de custo-benefício exige a consideração de externalidades ambientais e sociais, frequentemente ausentes nos processos licitatórios (RIZVI *et al.*, 2015). Casos em cidades como Portland, Melbourne e Xangai demonstram que a adoção de SbNs em corredores de transporte gera benefícios sistêmicos, como a valorização do entorno e a redução do tempo de inatividade viária (ECLAC, 2020), reforçando a necessidade de um arcabouço institucional sólido, pesquisa aplicada e requalificação profissional alinhada aos princípios ecológicos.

4.4. Rua Verde e Infraestrutura Multifuncional: Mobilidade, Drenagem e Qualificação Urbana

O conceito de rua verde expressa a convergência entre infraestrutura de transporte, gestão hídrica e paisagismo urbano, configurando-se como uma solução multifuncional voltada à construção de cidades mais resilientes e sustentáveis. Esses dispositivos integram circulação viária, infiltração de águas pluviais, arborização e qualificação ambiental dos espaços públicos (EPA, 2017; LOUKIL e BOUZAHER, 2021). Do ponto de vista funcional, envolvem o uso de valas de infiltração, canteiros pluviais, pavimentos permeáveis e arborização linear para controlar o escoamento, recarregar o lençol freático e mitigar inundações e ilhas de calor (CIRIA, 2015; LIU *et al.*, 2020). Além disso, favorecem a mobilidade ativa, com calçadas ampliadas, ciclovias segregadas e mobiliário urbano, promovendo segurança viária e redução de emissões (COSTANZI *et al.*, 2020). No entanto, sua implementação demanda planejamento integrado, revisão normativa e articulação intersetorial. Os principais desafios incluem a fragmentação da gestão urbana, a resistência à inovação por parte de órgãos técnicos e a ausência de indicadores consolidados de desempenho (SLOCUM, 2022; MONTEIRO *et al.*, 2023), o que evidencia a urgência de políticas públicas e diretrizes normativas que institucionalizem a rua verde como tipologia viária no planejamento urbano.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu evidenciar a centralidade do conceito de cidades esponja no enfrentamento dos desafios urbanos decorrentes da intensificação dos eventos climáticos extremos, com ênfase na aplicação de SbNs às infraestruturas de transporte. A análise bibliométrica revelou o protagonismo chinês na produção científica sobre o tema, refletido na implementação de projetos em cidades como Pequim, Xangai e Wuhan, que consolidaram diretrizes nacionais voltadas à adaptação climática por meio da reestruturação dos sistemas urbanos de drenagem. A partir da revisão sistemática, se observou que a integração entre drenagem sustentável e mobilidade urbana, materializada no conceito de ruas verdes, representa uma estratégia multifuncional com potencial para qualificar o espaço viário, mitigar alagamentos e estimular deslocamentos ativos e de baixa emissão. Tais soluções demonstram capacidade de atenuar vulnerabilidades estruturais das infraestruturas viárias convencionais frente aos novos regimes hidrológicos, promovendo simultaneamente ganhos ambientais, operacionais e sociais. No entanto, a adoção das SbNs no setor de transportes ainda é limitada por entraves técnicos, normativos e institucionais, especialmente em contextos urbanos marcados pela fragmentação da gestão pública e pela carência de mecanismos de monitoramento e financiamento contínuo. Nesse sentido, recomenda-se que futuras investigações aprofundem a análise de estudos de caso empíricos, de modo a avaliar a eficácia operacional das intervenções, identificar barreiras contextuais e contribuir para a formulação de políticas públicas que viabilizem a consolidação das cidades esponja como modelo estruturante de planejamento urbano resiliente e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-EL-MAQSOOD, Ahmed; DANIEL, Jo Sias; DAWSON, Andrew R.; MOUSTAFA, Mohamed M. Impact of Water Saturation on Asphalt Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering*, v. 142, n. 1, p. 1–9, 2016.

BARBOSA, Maria Clara; SANTOS, João Roberto dos; PEREIRA, Valéria Silva. Mudanças climáticas e infraestrutura de transporte: desafios e diretrizes para adaptação. *Revista Transporte e Desenvolvimento*, v. 8, n. 2, p. 55–72, 2020.

BONCHEVA, Anelia. Urban sponge city model for sustainable stormwater management. *Journal of Environmental Management*, v. 314, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115003.

CONSTRUCTION INDUSTRY RESEARCH AND INFORMATION ASSOCIATION (CIRIA). Delivering green infrastructure: A guide to the process. Londres: CIRIA, 2015.

COSTANZI, Rafael Nascimento; ANSILIERO, Gustavo; YOUNG, Carlos Eduardo S. Infraestrutura verde urbana e

governança ambiental: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, p. 1–19, 2020.

DONG, Li; HAN, Jie. Sponge city and urban stormwater management in China: A case study of pilot cities. *Water Practice & Technology*, v. 6, n. 4, p. 1–10, 2011.

ECONOMIC COMMISSION FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN (ECLAC). *Nature-based infrastructure in Latin America and the Caribbean: a policy and finance guide*. Santiago: United Nations, 2020.

EUROPEAN COMMISSION (EC). *Evaluating the impact of nature-based solutions: a handbook for practitioners*. Bruxelas: Publications Office of the European Union, 2021.

FERREIRA, Daniel F.; OLIVEIRA, Carlos H. S.; PEREIRA, Marcos A.; SILVA, Juliana M. Desempenho de pavimentos flexíveis sob condições de saturação prolongada. *Revista de Engenharia Civil*, v. 28, n. 1, p. 23–36, 2021.

FRANÇA, Maria Regina; LOURES, Lucas P. Impermeabilização urbana e drenagem insuficiente: implicações para as vias públicas. *Revista Brasileira de Planejamento Urbano*, v. 15, n. 3, p. 112–128, 2019.

FRANK, Stefan; SMITH, Anna; JOHNSON, David; DAVIS, Emily. Adoption of nature-based solutions in urban water management: barriers and opportunities. *Environmental Science & Policy*, v. 96, p. 87–96, 2019.

GHISI, Enedir; FONSECA, Rafael S. Eficiência de sistemas urbanos de drenagem diante das mudanças climáticas. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 36, n. 1, p. 89–103, 2022.

GRIFFITHS, James A.; WEI, Li; ZHANG, Chen; GONZALEZ, Maria. Sponge cities as nature-based solutions for urban resilience: Policy, design, and evaluation frameworks. *Urban Water Journal*, v. 17, n. 9, p. 823–835, 2020.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). *Nature-based solutions for climate change adaptation and disaster risk reduction*. Gland: IUCN, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LI, Fang; LIU, Jian; ZHOU, Wei; ZHAO, Min. Assessment of the sponge city program in China: Achievements, challenges, and opportunities. *Water*, v. 9, n. 9, p. 594–608, 2017.

LI, Yuan; WANG, Xiao; ZHANG, Hui; CHEN, Ling. Performance evaluation of green infrastructure for stormwater management in urban areas: a review. *Environmental Reviews*, v. 29, n. 4, p. 485–497, 2021.

LIU, Wei; SUN, Qiang; CHEN, Ying; LI, Bo. Evaluating the multifunctionality of green streets in urban stormwater management. *Science of the Total Environment*, v. 707, p. 135569, 2020.

LOUKIL, Hichem; BOUZAHER, Ahmed. Integrating Green Streets in Urban Planning: Performance and Implementation Challenges. *Sustainable Cities and Society*, v. 66, p. 102675, 2021.

MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA (MOHURD). *Technical guidelines for sponge city construction*. Pequim: MOHURD, 2014.

MONTEIRO, Daniela M.; PEREIRA, Lucas A.; SILVA, Fernanda R.; SOUZA, Carlos E. Desempenho técnico e social de ruas verdes: estudo de caso em áreas urbanas brasileiras. *Revista Transporte e Desenvolvimento*, v. 11, n. 2, p. 85–102, 2023.

QI, Xiaoqing; LI, Mei; WANG, Zhen; ZHANG, Tao. The implementation of sponge city policy in China: Evidence from Gui'an New Area. *Sustainable Cities and Society*, v. 74, 2021.

RIZVI, Ali R.; SMITH, Nina; TORRES, Carlos M.; JOHNSON, Linda K. Natural solutions: integrating ecosystem services into urban planning. *UNEP Report*, Nairobi: United Nations Environment Programme, 2015.

SILVA, Carlos R.; LOPES, Maria J. Instabilidade de taludes e erosão em vias urbanas em função da chuva intensa. *Geotecnia Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 77–90, 2020.

SLOCUM, Rebecca. Governance and barriers to implementing green streets in urban infrastructures. *Urban Planning International*, v. 37, n. 1, p. 51–64, 2022.

VAN ROOIJEN, Daniel J.; TOZE, Steve; BIGGS, Travis; KERSTEN, George; KHAN, Sarfraz. Urban water balance modelling to evaluate the water resources impact of urban development in the developing world: A case study of Hyderabad, India. *Urban Water Journal*, v. 2, n. 2, p. 139–148, 2005.

WANG, Rong; YI, Shun. Sponge City Construction and Eco-Urbanism in China. *Landscape Architecture Frontiers*, v. 4, n. 3, p. 14–27, 2016.

WONG, Tony H. F.; BROWN, Rebekah R. The water sensitive city: principles for practice. *Water Science & Technology*, v. 60, n. 3, p. 673–682, 2009.

YU, Kongjian. The sponge city: Ecological wisdom for urban resilience. *Landscape Architecture Frontiers*, v. 1, n. 1, p. 4–21, 2012.

ZHANG, Ying; LIU, Hao; WU, Jing; CHEN, Lei. Quantifying the effectiveness of green infrastructure on runoff mitigation in urban road systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 354, p. 131724, 2022.

CONTRIBUIÇÃO DO BIODIESEL PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO2 E MATERIAL PARTICULADO

Joyce Azevedo Caetano[2] , Rodrigo Rodrigues de Freitas[1] , Cintia Machado de Oliveira[1] , Luís Eduardo Santos Fortes[1,2] , Larissa Rodrigues Turini[2]
[1]Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RJ, [2]Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE/PET

RESUMO
O setor de transporte, no uso de combustíveis fósseis como diesel, contribui para doenças respiratórias e impactos ambientais graves. No Brasil, o diesel representa 55% das emissões veiculares de CO2, totalizando 112 MtCO2e. O biodiesel surge como alternativa sustentável, com maior eficiência energética e potencial de redução de até 88% nas emissões de gases de efeito estufa, embora apresente desvantagens como maior emissão de NOx. A metodologia proposta utiliza abordagem *top-down* baseada no consumo regional de diesel para estimar emissões de CO2 e material particulado, facilitando a aplicação por gestores locais. Entre 2014 e 2023, houve redução de 42% nas emissões de CO2 provenientes do diesel, refletindo mudanças no consumo e frota, enquanto as emissões de material particulado diminuíram 4,5%. O estudo destaca a importância de políticas públicas e práticas de condução sustentáveis para melhorar a qualidade do ar e a saúde pública.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os efeitos resultantes da poluição nas emissões de gases no setor de transporte contribuem para o aumento de doenças respiratórias em escala global. A liberação de substâncias prejudiciais ao meio ambiente e a aglomeração populacional nos grandes centros urbanos favorecem o surgimento de doenças associadas à utilização de combustíveis fósseis. De acordo com Glaeser e Kahn (2010), as emissões de CO2 provenientes de veículos automotores são, em média, 50 vezes superiores às emissões per capita de um condutor de ônibus. A poluição atmosférica foi responsável por 20 mil óbitos no Brasil e 1,15 milhão em escala global, representando aproximadamente 2% do total de mortes (ÖBERG et al., 2011). No contexto brasileiro, a utilização de combustíveis derivados do petróleo para o transporte desempenha um papel significativo, pois emite 204 MtCO2e, a parcela dedicada ao uso do diesel é 55% ou 112 MtCO2e (FERREIRA et al., 2017).

2. REVISÃO DA LITERATURA – UMA ABORDAGEM EM TRANSPORTE DE CARGA

A principal vantagem do biodiesel reside na relação do balanço energético, que representa a quantidade total de energia gerada pelo biocombustível em comparação com a energia fóssil investida em sua produção. Conforme indicado por Boddey (2008), a eficiência na aplicação da energia fóssil para a geração de energia pelo biocombustível é nove vezes maior (EPE, 2024). O biodiesel serve como um substituto para o diesel, uma vez que o carbono liberado durante a combustão é absorvido durante o crescimento das plantas que fornecem o óleo. Rajaeifar (2017), destaca que a adoção do biodiesel de óleo de cozinha usado (UCO) pode resultar numa redução de até 88% nas emissões de gases de efeito estufa, além de eliminar resíduos poluentes.

De acordo com Guo et al. (2016), a utilização de veículos elétricos híbridos (HEV) com treinamento em Eco-driving pode produzir resultados satisfatórios, especialmente quando combinada com o uso de Global Positioning System (GPS) e um Sistema de Informação Geográfica (GIS). No entanto, a adição de biodiesel apresenta algumas desvantagens, como baixa estabilidade à oxidação, alta viscosidade, menor eficiência térmica e aumento nas emissões de Nox.

A distância viajada também desempenha um papel significativo na quantidade total de CO2 liberado. Quanto mais longo for o percurso percorrido por um veículo ou maior número de viagens para entregar uma carga, mais combustível será queimado e, consequentemente, mais CO2 será emitido. Isso destaca a importância não apenas da eficiência de combustível dos veículos, mas da maneira que os motoristas utilizam seus veículos, esse método é chamado de *Ecodriving*. A escolha de rotas mais curtas, o uso de transporte público ou a adoção de práticas de direção mais eficientes, reduz significativamente as emissões na atmosfera.

Para lidar com essas questões e reduzir a pegada de carbono dos veículos, muitos esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, como motores híbridos e elétricos, bem como a promoção de práticas de condução sustentáveis. Iniciativas para aumentar a conscientização sobre a importância de escolhas de transporte mais ecoeficientes e o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas também desempenham um papel crucial na busca por soluções mais sustentáveis para o setor de transporte.

O tratamento de dados é explicado pela aplicação de métodos empíricos ou simulados para a apuração de resultados. Deve-se testar modelos de maneira a apurar o melhor resultado. Contudo, a sua aplicação pode ser

explicada de acordo com características regionais, do mais complexo a mais simples aplicação. A revisão da literatura destaca o GHG Protocol - Greenhouse Gas Protocol, como o mais adequado pela sua simplicidade, baixo custo e rápida apuração dos resultados. Desta forma, é importante destacar os principais modelos de estimação de CO2, assim como de consumo de combustível.

3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica é elaborada com base no volume de diesel consumido em nível regional. A aplicação sob aspecto da frota ou cadastro total de veículos na cidade não é adequada, pois veículos de outras cidades podem circular temporariamente ou permanentemente na cidade. Essa distinção é apropriada para avaliar as emissões em áreas urbanas que carecem de dados sobre a frota circulante e não possuem informações sobre a curva de sucateamento. De acordo com Dodman (2009), a padronização para a realização de inventários apresenta algumas deficiências, especialmente devido à realização em anos distintos, o que complica as comparações de resultados.

A proposta é apresentada através uma abordagem *top-down* do *GHG Protocol* com algumas modificações. Esse método é importante no sentido de ser de fácil aplicação, baixo custo e observação, uma vez que, a gênesis dos dados são de origem nacional. Em relação à abordagem *bottom-up*, que ocorrem com apuração dos dados de maneira local, o método pode apresentar distorções que devem ser consideradas na análise. Como esse método exige maior esforço humano e recursos financeiros, a aplicação dessa abordagem é orientada para definir um resultado mais apurado. Logo, a maior orientação neste caso, seria a apuração dos resultados para a tomada de decisões em relação a aplicação de boas práticas e mudanças comportamentais. O objetivo desse trabalho é realizar uma abordagem de baixo custo para que as prefeituras, em suas localidades, possam realizar ações, de maneira a reduzir as emissões de gases e material particulado (MP) com enfoque na qualidade de vida da população local.

A Equação 1 demonstra a estimativa considerando o combustível.

$$Emissões\ de\ CO2\ (kg) = Fator\ de\ emissão\ de\ CO2\ (kg/l)\ *\ consumo\ de\ combustível \quad (1)$$

Para calcular as emissões por distância percorrida, considerar a Equação (2).

$$Combustível\ usado = Distância * Fator\ de\ Economia\ de\ Combustível \text{ usado (litros/l.km)} \quad (2)$$

Abaixo outras três alternativas para mensurar o consumo de energia, poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (Equações 3, 4 e 5).

$$Consumo\ de\ Energia\ (l, KWh\ ou\ Mj) = Fator\ consumo\ de\ energia\ (l.km \mid kWh.km \mid ou\ MJ.km)\ *\ quilometragem\ percorrida\ (km) \quad (3)$$

$$Poluentes\ Atmosférico\ (g) = Fator\ de\ emissão\ do\ poluente\ (g.km)\ *\ quilometragem\ percorrida\ (km); \quad (4)$$

$$\text{Emissão de outros GEE } (g) = Fator\ de\ emissão\ dos\ outros\ GEE\ (g.km)\ *\ quilometragem\ percorrida\ (km) \quad (5)$$

Esse método está dividido em quatro etapas indissociáveis para calcular as emissões de CO2 e MP (combustível, freios, pneus e pista) conforme demonstrado na Figura 1. Esse método é aplicado desde o nível nacional até a níveis locais, logo, quando os dados são homogêneos (nacionais), dentro de cada etapa deve-se aplicar a calibração em relação a participação da frota analisada.

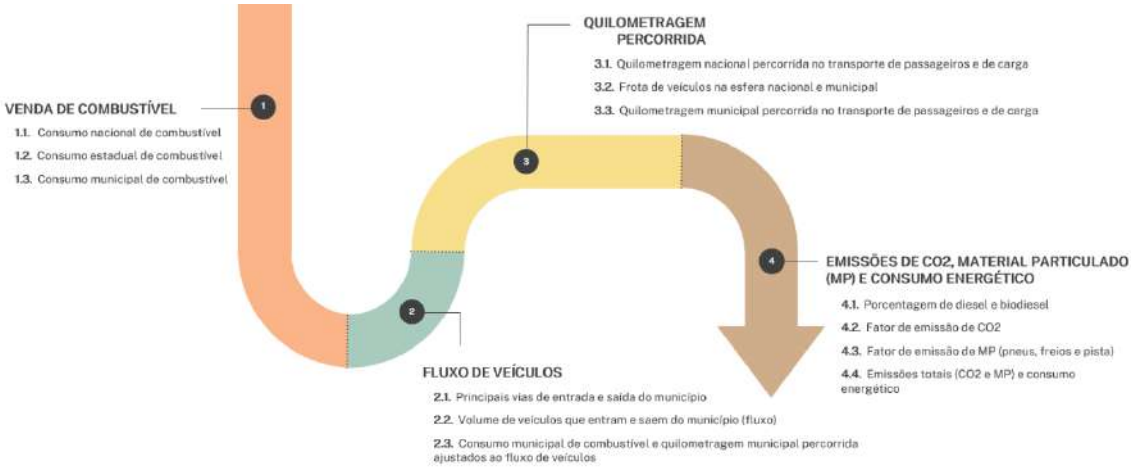


Figura 1: Diagrama do fluxo de trabalho com as etapas para mensurar as emissões de CO2 e material particulado no consumo de diesel. Fonte: Produção própria.

1ª Etapa: Venda de diesel para veículos

Na etapa inicial, a abordagem é empregada para quantificar o consumo de diesel na cidade. Dependendo do grau de confiabilidade da pesquisa, a aquisição de dados através da abordagem de baixo para cima (*bottom-up*) representa um aprimoramento na confiabilidade do consumo de diesel em nível regional.

Para obter o volume de diesel veicular (Dv), em relação ao diesel total produzido (Dt), neste caso, desde o nível nacional, estados ou cidade, utiliza-se a nomenclatura a para um nível superior e b para um nível inferior. De toda forma, o procedimento ilustra a obtenção de dados em âmbito nacional (*top-down*), empregando a participação da frota a diesel (Fd) e a participação da frota total analisada (Ft). Esses dados são utilizados como variáveis da calibração da participação da frota de veículos (Cf) e proporção de combustível (Pc). As Equações 6 e 7, exemplificam a calibragem e as Equações 8 e 9, a obtenção do consumo de diesel.

$$Cf_{\frac{b}{a}} = \frac{Fd_b}{Ft_a} \quad (6)$$

$$Pc_{\frac{b}{a}} = \frac{Fd_b}{Fd_a} \quad (7)$$

$$Dv_a = Cf_a * Pc_a \quad (8)$$

$$Dv_b = Pc_{\frac{b}{a}} * Dnv_a \quad (9)$$

Na primeira etapa, o principal objetivo é verificar o consumo de diesel por veículos nas cidades.

2ª Etapa: Fluxo de veículos

A segunda etapa é empregada para determinar o fator de compensação entre o fluxo de entrada e fluxo de saída de veículos rodoviários em determinado tempo, que consomem diesel na área analisada. A aplicação dessa etapa é realizada de acordo com as características da localidade, pois depende do posicionamento da cidade em relação a rodovias, pedágios, avenidas, áreas limítrofes etc. O fator de fluxo de veículos é empregado para calcular a correção dos veículos que após o abastecimento, eles emitem gases além dos limites da localidade onde foram abastecidos. Esse saldo poderá ser positivo ou negativo e deverá ser compensado do saldo final da venda de diesel. A Equação 10 exemplifica o fator do fluxo de veículo a diesel, Flx.

$$Flx_t = \frac{Vs}{Ve} \quad (10)$$

3ª Etapa: Quilometragem viajada

Na terceira etapa, realiza-se o cálculo da quilometragem média por veículo a diesel na área urbana e efetua-se o ajuste de acordo com o movimento dos veículos a diesel. A informação essencial é a quilometragem viajada na cidade ou a intensidade (*Kvc*). Na Equação 4.31 o resultado foi obtido através do produto da proporção do total de veículos a diesel na cidade pela quilometragem rodada nacional por veículos de consumo a diesel.

$$Kv_b = Kv_a * Pc_{\frac{b}{a}} \quad (11)$$

4ª Etapa: Emissões de CO2 e MP

O fator de fluxo de veículo é empregado para corrigir o volume efetivo de veículos a diesel na cidade. Dessa maneira, é possível calcular o diesel consumido ajustado na cidade (*Dva*), a partir da Equação 4.32, e a quilometragem viajada ajustada na cidade (*Kva*), a partir da Equação. 4.33. O resultado é obtido multiplicando

as Equações 9 e 10 para calcular o consumo de diesel ajustado, e o produto das Equações 10 e 11 para determinar a quilometragem ajustada.

$$Dva = Flx * Dv_b \quad (12)$$

$$Kva = Flx * Kv_b \quad (13)$$

Para calcular as emissões de CO2, conforme a Equação 14, deve-se verificar a proporção e o fator de emissão do diesel (D) e fator de emissão do biodiesel (B) nas proporções permitidas em cada fase do PROCONVE.

$$CO_2 = Dva[(\%D * Ftd) + (\%B * Ftb)] \quad (14)$$

Para calcular as emissões de MP nas cidades, conforme a Equação 15, deve-se verificar o fator de emissão de cada particulado [combustível (*Fpc*), freios e pneus (*Fppf*) e pista (*Fpp*)] em relação a *Kva*.

$$MP^{10}_{total} kg/km = kva(Fpc + Fppf + Fpp) \quad (15)$$

A emissão de gases na atmosfera interage com as condições meteorológicas da cidade, e o sistema de transporte, especialmente os veículos a diesel, tem desempenhado um papel significativo na qualidade de vida da população. Segundo Ventura e Pinto (2013), Costa e Henkes (2013), e Loureiro (2005), as condições meteorológicas, em conjunto com os processos de combustão direta e indireta, contribuem para que os hidrocarbonetos (HC) e o óxido de nitrogênio (NOx) promovam a formação de ozônio (O3), que é particularmente prejudicial aos seres humanos. Além disso, as emissões provenientes de veículos não reconhecem limites políticos ou geográficos, disseminando-se pela atmosfera. Por isso a importância de desenvolver procedimentos operacional, administrativos e regulatórios para mensurar as emissões provenientes de gases emitidos por veículos. A Figura 2 demonstra todo processo para mensurar as emissões de gases e MP.

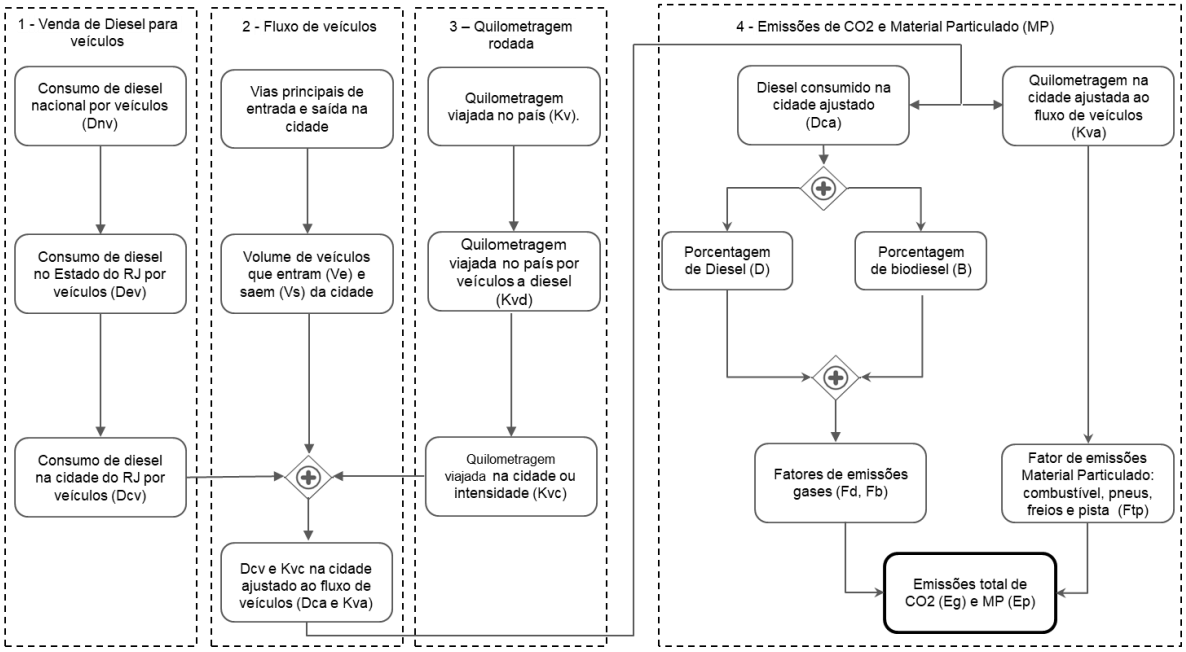


Figura 2: Processo esquemático para mensurar as emissões de CO2 e MP de forma regional a partir do volume de diesel e biodiesel. Fonte: produção própria. Legenda: Dnv= diesel nacional por veículos; Dev = diesel estadual por veículos, Dcv = diesel da cidade por veículos; Ve = veículos diários que entram na cidade; Vs = veículos diários que saem da cidade; *Kv* = quilometragem viajada no país; *Kvd* = quilometragem viajada no país a diesel; *Kvc* = quilômetros viajados na cidade por veículos a diesel; *Dca* = diesel consumido na cidade ajustado; *Kva* = quilometragem de veículos a diesel na cidade ajustado; D = participação de diesel; B = participação de biodiesel; Fd = fator total das emissões de diesel; Fb = fator total de biodiesel; Ftp = fator total de cada material particulado [combustível (*Fpc*), pneus e freios (*Fppf*), e pista (*Fpp*)]; Eg = emissões de $CO2$ e Ep = Emissões totais de material particulado.

O fundamento desse trabalho é desenvolver um procedimento *top-down*, acessível as secretárias de transportes (regional) para conhecer as emissões nas suas localidades e desenvolver políticas públicas que auxiliem a tomadores de decisão, assim como, a aplicação de boas práticas relacionadas a mudança de comportamento da população. A organização do trânsito, redução de gases poluentes e MP, aumento da caminhabilidade nas calçadas, aumento do transporte ativo, redução das ilhas de calor e poluição visual são condições que as cidades podem alcançar como benefício de externalidade para o bem-estar da população.

4. RESULTADOS

Os dados foram aplicados entre o período de 2001 a 2023. Em 2014 ocorreu o pico de consumo de combustível no Brasil, depois desse período houve uma redução no consumo de 41,79%, contudo durante a pandemia (depois de março de 2020), houve aumentos no consumo com a retomada econômica, logo, em 2023 apresentaram quedas sucessivas. Esses dados são recentes, mas podem refletir mudança do modo de transporte de carga, mudança no tipo de combustível utilizado e inclusão de veículos elétricos na frota circulante no estado do Rio de Janeiro. O aumento da frota de veículos é fator determinantes para o aumento de partículas emitidas por veículos a diesel. Entre 2014 e 2023, houve um crescimento de 29,86% na frota e entre os períodos de 2001 a 2023, o crescimento foi de 200%. Os fatores de cada MP são diferentes, porém são correlacionados enquanto os veículos percorrem.

Existe uma forte correlação positiva referente a venda de combustível e as emissões de CO2 proveniente do diesel de 0,9615 (Tabela 1), enquanto existe uma fraca correlação positiva referente a venda de combustível e as emissões de CO2 proveniente do biodiesel de 0,3688. Essa relação é explicada com a adição, distribuída em vários anos de biodiesel, 2% em 2007 até 12% em 2023.

Entre 2014 e 2023, o crescimento das emissões CO2 proveniente do biodiesel foi de 16,41%, alcançou em 2019, 42,93%; apresentando tendência de queda. Contudo, houve uma redução das emissões CO2 proveniente do diesel em 45,51%. Como a proporção de diesel é maior, logo houve um grande impacto na redução de CO2 em veículos a combustão a diesel desde 2014, o resultado total das emissões de CO2 apresenta uma considerada queda em 3,3 bilhões/kg ou 42,02% entre os períodos 2014 a 2023.

Os dados do MP estão relacionados com a quilometragem viajada por veículos a diesel no estado do Rio de Janeiro entre o período de 2001 a 2021. Desde 2014, as emissões de MP reduziram em 4,5%, independente da redução do consumo de combustíveis.

Tabela 1: Matriz de Correlação Linear (Person)

Indicadores	Consumo de diesel por ano [m³]	Emissão de CO2 - Diesel (kg/ano)	Emissão de CO2 - Biodiesel (kg/ano)	Emissões de MP M10 – Total [g/km]
Consumo de diesel por ano [m³]	1,0000	0,9615	0,3688	0,5672
Emissão de CO2 - Diesel (kg/ano)	0,9615	1,0000	0,0990	0,3285
Emissão de CO2 - Biodiesel (kg/ano)	0,3688	0,0990	1,0000	0,9421
Emissões de MP M10 – Total [g/km]	0,5672	0,3285	0,9421	1,0000

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A queda nas emissões de CO2 no Rio de Janeiro está fortemente ligada à redução do consumo de diesel, evidenciada pela alta correlação observada. O impacto do biodiesel, apesar de positivo, é limitado devido à sua menor participação na matriz energética. Entre 2014 e 2023, houve expressiva redução de 42,02% nas emissões totais e de 4,5% no material particulado, reforçando a importância de políticas integradas para eficiência e renovação da frota.

Agradecimentos

Expressamos nossa gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) através do Programa de Apoio a Projetos Científicos e Tecnológicos em Mobilidade Urbana-2021 - 260003/011958/2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boddey, R., Alves, B. J. R., Soares, L.H.B., Urquiaga, S. *Biological nitrogen fixation and the mitigation of greenhouse gas emissions*. Agronomy Monograph. 2009. doi:10.2134/agronmonogr52.c14. 2008.

EPE - Empresa De Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015.

Ferreira et al. E*missões dos Setores de Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos - SEEG*. Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA. 2017.

Glaeser, E. L., Kahn, M. E. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67, 404–418. 2010.

Öberg M, Jaakkola, M. S., Woodward, A., Peruga, A., Prüss-Ustün, A. Worldwide burden of disease from exposure to second-hand smoke: a retrospective analysis of data from 192 countries. *Lancet*. 377(9760):139-46. 2011. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)61388-8.

Rajaeifar, M. A. et al. Attributional and consequential environmental assessment of using waste cooking oil- and poultry fat-based biodiesel blends in urban buses: a real-world operation condition study. *Biofuel Research Journal* 15, 638-653. 2017. https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.3.3.

DESEMPENHO DAS ROTAS LOGÍSTICAS DE EXPORTAÇÃO DE SOJA: UMA ABORDAGEM ECONÔMICA E AMBIENTAL

Gleidisom Thyery Souza da Costa, Matheus Araújo Maciel, Thayane Caroline Oliveira da Conceição, Matheus Melo de Souza, Andréa Leda Ramos de Oliveira, Karina Braga Marsola, Richardson Costa de Carvalho
Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
A eficiência logística é um fator estratégico para a competitividade da soja brasileira. Entretanto, as longas distâncias até os portos elevam os custos de transporte e reduzem a vantagem no cenário internacional. Este estudo avaliou a eficiência de sete rotas logísticas de exportação de soja do Mato Grosso com base em critérios econômicos e ambientais, considerando distância, custos e emissões de CO_2. A análise multicritério indicou que rotas intermodais, que integram transporte rodoviário e ferroviário, são mais eficientes. Em contrapartida, rotas exclusivamente rodoviárias, mostraram-se altamente ineficientes. O estudo reforça a importância de incluir critérios ambientais na escolha das rotas, alinhando a logística brasileira às demandas de sustentabilidade e competitividade global.

1. INTRODUÇÃO

A logística agroindustrial brasileira exerce papel estratégico na competitividade do agronegócio nacional, especialmente no contexto das exportações de grãos. Entre as diversas cadeias produtivas, a soja destaca-se como principal *commodity* exportada pelo Brasil, com o estado de Mato Grosso assumindo a liderança tanto em área plantada quanto em volume exportado (Almeida et al., 2016). Apesar dessa posição de destaque, o estado enfrenta desvantagens competitivas significativas em razão da distância geográfica em relação aos portos de exportação, o que eleva substancialmente os custos logísticos e reduz a margem de lucro do produtor (de Oliveira et al., 2022).

A eficiência dos sistemas logísticos torna-se, portanto, um fator determinante para a competitividade da soja brasileira no mercado internacional. Embora o país tenha promovido investimentos em infraestrutura de transportes (rodovias, ferrovias e hidrovias) com o intuito de reduzir o chamado Custo Brasil, os desafios persistem. O frete, por exemplo, pode representar até 28% do preço FOB da soja (Roulet et al., 2016). Melhorias logísticas poderiam reduzir esses custos em até 30% (Vural et al., 2020). Diferentemente dos Estados Unidos, onde as ferrovias respondem por 55% do transporte de cargas (Salin, 2020), o Brasil mantém elevada dependência do transporte rodoviário, a maior parte das cargas agrícolas neste modo de transporte. A malha ferroviária brasileira permanece relativamente subdesenvolvida, com cerca de 31 mil km e apenas 20% das cargas brasileiras circulando por estas (ANTF, 2025; Bertoccelli, 2023). Wang et al. (2024) destacam ainda que a infraestrutura de transportes tem sido um dos principais entraves ao pleno desenvolvimento do potencial agrícola e ao crescimento econômico do país. Adicionalmente, a participação do custo do transporte terrestre no preço FOB para exportação de soja em Mato Grosso é de 14–16%, valor muito superior ao encontrado no Rio Grande do Sul, cuja média é de 6% (Salin, 2023). Esses altos custos logísticos acarretam perda de competitividade frente a concorrentes internacionais (Oliveira e Alvim, 2017). O impacto do frete é evidenciado no escoamento da produção de soja no estado de Mato Grosso, por exemplo, cujas distâncias médias de transporte podem chegar a 2.000 km, como no trajeto entre Sorriso (MT) e o Porto de Santos (de Oliveira et al., 2022). Além das vantagens econômicas, a utilização de rotas intermodais traz vantagens ambientais. A exportação pelos portos do Arco Norte, representam uma opção mais econômica e ambientalmente eficiente, podendo gerar uma redução de até 21% nas emissões de CO^2 (Vettorazzi et al., 2016).

A pressão ambiental sobre a logística tem aumentado devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente no transporte de *commodities* como a soja. Essas emissões variam bastante conforme a origem e a rota utilizada, podendo ser até seis vezes maiores que a média nacional. O transporte rodoviário é o principal responsável pelas emissões, enquanto ferrovias e hidrovias são mais eficientes ambientalmente. Por isso, é essencial incluir critérios ambientais na avaliação da eficiência logística, indo além dos custos financeiros (Escobar et al., 2020). Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar se as rotas logísticas de exportação de soja no estado de Mato Grosso apresentam variações de eficiência decorrentes de suas características estruturais e operacionais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo abrange sete rotas logísticas utilizadas para a exportação de soja, partindo dos municípios de Sorriso e Primavera do Leste, localizados no estado de Mato Grosso, com destino aos portos de Santos (SP), Paranaguá (PR) e Santarém (PA), conforme demonstra a Tabela 1. As rotas analisadas englobam tanto o Arco Sul quanto o Arco Norte, e contemplam distintos modais de transporte[1], incluindo trajetos exclusivamente rodoviários e rotas intermodais, que combinam os modais rodoviário e ferroviário.

Tabela 1: Rotas analisadas.

Rota	Origem	Intermodal	Destino	Distância Rodoviária (km)	Distância Ferroviária (km)	Distância Hidroviária (km)
Rota 1	Sorriso (MT)	Rondonópolis (MT)	Santos (SP)	607	1.655	0
Rota 2	Sorriso (MT)	-	Paranaguá (PR)	2.157	0	0
Rota 3	Sorriso (MT)	-	Santarém (PA)	1.377	0	0
Rota 4	Primavera do Leste (MT)	-	Santos (SP)	1.532	0	0
Rota 5	Primavera do Leste (MT)	-	Paranaguá (PR)	1.715	0	0
Rota 6	Primavera do Leste (MT)	Rondonópolis (MT)	Santos (SP)	160	1.655	0
Rota 7	Sorriso (MT)	Miritituba (PA)	Barcarena (PA)	965	0	965

Os dados utilizados são provenientes do *United States Department of Agriculture* (USDA, 2023), que é a fonte principal para as variáveis: Origem, Porto de destino, Distância total (km), Volume exportado (t) e Preço do frete (US$/t). As emissões de CO_2, por sua vez, são calculadas com base em fatores médios de emissão por modal de transporte ($kgCO_2/t.km$), e variam conforme o modal utilizado: rodoviário (DEFRA, 2023), ferroviário (ANTT, 2012) e hidroviário (DEFRA, 2023). O valor total de emissão por rota será obtido pela equação 1:

$$E = \frac{(D_R \times F_R \times T_R)}{1000} + \frac{(D_F \times F_F)}{1000} + \frac{(D_H \times F_H)}{1000} \quad (1)$$

onde: E = Emissões de CO_2 (t); D_R = Distância percorrida (km) pelo veículo rodoviário; F_R = Fator de emissão em kg/km de CO_2 equivalente do veículo rodoviário; T_R = Quantidade transportada pelo veículo rodoviário em kg. D_F = Distância percorrida (km) pelo veículo ferroviário; F_F = Fator de emissão em kg/tku de CO_2 equivalente do veículo ferroviário; D_H = Distância percorrida (km) pelo veículo hidroviário; F_H = Fator de emissão em kg/tku de CO_2 equivalente do veículo hidroviário.

A análise das rotas será feita por meio do método PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), pertencente à família da Análise Multicritério de Decisão (MCDM). O PROMETHEE permite a comparação direta de alternativas com base em múltiplos critérios, por meio da construção de índices de preferência e do cálculo de fluxos positivos e negativos, que expressam o grau de superioridade ou inferioridade de cada alternativa em relação às demais. Como critério de decisão serão utilizados: Distância total (km), emissão de CO_2 ($kgCO_2/t.km$) e Preço do frete (US$/t). Os pesos dos critérios constituem as informações entre critérios, enquanto as informações dentro de cada critério referem-se às funções de preferência para cada critério (Slama et al., 2023). Assim, após a definição dos pesos e a escolha das funções de preferência para cada critério conforme demonstra a equação 2:

$$P_j(a,b) = F(d_j(a,b)) = F(g_j(a) - (g_j(b)) \quad (2)$$

onde: a e b são as alternativas comparadas; $g_j(x)$ é o valor da alternativa x no critério j; $d_j(a,b)$ é a diferença entre os valores das alternativas; $P_j(a,b)$ é o grau de preferência de a sobre b no critério j.

Os valores gerados são utilizados para calcular o índice de preferência global, que indica o grau em que uma alternativa a é preferida em relação a uma alternativa b. Após o cálculo dos índices de preferência, são calculados os fluxos positivos e negativos. Os fluxos são obtidos pelas equações 4, 5 e 6 respectivamente:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(a,b) \quad (3)$$

[1] O termo "modais de transporte" também é amplamente utilizado na literatura de Logística, como em Ballou (2001). Neste trabalho, adota-se "modos" em alinhamento à terminologia usual na área de Transportes no Brasil.

$$\phi^{-}(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \neq a} \pi(b, a) \quad (4)$$

$$\phi(a) = \phi^{+}(a) - \phi^{-}(a) \quad (5)$$

Assim, quanto maior o fluxo líquido, melhor será o desempenho da alternativa, onde o fluxo líquido é o equilibro entre os fluxos de preferência positivo e negativo, obtendo-se, assim, os rankings das alternativas analisadas. A escolha do PROMETHEE como ferramenta metodológica baseia-se na capacidade do método de lidar com critérios conflitantes, como custo e impacto ambiental. A adoção da análise multicritério é sustentada também por estudos anteriores. Conforme Morais et al. (2023), que fornece novas evidências sobre o *trade-off* entre emissões e eficiência econômica em ambientes logísticos do agronegócio. De forma semelhante, Oliveira *et al.* (2021) afirmam que a função objetivo representa várias funções a serem minimizadas, cada uma com sua dimensão de análise: custo de implantação, preferência modal ferroviária ou hidroviária, e componente ambiental. Esses autores reforçam a necessidade de integrar critérios múltiplos de avaliação da eficiência logística. No caso deste trabalho, o critério ambiental está representado pelas emissões de CO_2, cuja importância é destacada no seguinte trecho: componente ambiental: preferência por menor emissão de CO_2 devido à redução na distância rodoviária percorrida pelos caminhões (Oliveira et al., 2021). Além disso, conforme os resultados simulados por Morais et al. (2023), é possível obter simultaneamente o custo mínimo de instalação dos terminais de transbordo e reduzir as emissões em até 20% em todos os cenários analisados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A crescente produção agrícola brasileira atrelada a longa distância destes centros produtores aos portos de exportação exige uma boa infraestrutura logística, que aumente a competitividade frente ao mercado internacional. Analisando as principais variáveis de escoamento da soja o presente trabalho traz uma análise de eficiência das principais rotas logísticas da soja com o objetivo de analisar se as características técnicas operacionais influenciam na sua eficiência. Os valores de cada variável para cada rota estão na Tabela 2.

Tabela 2: Características das rotas analisadas.

Rota	Distância Rodoviária (Km)	Distância Ferroviária (Km)	Distância Hidroviária (Km)	Emissões (t)	Porcentagem de rodovia	Preço do frete (US$/t)
Rota 1	607	1.655	0	27,73	27	9,67
Rota 2	2.157	0	0	98,47	100	8,09
Rota 3	1.377	0	0	62,86	100	7,73
Rota 4	1.532	0	0	69,94	100	8,18
Rota 5	1.715	0	0	78,29	100	7,74
Rota 6	160	1.655	0	7,32	9	5,38
Rota 7	965	0	965	44,06	50	4,4

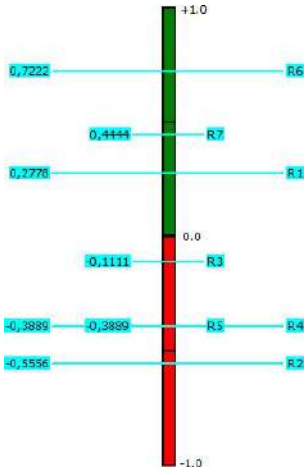


Figura 1: Eficiência de cada rota.

A Figura 1 apresenta a eficiência das sete rotas logísticas avaliadas com base no fluxo líquido gerado. A rota 6 apresentou o melhor desempenho (ϕ= + 0,7222), seguida pelas rotas 7 (ϕ= + 0,4444) e 1 (ϕ= + 0,2778), possivelmente por combinar intermodalidade com menor distância rodoviária, o que reforça o potencial da ferrovia como solução logística para o Centro-Oeste brasileiro, ao oferecer ganhos em economia de escala, menor variabilidade de tempo de trânsito e significativa redução nas emissões de CO_2. Esses resultados são corroborados por estudos anteriores que apontam o transporte ferroviário como alternativa mais sustentável e econômica para longas distâncias (Heinold e Meisel, 2018; Oliveira et. al., 2021). A rota 3 (ϕ= - 0,1111), seguidas pelas rotas 4 (ϕ= - 0,3889) e 5 (ϕ= - 0,3889), apresentaram baixos desempenhos, provavelmente devido à longa distância percorrida apenas por rodovias. A rota 2 com (ϕ= - 0,5556) foi a menos eficiente, refletindo os maiores custos logísticos e impactos ambientais. Esses resultados evidenciam a importância da estrutura operacional na escolha das rotas de exportação da soja.

A priorização de investimentos que promovam a integração dos modais, especialmente nas regiões produtoras mais afastadas dos portos, pode ser determinante para reverter o atual quadro de ineficiência logística, reduzindo custos operacionais e os impactos ambientais do transporte de commodities agrícolas.

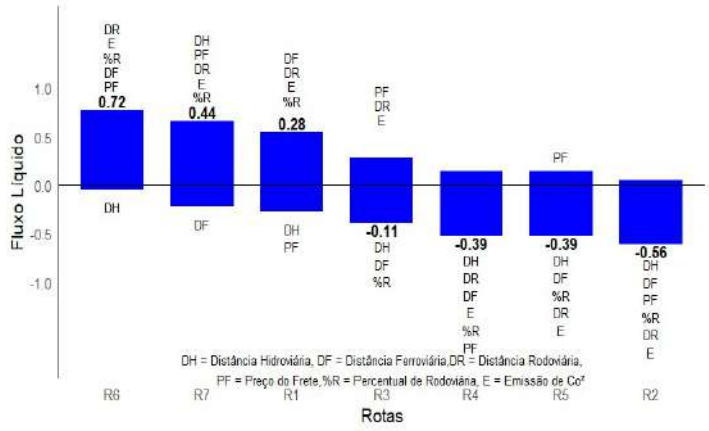


Figura 2: Influência das variáveis analisadas.

A Figura 2 apresenta a influência das variáveis analisadas em cada rota logística. Observa-se que a rota 6 novamente apresenta impacto positivos, refletindo forte desempenho nos critérios de custo logístico (US$ 5,38), distância (160 km) e emissões (7,32 t). As rotas 7 e 1 também apresentaram impactos positivos. Por fim, a Rota 2 apresentou a menor eficiência, com piores desempenhos nas variáveis distância rodoviária percorrida (2.157 km) e emissões (98,47 t). Isto evidencia o problema brasileiro de priorização das rodovias para transporte de cargas em longas distâncias, pois o fator distância possui forte influência no preço dos fretes (Macarringue et. al., 2024).

Esses resultados indicam que a eficiência das rotas está diretamente relacionada ao desempenho em múltiplos critérios, e não apenas a um fator isolado.

4. CONCLUSÕES

As rotas intermodais apresentam desempenho superior em termos de eficiência logística e ambiental. A Rota 6 com origem em Primavera do Leste (MT), que combina trechos rodoviários e ferroviários, destacou-se como a alternativa mais eficiente, apresentando os menores valores de distância rodoviária, custo de frete e emissões de CO_2. Em contrapartida, rotas exclusivamente rodoviárias, como a Rota 2, demonstraram alto grau de ineficiência, sobretudo em função das longas distâncias percorridas e das elevadas emissões geradas. Esses achados reforçam a importância de estratégias logísticas que promovam maior integração entre os modais de transporte, como forma de aumentar a competitividade da soja brasileira no mercado internacional.

A avaliação da eficiência logística não deve se limitar aos custos financeiros, mas também considerar os impactos ambientais, especialmente em um contexto de crescente exigência por cadeias produtivas mais sustentáveis. O uso de métodos multicritério, como o PROMETHEE, mostrou-se adequado para apoiar decisões mais equilibradas entre desempenho econômico e ambiental. A expansão e modernização da infraestrutura ferroviária e hidroviária, aliada ao uso racional dos recursos logísticos disponíveis, podem contribuir significativamente para a redução do Custo Brasil, a mitigação de emissões de GEE e a consolidação do agronegócio brasileiro como referência internacional em sustentabilidade logística.

Agradecimentos

O presente artigo contou com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M.S.; M. Amaral e R. do Morabito (2016). Um estudo sobre localização de terminais intermodais na rede de escoamento da soja brasileira. *Production*, v. 26 n. 3, p. 562–580. DOI: https://doi.org/10.1590/0103-6513.144513.

Associação Nacional dos Transportes Ferroviários (2025). Mapa Ferroviário. Disponível em: https://www.antf.org.br/boletim-antf/mapa-ferroviario/#

Agência Nacional de Transportes Terrestres (2012). *1° Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas.* Disponível em: https://cmsdespoluir.cnt.org.br/Documents/PDFs/invent%C3%A1rio%20ferrovi%C3%A1rio%202012_final.pdf.

Ballou, R. H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. Porto Alegre: Bookman, 2001.

Bertoccelli, R. de P. (2023) Infrastructure: only 20% of cargo transport in Brazil is through rail. Disponível em: https://www.felsberg.com.br/en/infrastructure-only-20-of-cargo-transport-in-brazil-is-through-

rail/?utm_source=chatgpt.com

de Oliveira, A.L.R. e A. M. Alvim (2017). The supply chain of Brazilian maize and soybeans: the effects of segregation on logistics and competitiveness *International Food and Agribusiness Management Association,* v. 20, n.1, p. 45–61.

de Oliveira, A. L., Braga Marsola, K., Milanez, A. P., & Liegé Renner Fatoretto, S. (2022). Performance evaluation of agricultural commodity logistics from a sustainability perspective. *Case Studies on Transport Policy*, *10*(1), 674–685. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.01.029

Department For Energy Security And Net Zero (2023). *Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023*. Disponível em: https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023.

Escobar, N., Tizado, E. J., zu Ermgassen, E. K. H. J., Löfgren, P., Börner, J., & Godar, J. (2020). Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. *Global Environmental Change*, *62*. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102067

Heinold, A. e F. Meisel (2018). Emission rates of intermodal rail/road and road-only transportation in Europe: A comprehensive simulation study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 65, p. 421-437. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.003

Macarringue, A. M. J. S.; A. L. R. de Oliveira; C. T. dos S. Dias e K. B. Marsola (2024) Multidimensionality of agricultural grain road freight price: a multiple linear regression model approach by variable selection. Ciência Rural, DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220335

Medeiros, B. T; R. A. A. Nóbrega; W. L. S. Costa e W. W. E. Gomes (2023) Modelagem geográfica para a simulação de custos de transporte de soja em bacias logísticas. *Transportes*, v. 31 n. 1. DOI: https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2700

Ministério da Infraestrutura (2022) *PNL 2035: Plano Nacional de Logística do Brasil para 2035.*

Morais, G. R. de; Y. C. D. Calil; G. F. de Oliveira; R. R. Saldanha e C. A. Maya (2023) A Sustainable Location Model of Transshipment Terminals Applied to the Expansion Strategies of the Soybean Intermodal Transport Network in the State of Mato Grosso, Brazil. *Sustainability*, v. 15, n. 2, p. 1063. DOI: https://doi.org/10.3390/su15021063.

Oliveira, V. H. P.; M. S. G. Tobias, M. P. da C. da Rocha; V. J. da C. Farias e M. M. de Souza (2021) Optimization method for the analysis of intermodal alternatives to transport soybean production in the States of Pará and Tocantins, Brazil. *International Journal of Development Research,* v. 11, n. 11, p. 51912–51918, 2021. DOI: https://doi.org/10.37118/ijdr.23318.11.2021.

Roulet, M.C.; J. V. Caixeta-Filho e H. T. Y. Yoshizaki (2016). A multiple-criteria analysis application for vertical coordination in the transportation of agricultural commodities in Brazil. *Journal of Food Products Marketing*, v. 22 n. 6, p. 694–706.

Salin, D.L. (2020) *Soyben Transportation Guide Brazil 2019*. DOI: https://doi. org/10.9752/TS048.08-2020%3.

Salin, D. (2023) *Soybean Transportation Guide: Brazil 2022.* United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service.

Thadani, R. M. e A. C. B. Rocha (2024). *Mapping Least Cost Transport Corridors for Soybean Exports from Mato Grosso: A Case Study of Logistics from Farm to Port.* https://orcid.org/0000-0001-9477-2375

Vettorazzi, A.C.; A. M. João; F. V. Rocha e J. V. Caixeta-Filho (2016). Emissão de CO2 na logística de exportação de soja do Mato Grosso: o caso das exportações pelo Arco Norte. *XVIII Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente - ENGEMA*, No. March, p. 17. Disponível em: https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2017/09/emissao-de-co2-na-logistica-de-exportacao-de-soja-do-mato-grosso-o-caso-das-exportacoes-pelo-arco-norte.pdf

Vural, C.A.; V. Roso; A. Halld´orsson; G. Ståhle e M. Yaruta (2020) Can digitalization mitigate barriers to intermodal transport? An exploratory study, *Research in Transportation Business and Management*. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100525.

Gleidisom Thyery Souza da Costa (Thyery1808@gmail.com)
Matheus Araújo Maciel (matheus1914maciel@gmail.com)
Thayane Caroline Oliveira da Conceição (carolinethayane13@gmail.com)
Matheus Melo de Souza (matheuusmelodesouza@gmail.com)
Andréa Leda Ramos de Oliveira (aleda@unicamp.br)
Richardson Costa de Carvalho(r175550@dac.unicamp.br)
Karina Braga Marsola (kbraga@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Laboratório de Logística e Comercialização, Av. Candido Rondon, 501 - Barão Geraldo, Cidade Universitária, Campinas, São Paulo, Brasil.

DIREITO À CIDADE, MOBILIDADE E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO URBANO A PARTIR DE PLANOS MUNICIPAIS

Luíza Gabriela Gomes de Mesquita[1] **e Isabel Magalhães**[1]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO
Este trabalho propõe um sistema para avaliar o planejamento urbano das cidades brasileiras, utilizando seus Planos de Mobilidade Urbana (PMUs) e Diretores (PDs) como objeto de análise. O objetivo é mensurar como o planejamento municipal, refletido nesses instrumentos, integra os preceitos do direito à cidade e da sustentabilidade ambiental. A metodologia articula as diretrizes da PNMU, do Estatuto da Cidade e de metas dos ODSs (6, 11, 13, 14 e 15), resultando em 20 afirmativas avaliativas com uma escala de pontuação que classifica o desempenho em quatro níveis (de "Frágil" a "Excelente"). A ferramenta, de natureza propositiva, foi aplicada no PMU e PD do município de Natal/RN. O sistema oferece um instrumento prático para fomentar cidades mais justas e resilientes.

1. INTRODUÇÃO

O acelerado processo de urbanização no Brasil intensifica os desafios para a garantia do direito à cidade (Lefevbre, 2008), que se traduz na fruição plena e equitativa dos espaços e serviços urbanos. Nesse cenário, a mobilidade emerge como um pilar essencial, pois conecta os cidadãos às oportunidades de trabalho, educação, saúde e lazer. Para guiar o desenvolvimento das cidades, destaca-se no Brasil o Estatuto da Cidade [Lei Federal nº 10.257/2001 (Brasil, 2001)], que orienta o Plano Diretor (PD), e a Política Nacional de Mobilidade Urbana [PNMU, Lei Federal nº 12.587/2012 (Brasil, 2012)], que orienta o Plano de Mobilidade Urbana (PMU). Essa agenda nacional precisa se conectar ao paradigma global do desenvolvimento sustentável, consolidado na Agenda 2030 e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) (ONU, 2015). O planejamento urbano é reconhecido como uma das ferramentas mais eficazes para alcançar as metas dos ODSs (KII *et al*., 2017), e embora não exista um ODS específico para os transportes, o setor é fundamental para o alcance dos 17 ODSs (Amorim, 2022). Dentro deste escopo, o conceito de mobilidade sustentável ganha força, representando a união entre as necessidades de deslocamento e a responsabilidade socioambiental (Seabra *et al*., 2013). Com base nisso, Amorim (2022) propõe uma divisão dos ODSs em grupos temáticos. Destaca-se aqui o G-Ambiental, composto pelos ODSs mais ligados a intervenções ambientais: ODS 6 (água potável e saneamento), 13 (ação contra a mudança global do clima), 14 (vida na água) e 15 (vida terrestre).

Contudo, na prática, os transportes geram impactos socioambientais negativos que dificultam o alcance dos ODSs. A expansão da infraestrutura viária, por exemplo, leva à impermeabilização do solo, que agrava problemas de drenagem (Brasil, 1979; Parra e Teixeira, 2020) e prejudica a recarga de aquíferos (Beato *et al*., 2003), comprometendo o ODS 6. O escoamento superficial intensificado promove o carreamento de sedimentos, nutrientes e contaminantes para os corpos hídricos, causando eutrofização e assoreamento, o que impacta o ODS 14. Ademais, a dependência do automóvel posiciona o setor como um dos principais emissores de gases de efeito estufa (Statista, 2022), intensificando as mudanças climáticas e contrariando o ODS 13. Por fim, o desmatamento para a construção de vias gera fragmentação de habitats e perda de biodiversidade (Barbosa, 2024), e quando ocorre em matas ciliares, aumenta a erosão e degrada a qualidade do solo e dos recursos hídricos (Araújo *et al*., 2023; Pereira *et al*., 2024), afetando os ODSs 6, 14 e 15.

Para além da dimensão ambiental, a PNMU visa promover a integração entre os modos de transporte e a melhoria da acessibilidade (Brasil, 2012), enquanto o Estatuto da Cidade assegura o direito a cidades sustentáveis (Brasil, 2001). Essa perspectiva social e inclusiva é o cerne do ODS 11, que busca tornar as cidades mais seguras, resilientes e sustentáveis. Apesar desse referencial legal, evidencia-se uma lacuna entre o planejamento prescrito e os resultados observados no território. Diante dessa desconexão, este trabalho propõe um sistema para avaliar o planejamento urbano das cidades a partir da análise de seus principais instrumentos norteadores, o PMU e o PD. O objetivo é criar uma ferramenta que, ao diagnosticar o potencial desses planos, permita aferir o compromisso do planejamento municipal com a promoção integrada do direito à cidade e da preservação ambiental. A análise será conduzida à luz de um referencial tripartite que integra as diretrizes do Estatuto da Cidade, os princípios da PNMU e as metas dos ODSs 6, 11, 13, 14 e 15.

2. METODOLOGIA

A construção do instrumento, se estruturou em três etapas. Primeiro, foi construído um referencial teórico-

legal a partir da articulação entre a PNMU, o Estatuto da Cidade e as metas dos ODSs aqui trabalhados. Segundo, com base nesse referencial, foram elaboradas 20 afirmativas, sendo os critérios de avaliação. Por fim, foi criado um sistema de pontuação para qualificar o nível de atendimento de cada afirmativa, permitindo classificar o desempenho global do planejamento da cidade em quatro níveis, de 'Frágil' a 'Excelente'.

Assim, a primeira etapa consistiu em analisar as diretrizes obrigatórias dos dois marcos legais e cruzá-las com os ODSs. Para tanto, inicialmente, foram selecionadas metas dos ODSs 6, 11, 13, 14 e 15, por sua forte conexão com os impactos sociais (direito à cidade) e ambientais da mobilidade urbana. As temáticas centrais dessas metas são apresentadas na Tabela 1. A partir dessas metas, e da leitura crítica da PNMU e do Estatuto da Cidade, propôs-se as 20 afirmativas apresentadas na Tabela 2. Cada afirmativa representa uma boa prática ou um requisito fundamental, cuja presença no planejamento urbano indica um compromisso ativo com a mobilidade sustentável, a preservação ambiental e/ou o direito à cidade.

Tabela 1: Temáticas centrais das metas consideras dos ODSs 6, 11, 13, 14 e 15

6.3	Melhorar a qualidade da água
6.4	Aumentar a eficiência do uso da água em todos os setores
6.5	Implementar a gestão integrada dos recursos hídricos
6.b	Participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento
11.2	Acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos
11.3	Urbanização inclusiva e sustentável
11.6	Reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades
11.7	Acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes
11.b	Aumentar o número de cidades e assentamentos humanos
13.2	Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais
13.b	Promover mecanismos para a criação de capacidades para o planejamento relacionado à mudança do clima e à gestão eficaz
14.1	Prevenir e reduzir a poluição marinha de todos os tipos, especialmente a advinda de atividades terrestres
15.1	Conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços
15.3	Combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado
15.5	Reduzir a degradação de habitat naturais, deter a perda de biodiversidade e proteger e evitar a extinção de espécies ameaçadas

Tabela 2: Afirmativas com as respectivas bases legais que as fundamentam

	Afirmativas	ODSs	PNMU	Estatuto da cidade
1.	O PMU prevê a implantação de vias e ciclovias com infraestrutura verde	6, 11, 13, 14 e 15	Art. 5°, II; Art. 24, III	-
2.	O PMU e/ou PD indica a criação de corredores ecológicos e zonas verdes ligadas ao sistema viário	6, 11, 13, 14 e 15	Art. 5°, II; Art. 24, II	Art. 2º, I, VI, XII, XVII; Art. 42-A, VI
3.	O PMU possui incentivos ao uso de materiais drenantes na construção da infraestrutura viária	6, 11, 13 e 14	Art. 5°, II; Art. 24, III	-
4.	O PMU e/ou PD evita proposições viárias próximas a nascentes, corpos hídricos e áreas de recarga	6, 13 e 14	Art. 24, III	Art. 2º, VI, XII; Art. 42-A, II e VI; Art. 42-B, VI
5.	O PMU articula a infraestrutura de transporte com sistemas de drenagem urbana sustentáveis	6, 11, 13 e 14	Art. 5°, II; Art. 24, III	-
6.	O PMU contempla um plano de emergência com soluções para contenção de danos causados por possíveis contaminações do solo e de corpos hídricos por resíduos do setor de transportes (óleos, metais pesados)	6 e 14	Art. 6°, IV	-
7.	O PMU e/ou PD regula intervenções de mobilidade em ambientes de zonas costeiras e manguezais	6, 13, 14 e 15	Art. 24, III	Art. 2º, VI, XII; Art. 42-B, VI
8.	O PMU e/ou PD prevê infraestrutura de drenagem de águas pluviais e retenção de resíduos em malhas viárias próximas a cursos hídricos, zonas costeiras e áreas portuárias	6, 13 e 14	Art. 24, III	Art. 2º, VI; Art. 42-A, IV
9.	O PMU e/ou PD possui indicação de áreas de risco à erosão, evitando nessas a construção de obras viárias	6 e 13	Art. 6°, I	Art. 2º, VI; Art. 42-A, II; Art. 42-B, II
10.	O PMU e/ou PD prevê a participação social	11	Art. 7°, inc. V	Art. 2º, II, XIII; Art. 40, §4º; Arts.43 e 44
11.	O PMU e/ou PD contém o mapeamento de áreas de risco de desastres provocados por mudanças climáticas	11 e 13	-	Art. 2°, VI; Art. 42-A, II; Art. 42-B, II
12.	O PMU possui o cálculo da pegada de carbono da frota urbana	11, 13 e 15	Art. 6°, IV; Art. 7°, IV	-

13.	O PMU prioriza o transporte ativo e o transporte público coletivo	11, 13 e 15	Art. 6°, II, VI e VIII; Art. 24, I	-
14.	O PMU prevê a adoção de transporte público coletivo com o uso de combustíveis renováveis (veículos elétricos)	11, 13 e 15	Art. 6°, V e VI	-
15.	O PMU e/ou PD promove o uso misto do solo e as cidades compactas, visando a diminuição de deslocamentos	11, 13 e 15	Art. 6°, IV; Art. 7°, IV	Art. 2º, V; Art. 42-A, I; Art. 42-B, IV
16.	O PMU e/ou PD prevê o monitoramento dos poluentes de emissões atmosféricas dos transportes públicos coletivos	11, 13 e 15	-	Art. 2°, VI, XVII
17.	O PMU possui garantias para o acesso à mobilidade por grupos vulneráveis, como idosos e portadores de deficiência	11	Art. 5°, I, III, VIII e IX; Art. 7°, I, II e III; Art. 24, IV	-
18.	O PMU e/ou PD possui metas quantitativas para a redução das emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes	11, 13 e 15	-	Art. 2°, VI, VIII, XVII
19.	O PMU e/ou PD está articulado ao Plano de mitigação e adaptação às mudanças climáticas	11 e 13	-	Art. 2°, VI, XII; Art. 42-A, II, III, IV
20.	O PMU e/ou PD regula intervenções de mobilidade em áreas de preservação permanente (APP) e em unidades de conservação (UC)	13, 14 e 15	-	Art. 2°, IV, VI, XII; Art. 42-A, VI; Art. 42-B, VI

Para aplicar os 20 critérios de avaliação listados na Tabela 2, foi desenvolvida uma escala de pontuação de três níveis que mede a qualidade e a profundidade com que cada afirmativa é contemplada nos planos analisados. A pontuação é atribuída da seguinte forma: 0 pontos (não atendida): a diretriz descrita na afirmativa está ausente do plano; 1 ponto (atendida parcialmente): a diretriz é mencionada de forma indireta, incompleta ou superficial; e 2 pontos (atendida totalmente): a diretriz é abordada de forma direta, completa e explícita no plano. A soma dos pontos obtidos em todas as 20 afirmativas resulta em uma pontuação final (de 0 a 40 pontos). Essa pontuação é, então, utilizada para enquadrar o planejamento da cidade em uma das quatro categorias de desempenho (Frágil, Moderado, Bom ou Excelente), conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Modelo de classificação para avaliação do planejamento da cidade

Classificação	Faixa de pontuação	Descrição
Frágil	0 – 10	O(s) plano(s) demonstra(m) um compromisso mínimo com o direito à cidade e a preservação ambiental, indicando que as diretrizes da PNMU, do Estatuto da Cidade e dos ODSs são amplamente ignoradas ou tratadas de forma pontual e insuficiente.
Moderado	11 – 20	O planejamento reconhece algumas questões sociais e ambientais, mas carece de uma abordagem integrada. Existem lacunas significativas e a articulação entre mobilidade, direito à cidade e sustentabilidade é fragmentada, necessitando de aprofundamento e maior coesão.
Bom	21 – 30	O planejamento demonstra um claro alinhamento com os princípios da PNMU, do Estatuto da Cidade e dos ODSs. A promoção do direito à cidade e da sustentabilidade é uma diretriz estruturada, embora ainda existam pontos específicos que podem ser aprimorados.
Excelente	31 – 40	O planejamento demonstra uma integração exemplar entre mobilidade sustentável, direito à cidade e preservação ambiental, servindo como referência de boas práticas. As diretrizes legais e as metas da Agenda 2030 são tratadas de forma proativa e detalhada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia proposta, materializa-se como uma ferramenta prática para diagnosticar a efetividade do planejamento urbano municipal no Brasil. A criação das 20 afirmativas e da escala de pontuação permite não apenas uma análise qualitativa, mas também uma classificação quantitativa que facilita a comparação entre cidades e o monitoramento ao longo do tempo. Assim, a principal contribuição desta pesquisa é oferecer aos gestores públicos, pesquisadores e à sociedade civil um instrumento para identificar lacunas e potencialidades nos documentos que norteiam o desenvolvimento das cidades.

A análise proposta permite verificar se o setor de transportes transcende sua função meramente logística e assume seu papel como vetor de inclusão social, de proteção ambiental e de adaptação às mudanças climáticas, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada. Ao revelar as afirmativas menos atendidas, a metodologia aponta caminhos para revisões e aprimoramentos dos planos, impulsionando a consolidação de uma governança urbana participativa e alinhada aos compromissos nacionais e globais. Todavia, faz-se necessária a aplicação prática da metodologia de avaliação. Nesse sentido, o sistema de avaliação proposto foi aplicado ao Plano Diretor de Mobilidade Urbana (Decreto Municipal n° 12.540/2022) e ao Plano Diretor (Lei complementar N° 208/2022) da cidade de Natal/RN (Natal, 2022a; 2022b), de forma integrada.

Tabela 4: Aplicação da metodologia de avaliação proposta no planejamento de Natal/RN

Afirmativas	Pontuação	Justificativa
1	1	O PMU prevê ciclovias e espaços verdes, mas não os articula como infraestrutura verde integrada.
2	1	O PMU fala em espaços verdes, mas não relaciona diretamente com corredores ecológicos; o PD menciona, mas sem conexão clara com o PMU.
3	0	O PMU não aborda o uso de materiais drenantes.
4	0	O PMU e o PD não dispõem sobre a restrição de obras viárias próximas à corpos hídricos, nascentes ou áreas de recarga.
5	1	O PMU cita a necessidade de melhorias na drenagem urbana, mas sem integrar estratégias de drenagem sustentável à mobilidade.
6	0	O PMU não dispõe sobre um plano emergencial.
7	1	O PMU não dispõe sobre o tema. O PD regula essas intervenções de forma indireta, por meio, por exemplo, do enquadramento em Zonas de Proteção Ambiental (ZPAs).
8	1	O PMU apenas sugere melhorias na drenagem; o PD trata de drenagem urbana, mas não conecta diretamente com a infraestrutura viária.
9	1	O PMU é omisso; o PD mapeia áreas de risco, mas foca em ocupações e construções, não em mobilidade.
10	2	O PMU e o PD apresentam diretrizes diretas para o fomento a participação social.
11	1	O PMU não dispõe sobre. O PD delimita áreas de risco natural, sendo necessário o monitoramento dessas áreas, para a percepção de ligação com mudanças climáticas.
12	0	O PMU e o PD não dispõem sobre a pegada de carbono.
13	2	O PMU e o PD apresentam diretrizes diretas para o fomento do transporte ativo e do transporte público coletivo, em detrimento dos demais modos.
14	1	O PMU incentiva tecnologias veiculares limpas, mas não menciona transporte coletivo com energia renovável.
15	2	O PMU estrutura-se com base no uso misto do solo e eixos de mobilidade ativa; o PD também prioriza cidades compactas, promovendo assim a diminuição dos deslocamentos.
16	1	O PMU traz diretrizes sobre adaptação e emissões, mas sem metas ou indicadores; o PD aborda de forma genérica.
17	2	O PMU e o PD trazem garantias para o acesso à mobilidade por grupos vulneráveis por meio da acessibilidade.
18	1	O PMU propõe medidas de redução de emissões, mas sem metas claras; o PD visa a redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa em 50% até 2050 (Art. 158, II), mas não relaciona diretamente com o transporte.
19	1	O PMU cita o Programa de Meio Ambiente e Agenda Climática, mas não vincula ao Plano Municipal de Mudanças Climáticas (Art. 156) disposto no PD.
20	1	O PMU não dispõe sobre. O PD enquadra as APP e UC na Subzona de Preservação, sendo regulamentadas pelas Leis Federais de nº 12.651/2012 e nº 9.985/2000, respectivamente (Art. 19, I).
Pontuação	**20**	**Classificação - Moderados**

Assim, por meio da análise de seus planos, o sistema de avaliação classificou o planejamento do município de Natal/RN com uma pontuação total igual a 20, enquadrando-se na categoria “Moderado”. Embora ambos reconheçam aspectos sociais e ambientais, existem lacunas importantes como: ausência de planos emergenciais e omissão de critérios claros sobre as ações voltadas à redução de emissões atmosféricas. Por outro lado, há destaque positivo para participação social, incentivo à mobilidade ativa e uso misto do solo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu e aplicou um instrumento de avaliação que mensura a integração entre direito à cidade, mobilidade e sustentabilidade ambiental no planejamento urbano municipal brasileiro. A principal contribuição da pesquisa reside na criação de uma ferramenta prática, fundamentada em 20 afirmativas que articulam as diretrizes da PNMU, do Estatuto da Cidade e de metas da Agenda 2030. Ao estabelecer um método de pontuação e uma classificação de desempenho, o sistema oferece um instrumento para diagnosticar o nível de compromisso dos PMUs e PDs com a construção de cidades mais justas e resilientes.

A aplicação do instrumento ao caso de Natal/RN demonstrou de forma prática o uso da ferramenta de diagnóstico e classificou o planejamento da cidade como "Moderado", identificando avanços, como a priorização do transporte ativo e do uso misto do solo; e lacunas, como a ausência de metas para redução de emissões e a frágil articulação com a infraestrutura verde e de drenagem. Dessa forma, o instrumento se configura como um recurso para gestores públicos, pesquisadores e sociedade civil, permitindo não apenas avaliar a qualidade dos planos existentes, mas também orientar futuras revisões. Como sugestões para trabalhos

futuros, destaca-se a aplicação do método e o desenvolvimento de um guia de avaliação mais detalhado para cada afirmativa, com exemplos e critérios mais específicos para mitigar a subjetividade na pontuação, tornando o processo de avaliação mais preciso e confiável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorim, I. C. O. M. (2022) *Indicadores de suporte às políticas de transporte orientadas ao alcance dos objetivos do desenvolvimento sustentável.* Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/46297/1/TESE%20Isabel%20Cristina%20de%20Oliveira%20Magalh%c3%a3es%20Amorim.pdf (acesso em 01/06/2025).

Araújo, I. N. F.; Cunha, K. P. V.; Cunha, G. K. G.; Matos, M. F. A. (2023) Vulnerabilidade ambiental aplicada ao planejamento territorial de uma bacia receptora da transferência de água interbacias no semiárido brasileiro. In: *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Aracaju, SE)*. Porto Alegre: ABRHidro. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/191/XXV-SBRH0215-2-0-20230814-104002.pdf (acesso em 10/05/2025).

Barbosa, E. S. S. (2024) Barreiras antropogênicas e conectividade do habitat. *Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 3, p. e3508. DOI: 10.54033/cadpedv21n3-226.

Beato, D. A. C.; Medeiros, M. J.; Drews, M. G. P.; Dutra, G. M. (2003) Impactos urbanos em águas subterrâneas – Bacia da Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte – MG. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 17, p. 49–68. DOI: https://doi.org/10.14295/ras.v17i1.1312.

Brasil (1979) Lei Federal nº 6766 de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. *Diário Oficial da União*, Brasília.

Brasil (2001) Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm (acesso em 26/06/2025).

Brasil (2012) Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm (acesso em 02/06/2025).

Kii, M.; Doi, K.; Nakamura, K. (2017) Urban Planning Research in the Climate Change Era: Transdisciplinary Approach Toward Sustainable Cities. In: Fernández, R. A.; Zubelzu, S.; Martínez, R. (eds.) *Carbon Footprint and the Industrial Life Cycle*. DOI: 10.1007/978-3-319-54984-2.

Lefevbre, H. (2008) O direito à cidade (5ª. ed.). São Paulo: Centauro.

Natal (RN). Decreto nº 12.540, de 14 de junho de 2022. Institui o Plano Municipal de Mobilidade Urbana (PlanMob), e dá outras providências. *Diário Oficial Municipal*, Natal, 2022. Disponível em: https://natal.rn.gov.br/storage/app/media/sttu/legislacao/decretos/2022/Decreto-No-12.540-2022-institui-oplano-de-mobilidade-planmob.pdf (acesso em 12/07/2025).

Natal (RN). Lei complementar n° 208, de 07 de março de 2022. Dispõe sobre o Plano Diretor de Natal, e dá outras providências. *Diário Oficial Municipal*, Natal, 2022. Disponível em: https://www.natal.rn.gov.br/storage/app/media/semurb/legislacao/PLANO_DIRETOR_COMPILADO.V3.pdf (acesso em 12/07/2025).

ONU - Organização das Nações Unidas (2015) *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Agenda 2030*. Nações Unidas. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf (acesso em 08/06/2025).

Parra, G. G.; Teixeira, B. A. N. (2020) Análise de cenários resultantes da impermeabilização de espaços destinados à circulação e permanência de pedestres. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 12, p. 1–17. DOI: 10.1590/2175-3369.012.e20190265.

Pereira, C. V. M.; Sousa, M. N. F. A.; Araujo, F. S.; Cavalcanti Neto, I.; Ferreira, J. C. V.; Cunha, P. E. V.; Cunha, K. P. V.; Costa, C. W. (2024) Vulnerabilidade ambiental em Áreas de Preservação Permanente (APP) da Bacia Hidrográfica do Rio Potengi, RN, Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 10, n. 1, p. 197–221. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n1ID32574.

Seabra, L. O.; Gonzales Taco, W.; Dominguez, E. M. (2013) Sustentabilidade em transportes: do conceito às políticas públicas de mobilidade urbana. *Revista dos Transportes Públicos – ANTP*, ano 35, 2° quad., p. 103–122.

Statista (2022) *Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2021, by subsector*. Disponível em: https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/ (acesso em 02/07/2025).

Luiza Gabriela Gomes de Mesquita (luiza.mesquita.702@ufrn.edu.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Isabel Magalhães (isabel.magalhaes@ufrn.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E A APLICAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO NAS OPERAÇÕES LOGÍSTICAS EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA EM 2024.

Ana Larissa Leite Ramalho[1,2], Conrado Bertoluzzi[3], Iara Galdino Carneiro[1], Michele da Silva Gomes[4].
[1]Companhia Industrial de Cimento Apodi, [2]Universidade Federal do Ceará, [3]Instituto Via Green, [4]CargoX Transportes LTDA.

RESUMO
Mais do que uma medida ambiental, a comercialização de créditos de carbono contribui para a proteção de ecossistemas e gera recursos que beneficiam comunidades locais por meio de investimentos em educação, saúde e infraestrutura sustentável. Este artigo apresenta o estudo de caso de uma cimenteira que, em 2024, adotou essa estratégia para compensar as emissões de carbono associadas à logística de distribuição de seu produto acabado. A iniciativa envolveu a análise das rotas rodoviárias utilizadas, a tipologia dos veículos empregados, o cálculo da pegada de carbono do transporte e a aquisição de créditos de carbono para neutralização das emissões. O trabalho busca avaliar os impactos ambientais e os potenciais benefícios para a sustentabilidade, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), em especial os ODS 1 (erradicação da pobreza), 13 (ação contra a mudança global do clima) e 15 (vida terrestre). Dessa forma, reforça-se o papel dos créditos de carbono como ferramenta estratégica para reduzir emissões, conservar a biodiversidade e promover um modelo de desenvolvimento mais justo e inclusivo.

1. INTRODUÇÃO

Diante do agravamento das mudanças climáticas, cresce a urgência por soluções que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (GEE). O setor de transportes, identificado como a segunda maior fonte de emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) (IEA, 2023), figura como um dos principais alvos para estratégias de descarbonização (Khurshid et al., 2022). Paralelamente, a indústria cimenteira também representa um significativo desafio ambiental, sendo responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2, com a notável proporção de uma tonelada de CO_2 liberada para cada tonelada de cimento produzida (GCB Brasil, 2023; Toone *apud* Green Building Council Brasil, 2023). Unindo essas duas frentes críticas, o presente estudo de caso tem como objetivo principal analisar a aplicação de créditos de carbono para compensação das emissões de GEE geradas pelas operações logísticas de transporte de cimento ensacado em uma indústria cimenteira brasileira. Nosso foco será a quantificação das emissões de equivalente de dióxido de carbono (CO_2eq), uma métrica que compara o impacto de diferentes GEE com base em seu potencial de aquecimento global, detalhadas por tipo de veículo e faixa de quilometragem. Adicionalmente, estimaremos os custos de compensação e discutiremos o impacto dessa estratégia na descarbonização logística e no apoio a projetos ambientais. Essa análise conclui que a aplicação dessas medidas demonstra seu potencial como ferramenta de mitigação e contribuição efetiva para o desenvolvimento ambiental sustentável no contexto empresarial brasileiro, onde inúmeras instituições são beneficiadas com os créditos de carbono gerados a partir dessa compensação.

2. METODOLOGIA

A estimativa das emissões de GEE foi realizada com o uso da calculadora VGP (Gestão de Emissões de Poluentes Atmosféricos), desenvolvida pela Via Green e voltada especificamente para o setor de transporte. A metodologia aplicada segue os princípios estabelecidos pela norma EN 16258:2012 (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN), 2012), seguindo as diretrizes do GLEC *Framework*, da ISO 14083 e do GHG *Protocol Corporate Standard*, garantindo padronização, rastreabilidade e confiabilidade dos resultados.

Cada operação de transporte foi convertida em um cenário específico de cálculo, a partir das variáveis operacionais inseridas. As emissões de CO_2 foram estimadas individualmente para cada viagem, considerando os seguintes parâmetros: distância percorrida, peso da carga transportada, tipo de veículo e taxa de ocupação. O objeto de estudo compreendeu as operações logísticas de transporte rodoviário de cimento ensacado realizadas pela Companhia Industrial de Cimento Apodi, com base em dados reais de entregas destinadas a clientes finais e a Centros de Distribuição da empresa. As rotas abrangeram diferentes regiões do país, com distâncias de até 2.000 km, sendo realizadas, predominantemente, por veículos dos tipos Bitrem, Rodotrem e Carreta LS, que apresentam diferenças significativas no consumo de combustível e, por consequência, nas emissões geradas.

A estimativa de consumo de combustível foi obtida com base no consumo do veículo vazio (0%) e carregado

(100%), sendo ajustada conforme o fator de carga (*load factor*). Os fatores de emissão de GEE para os combustíveis utilizados, considerando o percentual de biocombustível incorporado na matriz brasileira em 2024, são apresentados na Tabela 1. Este estudo considerou o escopo de emissões Tank-to-Wheel (TTW), focando nas emissões diretas da combustão no veículo.

Tabela 1: Fatores de Emissão de GEE (TTW) para combustíveis utilizados no estudo.

Combustível	Percentual de biocombustível incorporado	Fator de emissão (kg CO_2eq/l)	Escopo	Fonte do Fator de Emissão
Diesel	12%	2,6	TTW	Plataforma VGP
Gasolina	27%	1,8	TTW	Plataforma VGP

Fonte: O autor (2025).

Assim, as emissões de GEE (kg CO_2eq) são calculadas com base no produto entre o fator de emissão do combustível (kg CO_2eq/L), o consumo ajustado de combustível (L) em função do *load factor* (adimensional), e a distância percorrida pelo veículo (km).

$$\text{Emissão de GEE} = \text{Fator de Emissão do Combustível} \times (\text{Consumo de Combustível} \times \textit{Load Factor}) \times \textit{Distância} \quad (1)$$

A estimativa das emissões de GEE culmina na certificação do processo de compensação pelo Instituto Via Green. Esse documento oficial valida as informações da compensação, incluindo a data, a empresa responsável, o número de processos compensados, a quantidade de CO_2eq emitida e o volume total neutralizado, conforme evidenciado na Figura 1.


CERTIFICADO

Data Compensação: 03/07/2024 N. Referência: CL63667202407

Certificamos que a empresa CARGOX TRANSPORTES LTDA, aderiu ao ECOFREIGHT, compensando os impactos ambientais gerados pela emissão de gases de efeito estufa das atividades de transporte de carga da empresa CIMENTO APODI, através do apoio a projetos que contribuem para o desenvolvimento sustentável, ajudando a manter o clima de nosso planeta equilibrado.

Data do transporte: 3/7/2024 FRETE VERDE APODI

Empresa Sustentável:	CIMENTO APODI
Nº de processos compensados:	60
Quantidade de CO2eq emitido (t):	44.57
Total CO2eq neutralizado (t):	44.57

A ferramenta de cálculo utiliza a metodologia EN 16258:2012, verificada pela British Standard Institution BSI, e segue as diretrizes da NBR ISO 14064-1 (Parte 1: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa) e do GLEC Framework. O objetivo deste certificado é declarar que o Instituto Via Green assume e reconhece a obrigação de compensar a quantidade de emissões, correspondente ao descritivo acima exposto. Para mais informações, acesse: www.viagreen.org.br utilizando o nº de referência deste certificado.

Figura 1: Certificado de compensação das emissões de gases de efeito estufa referente ao mês de julho de 2024.

3. RESULTADOS

Com base nos dados operacionais coletados a partir de junho de 2024, marco inicial do projeto, e conforme a metodologia apresentada na seção anterior, foram estimadas as emissões mensais de CO_2 geradas pelas operações de transporte. A Figura 2 apresenta a evolução dessas emissões (em toneladas) e os respectivos valores monetários destinados à compensação ao longo do período estudado. Observa-se que o mês de julho de 2024, imediatamente após o início do projeto, registrou o maior volume de compensação financeira, totalizando aproximadamente R$ 12.900,00. Esse montante é direcionado ao apoio de iniciativas ambientais, a exemplo do projeto Agrocortex REDD, que atua na prevenção do desmatamento não planejado de uma área composta integralmente por floresta tropical amazônica. Este projeto está localizado nos municípios de Manoel Urbano, Pauini e Boca do Acre, abrangendo territórios nos estados do Acre e Amazonas (VERRA, 2018).

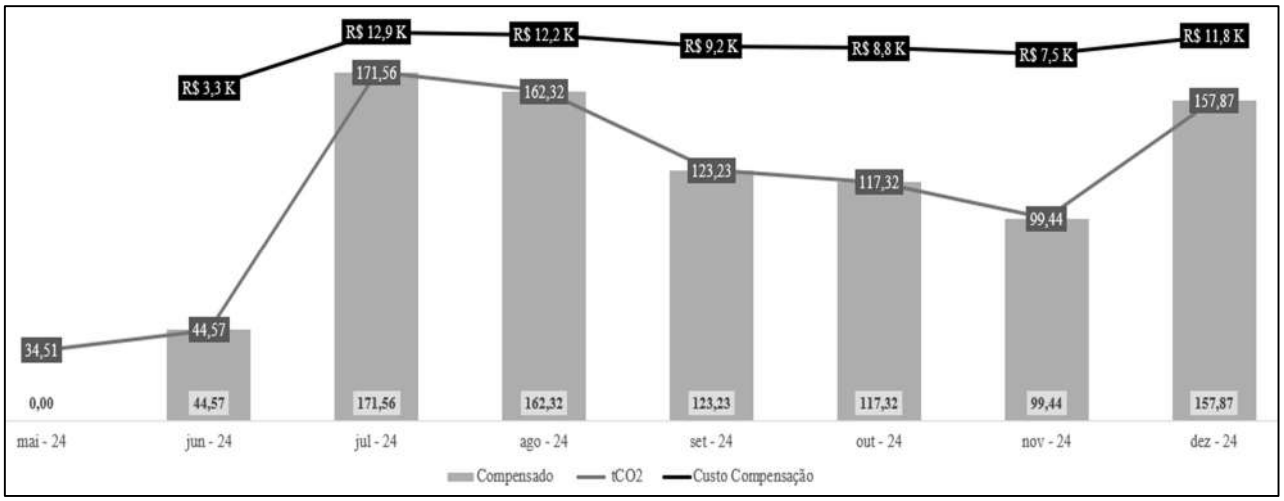


Figura 2: Emissões de CO2 em tonelada e custo monetário de compensação por mês.

Com a exposição da figura 2, o projeto de compensação de emissões de gases de efeito estufa e o ato de aplicar créditos de carbono em algumas operações logísticas praticadas pela Cimento Apodi pode-se concluir que, mesmo validando seu projeto apenas a partir de junho de 2024, foi possível ajudar instituições ambientais com mais de R$ 65.700,00.

Expandindo análise dos resultados, verificou-se que o Rodotrem foi o veículo que mais emitiu CO_2, de acordo com a figura 3, e o mais utilizado no período, visto que grande parte das operações são atendidas quase que em sua predominância com esse tipo de veículo tratando-se de um caminhão pesado articulado, projetado para o transporte de grandes volumes de carga em longas distâncias (Freitas, 2024).

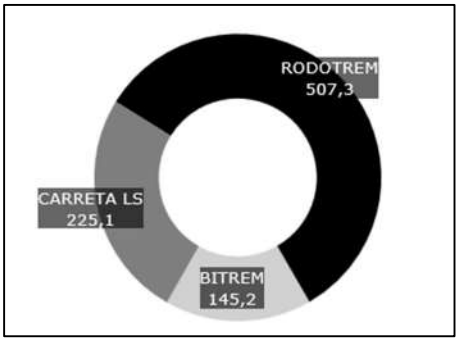


Figura 3: Emissão de CO2 em tonelada por tipo de veículo.

Na distribuição das emissões de CO_2 por faixa de quilometragem, os trajetos de 500 – 1.000 km e de 1.500 – 2.000 km concentram o maior impacto emissivo, evidenciando o caráter de longas distâncias da logística da cimenteira. Essa predominância de médias e longas viagens eleva o total de GEE gerados, o que reforça a necessidade de compensação integral dessas emissões.

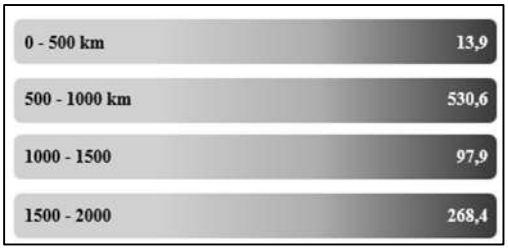


Figura 4: Distribuição de emissão de CO2 em tonelada por faixa de KM geral.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo de caso, focado na Companhia Industrial de Cimento Apodi, demonstrou a aplicação prática e os resultados positivos dessa estratégia. A análise da iniciativa de descarbonização logística revelou um impacto significativo: em apenas sete meses, a partir de junho de 2024, a empresa compensou mais de 876 toneladas de CO_2. Fica evidente, portanto, que a aplicação de créditos de carbono se mostra uma ferramenta eficaz para a cimenteira mitigar a pegada de carbono de sua logística. A iniciativa não apenas neutraliza as emissões, mas também alinha as operações da companhia a metas globais, contribuindo diretamente para os ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e 15 (Vida terrestre), reforçando o papel do setor privado na promoção de um modelo de desenvolvimento mais justo e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, C. L. F. A; ARENAS, M.V. dos S. Venda de crédito de carbono de áreas especialmente protegidas: uma solução para custear o reflorestamento da Amazônia. *Verum: Revista de Iniciação Científica*, v. 5, n. 1, p. 01–20, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.56579/verum.v5i1.1790. Acesso em: 06/07/2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 211, de 31 de outubro de 2006. Regulamenta as combinações de veículos rodoviários de carga (bitrem, rodotrem, tritrem etc.). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 31 out. 2006.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). *EN 16258:2012 – Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers).* Brussels: CEN, 2012.

FREITAS, Ramon. Caminhão rodotrem: características e vantagens para fretes. *Blog Fretebras*, 04 jun. 2024. Disponível em: https://blog.fretebras.com.br/caminhao-rodotrem/. Acesso em: 6 jul. 2025.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL (GBC Brasil). A indústria de cimento emite tanto CO_2 quanto a Índia. Quais são os desafios enfrentados? 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Transport – Tracking Clean Energy Progress 2023.* Paris: IEA, 2023.

KHURSHID, N. et al. Impact of climate change shocks on economic growth: a new insight from non-linear analysis. *Frontiers Environmental Science, Section Environmental Economics and Management*, v. 10, 2022.

ANA LARISSA LEITE RAMALHO (larissa.leite@cimentoapodi.com.br)
IARA GALDINO CARNEIRO (iara.carneiro@cimentoapodi.com.br)
Companhia Industrial de Cimento Apodi, Av. Washington Soares, 3663 - 4º andar - Edson Queiroz, Fortaleza – CE.
CONRADO BERTOLUZZI (conrado@viagreen.com.br)
Instituto Via Green, R. Amador Bueno, 333 - Centro, Santos – SP.
MICHELE DA SILVA GOMES (michele.gomes@cargox.com.br)
CargoX Transportes LTDA., R. Gomes de Carvalho, 1195 - Vila Olímpia, São Paulo – SP.

ESTRATÉGIAS DE MOBILIDADE SUSTENTÁVEL EM ESCOLAS FRANCESAS NO ÂMBITO DA EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: INSPIRAÇÕES PARA O BRASIL

Ana Beatriz Freitas de Melo, Isabela Stéfane Costa de Araújo, Isabel Magalhães
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO
Este artigo analisa estratégias educacionais da França para o desenvolvimento sustentável, com foco na mobilidade. A pesquisa, baseada em documentos oficiais, destaca duas iniciativas centrais: a certificação E3D (Escola ou instituição com uma abordagem de desenvolvimento sustentável) e o Prêmio de ação do eco-delegado. A certificação E3D estrutura o compromisso das escolas em três níveis, enquanto o prêmio incentiva ações práticas lideradas por estudantes eleitos como eco-delegados. Os resultados mostram que diversos projetos vencedores promoveram com sucesso o uso de transportes ativos e coletivos, envolvendo a comunidade e parceiros externos como as prefeituras. Conclui-se que o modelo francês, ao integrar teoria e prática de forma participativa, apresenta-se como uma inspiração eficaz para o Brasil.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A escola desempenha um papel central na construção de uma sociedade socioambientalmente orientada. Neste aspecto, estudantes são designados a serem agentes cruciais na transição ecológica e as escolas lugares exemplares para a proteção ambiental (França, 2019). Na França, a Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS) é oferecida ao longo de todo o percurso escolar com o objetivo de capacitar os alunos para adquirir conhecimentos e competências para melhor compreender e atuar diante da complexidade das questões contemporâneas (França, 2023). Em acréscimo, Magalhães (2025) enfatiza a importância da inserção dessa abordagem desde a infância e acrescenta que para atingir a eficácia das intervenções fazem-se necessárias mudanças comportamentais. No âmbito da mobilidade, Druciaki e Mota (2022) salientam que a criança deve ser reconhecida como sujeito ativo na cidade, sendo essencial integrar suas práticas de mobilidade e percepção do espaço urbano nos processos educacionais. Assim, observa-se a necessidade de considerar a mobilidade sustentável em termos de uma mudança de paradigma. Segundo Cruz e Paulino (2020), essa mudança paradigmática exige a requalificação dos espaços públicos urbanos como estratégia para promover a sustentabilidade e garantir o direito à cidade. Nesse ponto, a educação é um componente essencial da estratégia nacional de transição ecológica para o desenvolvimento sustentável (França, 2025a).

De acordo com o *Ministère de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports* [Ministério da educação nacional, juventude e esportes – França (2021)], atualmente *Ministère de l'Education Nationale et de la Jeunesse* (Ministério da Educação Nacional e Juventude), a França é um dos países onde as políticas de EDS são mais bem implementadas e eficazes. Desse modo, em termos de estratégias, evidencia-se a certificação E3D - *École ou établissement en démarche globale de développement durable* (Escola ou instituição com uma abordagem integral de desenvolvimento sustentável) atribuída às escolas francesas que adotam uma abordagem sólida para o desenvolvimento sustentável (França, 2025a). Assim, o título é concedido com base em especificações nacionais e conta com 14.198 escolas certificadas. Sendo desenvolvido pelo Ministério da Educação Nacional e Juventude para reconhecer e incentivar as instituições escolares comprometidas com a temática do desenvolvimento sustentável (França, 2024a).

Em complementaridade, evidencia-se também o *Prix de l'action éco-déléguée* (Prêmio de ação do eco-delegado) concurso criado pelo Ministério da Educação Nacional e Juventude para incentivar e promover as ações realizadas pelos eco-delegados em favor do desenvolvimento sustentável (França, 2020). Destaca-se que o eco-delegado refere-se ao aluno eleito por turma para exercer o papel de líder das ações, com a missão de identificar projetos que reduzam o impacto energético da escola, promovendo ações ecologicamente responsáveis em toda a comunidade educacional e promovendo ações no entorno da escola (França, 2024b). Desse modo, como mencionado no Guia de ação para a transição ecológica (França, 2023), a componente de ação é inseparável da educação, pois assim permite a implementação do que é ensinado. Dessa forma, as habilidades aprendidas em sala de aula, são consolidadas por intermédio da prática (França, 2021). Em adição, o Ministério da Educação Nacional e Juventude ressalta que o que é compreendido e construído permanece integrado ao longo da vida (França, 2023). Ao tratar de hábitos de transportes, Magalhães (2025) destaca que quando as crianças aprendem desde cedo a utilizar meios de transporte sustentáveis, como o

transporte público e ativo, é mais provável que mantenham esses hábitos na vida adulta e os transmitam às futuras gerações.

No contexto global da busca pela sustentabilidade, o setor dos transportes é um dos principais poluidores atmosféricos (Ríos *et al.*, 2019). Na França, apenas os transportes rodoviários são responsáveis por 42% da poluição do ar e por 31% das emissões dos gases do efeito estufa (França, 2023). Já no cenário brasileiro, o setor de transportes é o que mais provoca impactos na qualidade do ar, apenas a modalidade dos rodoviários é responsável por 90% das emissões de gases poluentes e de CO_2 (Brasil, 2010). Dessa forma, focar neste setor é fundamental para mitigar os impactos ambientais. Assim, busca-se por meio do ambiente escolar promover mudanças fundamentais de hábitos. Nesse aspecto, este artigo visa identificar práticas escolares francesas referentes à certificação E3D e ao prêmio de ação do eco-delegado voltados para a mobilidade sustentável. Considerando a ineficiência da educação para o trânsito nas escolas brasileiras, apontada por Magalhães (2025), essas práticas exitosas podem servir de inspiração para o país.

2. METODOLOGIA

Para entender como a França incentiva ações escolares em favor da transição energética através de medidas como a certificação E3D e o prêmio de ação do eco-delegado, necessitou-se inicialmente compreender o panorama básico do sistema educacional francês e a sua relação com a abordagem da EDS. Para tanto, consultou-se os *sites* institucionais dos Ministérios Franceses envolvidos. Do Ministério da Educação Nacional, Ensino Superior e Pesquisa, levantou-se publicações relativas à EDS (França, 2025a), à certificação E3D (França, 2013; 2024a) e ao prêmio eco-delegado (França, 2020; 2024b). Além disso, considerou-se também os documentos que abordam os programas de ensino nacional francês: ensino infantil (França, 2025b); ensino fundamental (França, 2024c); e ensino médio (França, 2025c). Do Ministério da Educação Nacional e Juventude, considerou-se dois documentos, um mais geral que envolve a EDS no âmbito da certificação e da premiação (França, 2023) e um específico do prêmio eco-delegado (França, 2024d). Por fim, do antigo Ministério da Educação Nacional, Juventude e Esportes, considerou-se uma publicação mais abrangente que aborda a EDS e a certificação (França, 2021). Com base na leitura detalhada desses documentos, foi possível identificar estratégias que levaram à certificação E3D e ao prêmio eco-delegados. Em relação à certificação E3D destaca-se a abordagem, os agentes envolvidos, os objetivos, o procedimento de obtenção, os níveis de certificação e, por último, um exemplo prático de possibilidade de atuação no contexto escolar de ações que facilmente podem ser adaptadas à realidade brasileira. No que concerne ao prêmio eco-delegado, apresenta-se os mesmo embasamentos, acrescentando-se o critério de seleção dos projetos vencedores nacionais nos quais o projeto apresentou relação com a promoção da mobilidade sustentável.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A EDS é desenvolvida de forma transversal nos programas de ensino do infantil ao ensino médio nas escolas francesas, a qual está incluída no Código de Educação entre as missões da escola (França, 2025a). Destaca-se, de acordo com o programa da pré-escola, que os primeiros anos de escolaridade estabelecem a base educacional e pedagógica dos estudantes que se desenvolvem ao longo do percurso escolar, além de construir pontes entre a família e a escola (França, 2025b). Em razão dos conteúdos de EDS serem mais explícitos e precisos (França, 2021) no ensino fundamental, anos iniciais e finais, sua organização torna-se mais coerente e progressiva (França, 2024c). Por último o ensino médio, etapa na qual se consolidam as aprendizagens dos anos anteriores e garante a solidez do conteúdo (França, 2025c). Inserida nesse cenário, a EDS permite compreender o mundo em sua complexidade, levando em consideração as interações entre o meio ambiente, a sociedade, a economia e a cultura (França, 2013).

Nesse contexto, a certificação E3D considera a integração entre ensino, projetos escolares e iniciativas, realizadas durante ou fora do horário escolar. Trata-se de uma dinâmica coletiva que reúne alunos, professores, diretores, funcionários, responsáveis pelos estudantes e parceiros externos, assim como autoridades locais. O intuito é alinhar o ensino e as iniciativas, em toda a escola, para promover o desenvolvimento sustentável (França, 2023). Para isso, o diretor da escola constitui um comitê para liderar os projetos e definir as prioridades com base no diagnóstico e na realidade da instituição no que diz respeito aos problemas que afetam o desenvolvimento sustentável dentro da escola. Neste ponto, observa-se a importância da atuação do eco-delegado e do representante da EDS na escola, normalmente um professor, os

quais fazem parte do comitê formado. Ressalta que o professor de referência tem o papel de coordenar a temática de desenvolvimento sustentável, além de fazer a ligação com todas as partes interessadas e propiciar a formação continuada dos educadores, assim como buscar financiamentos para os projetos (França, 2023). Essa abordagem colaborativa entre os alunos, professores e comunidade escolar reforça o conceito de territórios educativos, conforme defendido por Cruz e Paulino (2021), ao fomentar práticas pedagógicas que integram o entorno urbano aos processos de aprendizagem ambiental e cidadã.

Ademais, para obter o certificado a escola deve solicitar às autoridades acadêmicas, sendo analisado pela Comissão Acadêmica de Educação para o Desenvolvimento Sustentável, de acordo com os procedimentos definidos, os quais podem variar dependendo da região. No geral, a estrutura básica é definida pelo Ministério da Educação Nacional e Juventude, contendo: a descrição da abordagem; os métodos de implementação, destacando que a abordagem deve incluir uma abertura ao contexto social, econômico e ambiental da escola; integração no projeto escolar; a formalização de parcerias; o estado do processo, destacando que a implementação, mesmo modesta, do processo deve ser perceptível desde o primeiro ano de sua implementação; e por último, o projeto de comunicação sobre a abordagem (França, 2013).

Vale ressaltar que o certificado possui três níveis: 1 – Compromisso; 2 – Aprofundamento; e 3 – Implantação (França, 2013). O nível 1 se refere à abordagem que leva em conta as relações entre o meio ambiente, a sociedade, a economia e outras dimensões específicas do desenvolvimento sustentável, apresentada ao conselho escolar para ser incluída no projeto de estrutura escolar. Desde esse nível tem-se início o diálogo com os parceiros. O nível 2 apresenta uma formação progressiva do corpo docente e gestor da escola, além de uma coordenação interna de todas as atividades relacionadas ao desenvolvimento sustentável (ensino, projetos, workshops científicos, excursões escolares e outros). Neste nível, tem o aprofundamento da relação com os parceiros, que se reflete na operação e nas realizações associadas ao projeto, com as primeiras ações de promoção e comunicação. Por fim, o nível 3 é referente a alteração global no funcionamento da escola que permita estabelecer a contribuição da escola para um desenvolvimento sustentável, tendo a presença de um conjunto de ações marcantes. Além do desenvolvimento de uma ética de desenvolvimento sustentável específica para a estrutura envolvida e a estratégia de sustentabilidade é claramente declarada (França, 2013).

Como exemplo, o documento "V*ademecum* – educação para o desenvolvimento sustentável até 2030" (França, 2021) aponta que a colaboração em torno da mobilidade sustentável pode ser iniciada para promover o transporte sustentável, instalando garagem para bicicletas e organizando um plano de deslocamento a pé, envolvendo a escola, os pais e a prefeitura. Dessa forma, o projeto E3D utiliza um conjunto de conhecimentos e habilidades alinhados aos programas de ensino, garantindo a dimensão científica dos conceitos abordados. Assim, a integração no projeto escolar incentiva o envolvimento dos alunos e de toda a comunidade educativa em um projeto cívico comum e concreto para o desenvolvimento sustentável (França, 2013).

Dessa maneira, outra estratégia que merece destaque é o Prêmio de ação do eco-delegado, o qual tem periodicidade anual. O concurso tem como objetivo conscientizar e incentivar os estudantes, assim como promover as iniciativas realizadas em suas escolas com o apoio da comunidade educacional e de parceiros externos (França, 2020). Conforme o portal nacional de informação e apoio para profissionais da educação, *ÉDUSCOL*, o âmbito de atuação abrange temas ligados ao meio ambiente. Dentre as regras, ressalta a necessidade da interseção de pelo menos dois temas sobre desenvolvimento sustentável ou dois Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs) da Agenda 2030. O concurso é aberto a estudantes de escolas de educação infantil, fundamental e ensino médio localizadas na França continental e em departamentos e comunidades ultramarinas. A competição é organizada em três categorias distintas: *école* (ensino infantil e fundamental anos iniciais); *collège* (ensino fundamental anos finais); e *lycée* (ensino médio), cada uma dá origem a um prêmio específico (França, 2024b).

Além disso, desde a edição de 2024, acrescentou-se a categoria "prêmio especial" que está relacionada à temática estabelecida em cada concurso específico (França, 2024b). Neste contexto, a 4ª edição do prêmio teve o prêmio especial sobre sobriedade energética, como parte do Plano Nacional de Sobriedade Energética lançado em junho de 2023. Sendo o vencedor o *Collège César-Franck à Amiens*, com o projeto intitulado "*Une journée sans* CO_2" (Um dia sem CO_2). Esta escola tem a certificação E3D nível 2 e para o projeto em

questão visaram promover a mobilidade suave. O projeto afetou todos os estudantes da escola, 488 alunos, mais os alunos da escola de ensino infantil da *l'école primaire du Pigeonnier*, localizada nas imediações, 175 alunos. O objetivo foi organizar um dia de conscientização sobre mobilidade limpa como alternativa ao carro. Assim, durante o dia determinado, 4 de junho de 2024, os eco-delegados incentivaram, através de cartazes e estandes, os alunos e seus pais, assim como os próprios moradores de *Amiens* a se deslocarem por meio de caminhadas, bicicletas, transporte público ou outra forma ecologicamente responsável, a fim de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2). Para mensurar o impacto deste dia foi realizado um questionário para estudar os hábitos de viagem dos moradores e identificar alternativas aos obstáculos encontrados pelos participantes. O projeto contou com dois parceiros externos, dentre eles a prefeitura local, e trabalhou com cinco ODSs da Agenda 2030 (França, 2024d): 4, 7, 11, 13 e 17, relativos respectivamente à educação de qualidade, energia limpa, cidades sustentáveis, mudanças climáticas e parcerias para implementação.

Ademais, na categoria *collège* o vencedor, *Collège La Quintinye à Noisy-le-Roi*, apresentou o projeto intitulado "*Un collège éco-mobile*" (Uma escola com mobilidade sustentável). Esta escola tem a certificação E3D nível 3 e possui 630 alunos. A ideia para o projeto iniciou após a constatação que mais de um quarto dos estudantes desloca-se para a escola de carro. Assim, o projeto visou incentivar toda a comunidade educativa a utilizar meios de transportes ativos ou públicos e, por meio de cartazes, apresentaram propostas para a reforma e ampliação do bicicletário presente na escola. Ademais, contribuíram para organizar o evento do dia da bicicleta: o programa contou com diversas oficinas, incluindo apresentações de ciclovias por autoridades locais e consertos de bicicletas. O projeto contou com a participação de seis parceiros externos, dentre eles a prefeitura local, e trabalhou com quatro ODSs (3 – saúde e bem-estar, 11 – cidades sustentáveis, 13 – mudanças climáticas e 17 – parcerias para implementação) (França, 2024d). Em relação à 3ª edição, o vencedor *Lycée du Couserans à Saint-Girons* na categoria *lycée* com o projeto "*le pari de l'éco-mobilité*" (A aposta na eco-mobilidade), focou na promoção do uso de bicicletas através de pesquisas com os usuários da escola, oficinas com os parceiros, conscientização sobre segurança no trânsito, assim como o fortalecimento da segurança ao redor da escola (Bayard Jeunesse Éducation, 2023). Enquanto que na 2ª edição, na categoria *école*, o vencedor *L'école Roger Salengro à Lewarde,* dentre as medidas prevista pelo projeto, os alunos incentivam a utilização de transportes suaves para se deslocarem até a escola (Bayard Jeunesse Éducation, 2022). Dessa forma, observa-se que apenas na primeira edição do prêmio nacional não houve projeto vencedor relacionado à temática de mobilidade sustentável. Em suma, nota-se que as duas ações educativas proporcionam envolvimento de toda comunidade educativa, como também os responsáveis dos estudantes e até mesmo moradores da região. Além disso, destaca-se que a função dos eco-delegados é potencializada quando a instituição de ensino está envolvida em uma abordagem global de desenvolvimento sustentável com o selo E3D (França, 2024b).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estratégias de práticas francesas aqui apresentadas evidenciam que o sucesso das iniciativas de Educação para o Desenvolvimento Sustentável reside na abordagem sistêmica e integrada. A certificação E3D não atua apenas como um selo, mas como um processo que estrutura a gestão escolar em torno da sustentabilidade, enquanto a figura do eco-delegado empodera os estudantes, transformando-os em protagonistas da mudança. A articulação entre a comunidade escolar, os pais e os parceiros externos, como as autoridades locais, mostra-se um fator crucial, permitindo que as ações ultrapassem os muros da escola e gerem impacto real no ambiente urbano. Assim, destaca-se que a combinação de um programa estruturado com o incentivo à ação prática é fundamental para consolidar o aprendizado e promover uma cultura de sustentabilidade.

Diante da ineficiência apontada por Magalhães (2025) na educação para o trânsito no Brasil, a adaptação dos princípios do modelo francês surge como um caminho promissor. Mais do que replicar as ações, trata-se de absorver a filosofia de integrar a educação ambiental (e para o trânsito) ao projeto pedagógico de forma transversal e de valorizar o protagonismo estudantil. Como trabalhos futuros (e desdobramentos práticos), a implementação de projetos-piloto inspirados na certificação E3D e na figura do eco-delegado em escolas brasileiras poderia ser um passo inicial para avaliar a viabilidade e os ajustes necessários à realidade nacional. Tais iniciativas poderiam não apenas qualificar a educação ambiental e para o trânsito, mas também fortalecer os laços entre a escola e a cidade, contribuindo para a formação de cidadãos mais conscientes e para a construção de espaços urbanos mais sustentáveis.

Agradecimentos
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) para viabilização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil (2010) Setor de transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar. Disponível em: www.gov.br/mma/pt-br/noticias/setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactos-na-qualidade-do-ar (acesso em 02/07/2025).

Bayard Jeunesse Éducation (2022) Bravo aux 4 lauréats du prix de l'action éco-déléguée 2022. Disponível em: www.bayardeducation.com/nouveautes/les-4-laureats-du-prix-de-laction-eco-deleguee-2022-sont/ (acesso em 02/07/2025).

Bayard Jeunesse Éducation (2023) Lauréats du Prix de l'action éco-déléguée : 4 projets écolos et inspirants pour l'école ! Disponível em: www.bayardeducation.com/nouveautes/laureats-du-prix-de-laction-eco-deleguee-4-beaux-projets-ecolos-pour-lecole/ (acesso em 02/07/2025).

Cruz, S. e S, Paulino (2020) Urban Commons in Active Mobility Experiences. *International Journal of the Commons*, v. 14, n. 1, p. 539–552. DOI: doi.org/10.5334/ijc.1018

Cruz, S. e S, Paulino (2021) Formas de ensinar a partir da abordagem sobre sustentabilidade e mobilidade urbana. *SciELO Preprints*. DOI: doi.org/10.1590/SciELOPreprints.2741

Druciaki, V. P. e C. S. D. Mota (2022) Para quem são as nossas cidades? *Revista Territorial*, Goiás, v. 11, n. 2, p. 191-208. DOI: 10.31668/rt.v11i2.13729

França (2013) Démarche globale de développement durable dans les écoles et les établissements scolaires (e3D) - référentiel de mise en œuvre et de labellisation. Disponível em: www.education.gouv.fr/bo/13/Hebdo31/MENE1320526N.htm?cid_bo=73193 (acesso em 02/07/2025).

França (2019) Une École engagée pour le développement durable et la transition écologique. Disponível em: https://pedagogie.ac-toulouse.fr/une-ecole-engagee-pour-le-developpement-durable-et-la-transition-ecologique (acesso em 02/07/2025).

França (2020) Prix de l'action éco-déléguée de l'année. Disponível em: www.education.gouv.fr/prix-de-l-action-eco-deleguee-de-l-annee-307360 (acesso em 02/07/2025).

França (2021) Vademecum - éducation au développement durable à l'horizon 2030. Disponível em: https://eduscol.education.fr/document/5239/download?attachment (acesso em 02/07/2025).

França (2023) Agir pour la transition écologique dans les écoles, collèges et lycées. Disponível em: https://eduscol.education.fr/document/51026/download?attachment (acesso em 02/07/2025).

França (2024a) La labellisation E3D. Disponível em: https://eduscol.education.fr/1118/la-labellisation-e3d (acesso em 02/07/2025).

França (2024b) Les éco-délégués. Disponível em: https://eduscol.education.fr/1121/les-eco-delegues (acesso em 02/07/2025).

França (2024c) Au BO spécial du 26 novembre 2015 : programmes d'enseignement de l'école élémentaire et du collège. Disponível em: www.education.gouv.fr/au-bo-special-du-26-novembre-2015-programmes-d-enseignement-de-l-ecole-elementaire-et-du-college-3737 (acesso em 02/07/2025).

França (2024d) Prix de l'action éco-déléguée 2024. Disponível em: https://edd.ac-versailles.fr/IMG/pdf/2024_palmares_prix_de_l_action_eco-deleguee.pdf (acesso em 02/07/2025).

França (2025a) L'éducation au développement durable. Disponível em: www.education.gouv.fr/l-education-au-developpement-durable-7136 (acesso em 02/07/2025).

França (2025b) Programmes et horaires à l'école maternelle. Disponível em: www.education.gouv.fr/programmes-et-horaires-l-ecole-maternelle-4193 (acesso em 02/07/2025).

França (2025c) Les programmes du lycée général et technologique. Disponível em: www.education.gouv.fr/les-programmes-du-lycee-general-et-technologique-9812 (acesso em 02/07/2025).

Magalhães, I. (2025) Educação básica e sustentabilidade: uma análise exploratória da formação para hábitos de transporte sustentável. *Transportes*, v. 33, p. e3058, DOI: doi.org/10.58922/transportes.v33.e3058

Ríos, R.; M. Quintana; M. Ramírez; E. Ortigoza; V. Oxilia e G. Blanco (2019) Use of electric vehicles to achieve sustainable development goals in countries with surpluses of hydroelectricity: case of Paraguay. In *Anais do 2019 IEEE CHILECON* (Valparaiso, Chile). IEEE, p. 1-6, DOI: 10.1109/CHILECON47746.2019.8988038

Ana Beatriz Freitas de Melo (anabeatrizfreitasm@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, R. da Tecnologia, SN – Lagoa Nova, Natal – RN, Brasil
Isabela Stéfane Costa de Araújo (isabela.costa.072@ufrn.edu.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, R. da Tecnologia, SN – Lagoa Nova, Natal – RN, Brasil
Isabel Magalhães (isabel.magalhaes@ufrn.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, R. da Tecnologia, SN – Lagoa Nova, Natal – RN, Brasil

EXPLORANDO SISTEMAS DE COMPARTILHAMENTO DE BICICLETAS: UM ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO

Gabriel Bezerra Costa de Lima[1], Lorena Mirela Ricci [2], Mariana Marques de Moraes[2], Helena Oliveira Filagrana[1], Lino Guimarães Marujo[2], Marcio de Almeida D'Agosto[2]

[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Escola Politécnica (POLI), [2]Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Instituto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE)

RESUMO
O presente estudo analisa como condições climáticas e parâmetros físicos afetam a demanda por sistemas de compartilhamento de bicicletas (SCB) em contextos urbanos tropicais. Utilizando dados do sistema Integra UFRJ, foram aplicadas técnicas de Análise Exploratória de Dados para investigar padrões sazonais e correlações entre clima, perfil de usuários e volume de viagens. Os resultados indicam que a primavera é a estação mais favorável ao uso das bicicletas, e que fatores como temperatura elevada e precipitação intensa impactam negativamente o número de viagens. A discussão propõe medidas operacionais adaptativas para maior resiliência climática. Este artigo contribui para o planejamento de mobilidade ativa em regiões tropicais, promovendo sustentabilidade e eficiência operacional.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mobilidade urbana desempenha um papel fundamental no desenvolvimento sustentável, afetando diretamente as dimensões econômica, social e ambiental. Nesse contexto, a reestruturação das estratégias de mobilidade tem se mostrado essencial, com destaque para os sistemas de compartilhamento de bicicletas (SCB), integrados ao transporte público urbano. Além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, esses sistemas trazem benefícios econômicos e sociais significativos (Banister, 2008).

O uso de SCBs cresceu nos últimos anos, até 2021 foram mapeadas 42 SCBs em operação no Brasil (Binatti et al., 2022), sendo que a maior parte dos sistemas estão localizados em grandes centros urbanos, de acordo com a operadora Tembici (Revista Bicicleta, 2023) houve um crescimento de 123% no número de usuários do sistema oferecida pela empresa desde 2018 até 2023. No caso da integração com o ambiente universitário, universidades que se encontram dentro do ambiente urbano têm a possibilidade de receber estações dos SCBs, porém quando não existe esta opção devido a limitações, podem ser instaurados sistemas exclusivos para o compartilhamento de bicicletas, que é o caso do Integra UFRJ.

O projeto Integra UFRJ se incorporou ao ambiente da UFRJ, que já funcionava como um *living lab*, tendo suas atividades inseridas nesse contexto focado em mobilidade ativa e sustentável no campus Cidade Universitária, a necessidade surgiu devido às limitações geográfica que existe no campus universitário que está localizado em uma ilha com cercada pelo mar de um lado e por uma via expressa (linha vermelha) do outro, o que limita a conexão com os bairros mais próximo, dificultando o acesso aos sistema oferecido ao centro urbano. Além das questões geográficas, que dificultam a existência do sistema em si, existem fatores ambientais, como temperatura elevada e chuvas frequentes — comuns em regiões tropicais — que podem limitar o desempenho e a atratividade desses sistemas (Buehler & Pucher, 2012).

Este trabalho aborda a resiliência dos SCBs às mudanças climáticas globais, analisando como fatores climáticos e urbanos influenciam a adesão ao sistema Integra UFRJ. Conforme apontam Fishman et al. (2014), a integração de SCBs ao planejamento climático é essencial para garantir sua eficácia em longo prazo. A pesquisa, portanto, utiliza uma metodologia baseada em análise exploratória de dados para gerar insights quantitativos e qualitativos. Além de identificar padrões de uso, o estudo sugere ajustes operacionais para melhorar a eficiência do sistema. Dessa forma, o trabalho apresenta uma abordagem integrada que alia resiliência climática e sustentabilidade urbana, orientada para um futuro mais responsável e adaptável às mudanças climáticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram coletados dados mensais de uso do sistema Integra UFRJ. O período avaliado foi de outubro de 2023 a setembro de 2024, no qual existiam 65 bicicletas em operação. O sistema opera das 8:00 às 18:00 horas, de segunda a sexta-feira, com limite máximo de duração da viagem de 60 minutos. Os dados coletados para análise foram os horários de retirada e devolução das bicicletas, tempo de

duração das viagens, idade dos usuários e gênero. Dados climáticos por estação do ano foram obtidos do Instituto ClimaTempo, enquanto informações sobre infraestrutura cicloviária completaram o conjunto. A partir dos dados coletados do sistema Integra UFRJ e do clima, então foi realizada uma análise exploratória de dados, na qual é observada qual foi a influência das condições climáticas na adesão dos usuários ao sistema, sendo correlacionados os perfis de usuários, padrões temporais e volume de viagens.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até o momento, o projeto apresenta resultados promissores, promovendo mobilidade ativa em suas 7 estações. Mais de 35 mil viagens foram realizadas pelo sistema Integra UFRJ, 20 mil somente no último ano (2024). Como visto na Figura 1, o perfil etário dos usuários do Integra UFRJ indica forte concentração na faixa dos 18 aos 24 anos. Esse padrão reflete a demografia esperada de um campus universitário, com prevalência de estudantes de graduação e jovens profissionais. Tal distribuição sugere que a familiaridade com tecnologias de mobilidade digital e a disposição para adotar meios alternativos sustentáveis estão mais presentes nesse público. A ausência relativa de usuários em faixas etárias mais elevadas pode estar associada a barreiras físicas, culturais ou de acessibilidade. Políticas de incentivo específicas, como treinamento para novos usuários ou melhorias ergonômicas nas bicicletas, podem ajudar a ampliar o público atendido.

A Figura 2 representa à distribuição por gênero (M- masculino, F- feminino, "-" Não identificado, O- outros) e mostra uma maior participação de homens no uso das bicicletas compartilhadas. Essa diferença é comum em sistemas de micromobilidade em todo o mundo, e pode estar relacionada à percepção de segurança no tráfego urbano. Para equilibrar esse indicador, é fundamental investir em infraestrutura segura, bem iluminada, e promover campanhas voltadas à inclusão feminina na mobilidade ativa, além de considerar a escuta ativa das demandas de usuárias atuais e potenciais.

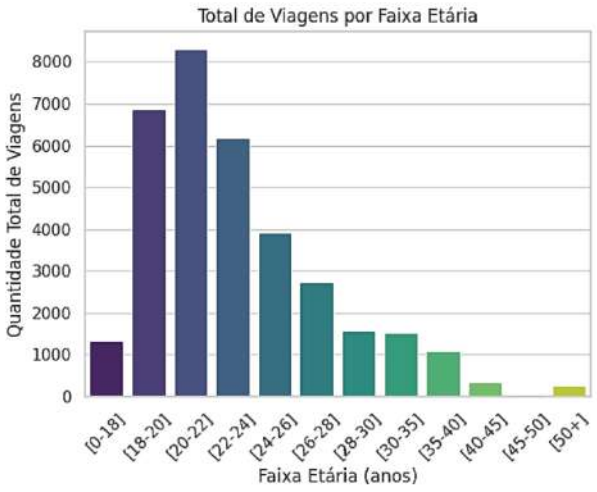


Figura 1: Faixa etária

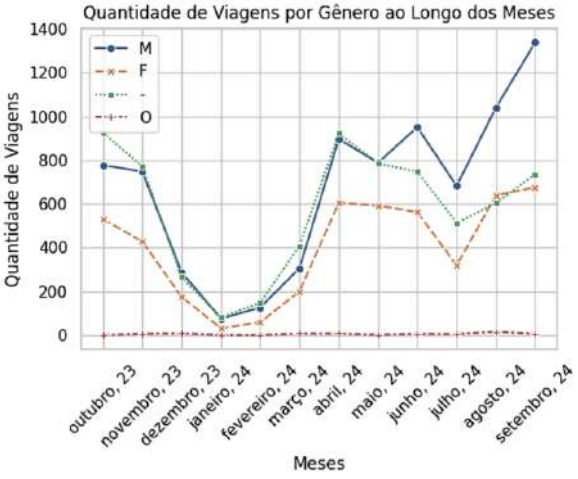


Figura 2: Gênero por quantidade de viagens

A Figura 3 apresenta a análise horária da distribuição das viagens do sistema Integra UFRJ por dia da semana. A regularidade ao longo da semana mostra que o sistema apresenta robustez em relação a maturidade e consolidação como alternativa à mobilidade do Campus. A regularidade também reforça o alinhamento com a rotina universitária. Picos em horários de entrada e saída, e estabilidade nos dias úteis, indicam que o sistema responde bem à demanda institucional. Terça, quarta e quinta-feira concentram a maior parte das viagens realizadas no sistema Integra UFRJ. Esse padrão reflete a rotina acadêmica e administrativa da universidade, na qual há maior fluxo de pessoas circulando pelo campus, o que sugere uma forte dependência do calendário institucional. Esses dados reforçam a necessidade de calibrar a disponibilidade de bicicletas e a logística de manutenção de acordo com o calendário semanal, concentrando esforços operacionais nos dias de maior demanda e aproveitando os períodos de menor uso para realizar reparos e realocação da frota.

A Figura 4 mostra que a tendência da duração média das viagens ao longo das estações do ano revela diferenças sutis, mas significativas. Durante a primavera, outono e inverno além de haver maior volume de viagens, observa-se também uma tendência de maior tempo médio por deslocamento, o que pode indicar uma experiência de uso mais confortável e prolongada, favorecida pelas condições climáticas amenas. Em contraste, no verão, as viagens tendem a ser mais curtas, provavelmente em função do desconforto térmico associado às altas temperaturas e ao aumento da sensação de exaustão, levando os usuários a realizarem apenas deslocamentos essenciais ou optarem por trajetos mais rápidos. Essa variação na duração conforme a estação evidencia que o clima não impacta apenas a quantidade de viagens, mas também a qualidade e o comportamento do deslocamento. Isso sugere a importância de estratégias sazonais que vão além da oferta de bicicletas — como o fornecimento de infraestrutura de apoio (bebedouros, sombras, áreas de descanso) e campanhas para informar sobre rotas mais adequadas em diferentes períodos do ano.

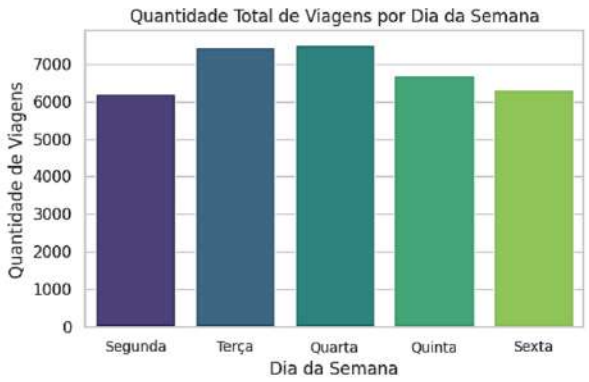


Figura 3: Dia da semana

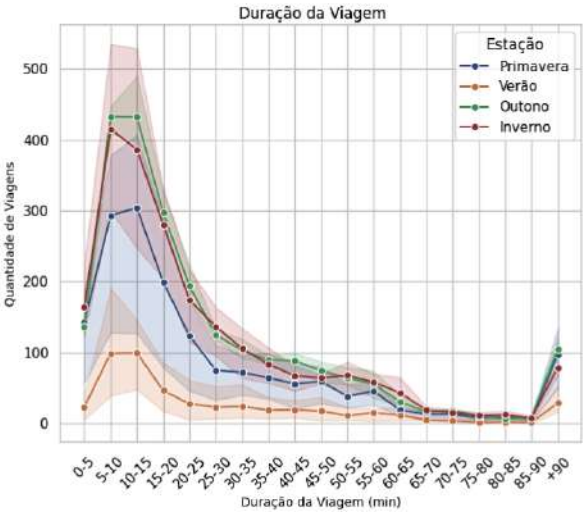


Figura 4: Duração da viagem por estação do ano

A Figura 5 relaciona a hora de retirada das bicicletas com o volume de viagens, segmentado por estação do ano, revela um padrão bimodal bem definido: com pico principal 12h e um segundo entre 16h e 17h. Esse comportamento está intimamente ligado aos horários de refeições entre as atividades acadêmicas. A primavera, inverno e outono apresentam os picos mais nítidos e consistentes, o que corrobora as análises anteriores de que essas estações proporcionam as condições climáticas mais favoráveis à mobilidade ativa. No verão, embora o padrão de horários se mantenha, observa-se redução de intensidade, provavelmente causada pelas altas temperaturas, que desestimulam os deslocamentos nos horários mais quentes. Esse padrão evidencia a importância de ajustar a oferta de bicicletas e monitorar a ocupação das estações ao longo do dia, considerando também a sazonalidade.

A distribuição das horas de devolução das bicicletas (Figura 6), também estratificada por estação do ano, reforça o padrão bimodal identificado nas retiradas, com picos semelhantes aos encontrados com as retiradas. A coerência entre os horários de retirada e devolução indica que a maioria das viagens ocorre dentro de intervalos curtos — típicos de deslocamentos de última milha — reforçando a função do sistema como complemento de trajetos do campus. No verão, os picos de devolução permanecem iguais ao encontrado na retirada.

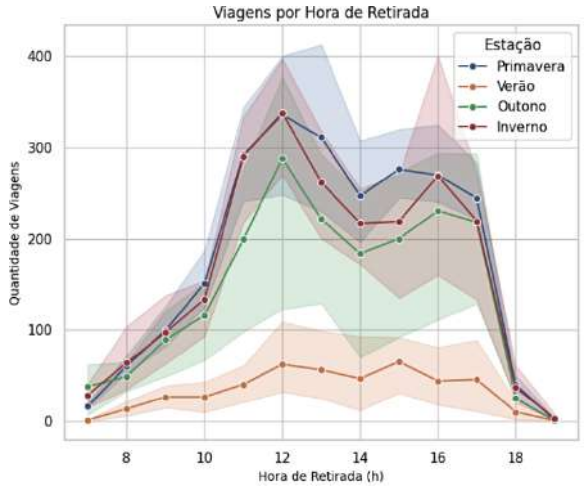


Figura 5: Hora de retirada por estação do ano

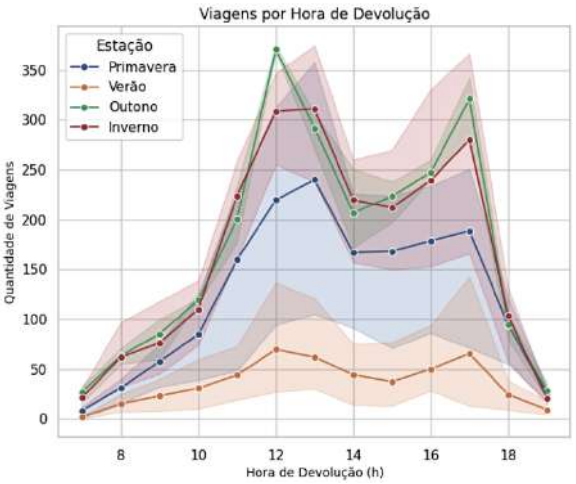


Figura 6: Hora de devolução por estação do ano

Os resultados evidenciam a vulnerabilidade dos SCBs frente às condições climáticas adversas. No contexto do Integra UFRJ, o uso das bicicletas é sensivelmente reduzido durante o verão, impactado pelo desconforto térmico e pela ocorrência de chuvas intensas. Por outro lado, representa uma janela estratégica para manutenções estratégicas, oferecendo condições favoráveis para a promoção da mobilidade ativa em períodos de maior demanda. Durante esses períodos, a quantidade de viagens tende a ser reduzida, o que proporciona uma janela de tempo adequada para ajustes e reparos nas bicicletas sem afetar significativamente o serviço. Com a manutenção dos veículos e estações, além da atualização do aplicativo nesses períodos, minimiza-se o impacto no atendimento. Essa estratégia operacional é especialmente importante para sistemas com frota limitada, como é o caso do Integra UFRJ que conta com 65 bicicletas.

4. CONCLUSÃO

Os resultados confirmam que parâmetros climáticos afetam significativamente o comportamento de viagens no sistema Integra UFRJ. O impacto desses fatores reforça a necessidade de estratégias adaptativas para garantir a eficiência do serviço em contextos tropicais. A aplicação da análise exploratória de dados destacou desafios enfrentados em regiões tropicais para subsidiar decisões estratégicas. As recomendações operacionais propostas incluem: o planejamento de manutenções e atualizações tecnológicas durante períodos de menor uso — como o verão —, além da implementação de melhorias na infraestrutura cicloviária. Tais medidas podem tornar o sistema mais resiliente e eficiente, promovendo sua expansão e replicação em outras instituições públicas de ensino superior, contribuindo para a transição para uma mobilidade urbana sustentável. Espera-se que os dados coletados consolidem a expansão do sistema e incentivem sua replicação em outras instituições.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. Transport Policy, 15(2), 73-80.

Binatti, G., Batalha, Y., de Castro, J., Oliveira, M. S. (2022). Latin American bike sharing ecosystem overview: from data collection to implementation model portraits. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 14. https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e20210066

Buehler, R., & Pucher, J. (2012). Cycling to work in 90 large American cities: New evidence on the role of bike paths and lanes. Transportation, 39(2), 409-432.

Caggiani, L., Camporeale, R., Marinelli, M., & Ottomanelli, M. (2019). User satisfaction based model for resource allocation in bike-sharing systems. Transport Policy, 80, 117-126.

ClimaTempo. (2024). Dados meteorológicos por estação. Disponível em: https://www.climatempo.com.br

Fishman, E., Washington, S., & Haworth, N. (2014). Bike share's impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31, 13-20.

Mukku, V. D., Salah, I. H., Roy, A., & Assmann, T. (2022). Evaluation of station distribution strategies for next-generation bike-sharing system. In Conference on Sustainable Urban Mobility (pp. 1358-1373). Cham: Springer Nature Switzerland.

Revista Bicicleta. (2023). Usuárias de bikes compartilhadas mais que dobrou na América Latina desde 2018. Disponível em: <https://revistabicicleta.com/destaque/usuarias-de-bikes-compartilhadas-mais-que-dobrou-na-america-latina-desde-2018/>. Acesso em: 12 de setembro de 2025.

Sistema Integra UFRJ. (2024). Base de dados operacionais internos – Laboratório de Transporte de Carga (LTC-COPPE)

Gabriel Bezerra Costa de Lima (gabrielbcdelima@poli.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Escola Politécnica (POLI), Ilha do Fundão - Av. Athos da Silveira Ramos,Bloco D, 2 andar - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909

EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO RUÍDO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO: A IMPORTÂNCIA DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA PARA A QUALIDADE DE VIDA

Dalton Domingues de Carvalho Neto[1], Leonardo Mangia Rodrigues[1, 2], Juliana Gomes Martins[1], Gabriela Maciel Wagner[1], Lorena Mirela Ricci[1], Lino Guimarães Marujo [1], Marcio de Almeida D´Agosto[1]

[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Universidade Estadual do Rio de Janeiro

RESUMO

O presente estudo investigou os impactos da exposição prolongada ao ruído em motoristas de caminhão durante operações de última milha e os potenciais benefícios da eletrificação da frota. Realizando uma revisão bibliográfica com foco em evidências científicas sobre os efeitos do ruído no desenvolvimento de doenças auditivas, cardiovasculares e psicossociais. Os resultados demonstram que os caminhões a combustão interna expõem os motoristas a níveis de ruído superiores a 85 dBA, contribuindo para perdas auditivas, estresse crônico, distúrbios do sono e maior risco de acidentes. Em contraste, veículos elétricos podem alcançar reduções de ruído de aproximadamente 4,4 dBA em comparação com os veículos de combustão tradicionais, promovendo um ambiente de trabalho mais saudável. Conclui-se que a transição para caminhões elétricos não apenas melhora as condições de saúde ocupacional dos condutores, mas também fortalece estratégias sustentáveis em zonas urbanas, alinhando-se a políticas públicas voltadas à mobilidade limpa e à qualidade de vida.

1. INTRODUÇÃO

Destacam-se entre essas atividades antrópicas, especialmente a queima de combustíveis fósseis, o uso de energia, o transporte, determinados processos industriais e o desmatamento por queimadas, que resultam na emissão de dióxido de carbono (CO_2). Além disso, as práticas agropecuárias e a destinação de resíduos sólidos apresentam um elevado potencial de emissão de metano (CH_4) (Carvalho Neto e Silva, 2024).

O tráfego rodoviário é considerado uma das principais fontes emissoras desses gases, o qual contribuem para além da elevação do aquecimento global, o enfrentamento de doenças respiratórias oriundas de centros urbanos se torna necessário, pois o óxido de nitrogênio (NO_x), CO, material particulado (MP) e material particulado suspenso (MPS) são os principais gases emitidos pela combustão interna dos motores movidos a combustíveis fósseis (Kang, Ota e Ushijima, 2024).

A utilização de veículos elétricos no transporte de carga proporciona como benefício a redução da emissão dos GEE oriundos da queima dos combustíveis fósseis, mas também a redução da poluição sonora, sendo essa redução em, aproximadamente, 4,4 dBA quando comparados a veículos movidos a combustão interna (Baclet *et al*., 2022; Tsoi *et al*., 2023). Tal medida proporciona uma melhora na qualidade de vida da população local, bem como do motorista. Amoadu, Sarfo e Ansah (2024), constataram que motoristas expostos a longas jornadas de trabalho em ambiente propenso a poluição sonora, sofriam condições psicossociais negativas, aumentando o risco de desenvolvimento de doenças cardiovasculares, musculoesqueléticas e acidentes de trânsito.

O presente estudo visa, por meio de um levantamento bibliográfico, entender a relação entre a exposição prolongada ao ruído emitido por caminhões que operam em última milha com a ocorrência de perdas auditivas e sequelas de transtornos psicossociais, como o estresse, ansiedade e fadiga crônica. Busca ainda compreender os potenciais benefícios à saúde dos motoristas por meio da eletrificação da frota entendida como solução promissora aprimorar a qualidade de vida desses funcionários e a possibilidade de diminuição de acidentes de trânsitos oriundos do estresse a que são expostos diariamente.

A partir desta introdução o artigo está estruturado da seguinte forma. A seção 2 apresenta o procedimento metodológico necessário para realizar o estudo com uma análise bibliográfica dos estudos incluídos no repositório da pesquisa. A seção 3 descreve e discute os principais resultados e suas implicações, refletindo sobre a necessidade de considerar os malefícios da poluição sonora no organismo humano, principalmente no organismo do motorista e apresenta como possível forma de mitigação a utilização de caminhões elétricos. Por fim, a seção 4 apresenta as conclusões do presente estudo.

2. METODOLOGIA

O objetivo deste artigo é realizar uma revisão da literatura com base em bancos de dados de alto impacto e cientificamente reconhecidos, como *Scopus* e *Web of Science*, os resultados foram avaliados pelos princípios do método PRISMA (Tugwell e Tovey, 2021). Com o objetivo de identificar os possíveis impactos na saúde do motorista oriundos da intensidade de exposição ao ruído e poluição sonora gerada pelo veículo a combustão interna. A primeira etapa da seleção de dados foi definir as palavras-chave mais relevantes para realizar uma seleção eficiente da pesquisa, bem como os critérios de inclusão e qualificação, conforme mostrado na Tabela 1 e exemplificado no fluxograma Prisma na figura 1.

Tabela 1: Critérios da bibliografia.

Critérios	Descrição
Database	*Scopus* e *Web of Science* (WOS)
Tópicos	*Scopus/ Web of Science* – TS = (Low Emission Zone OR Zero Emission Zone AND Noise Polution) OR TS = (Low Emission Zone OR Zero Emission Zone AND Traffic Polution) OR TS = (Eletrick Truck AND Disease AND Noise Polution) OR TS = (Eletrick Truck AND Disease AND Traffic Polution) OR TS = (Transport AND Disease AND Traffic Polution)OR TS = (Transport AND Disease AND Traffic Polution)OR TS = (Eletrick Truck AND Diesel Truck AND Traffic Polution)OR TS = (Eletrick Truck AND Diesel Truck AND Traffic Polution).
Parâmetros	(I) Período de cobertura: todos os anos do banco de dados (2018-2025), período analisado quando houve o início da venda do caminhão elétrico no Brasil; (II) Relevância da fonte.
Data da pesquisa	06 de Junho de 2025, 10:40 a.m.

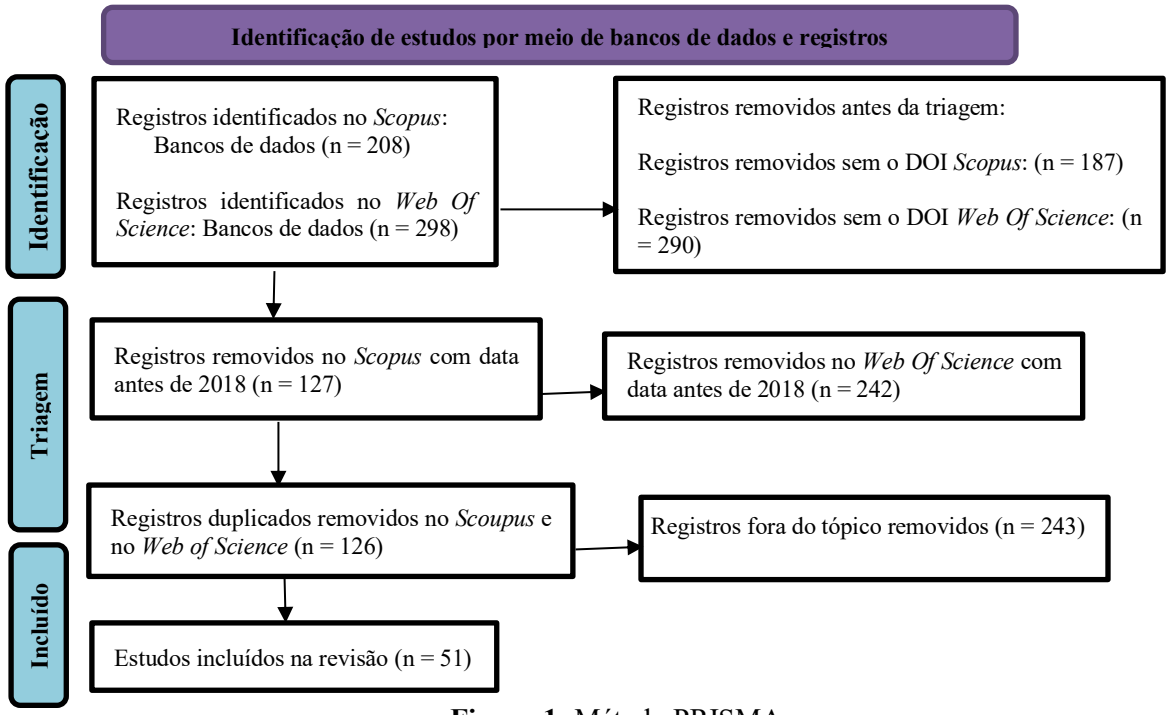


Figura 1: Método PRISMA.

3. RESULTADOS E DISCUSÃO

Os sons indesejáveis causados pela operação dos transportes afetam a qualidade de vida das pessoas que residem em locais com intenso fluxo de veículos e que estejam expostos ao barulho emitido quando (D´Agosto,

2015). Define-se poluição sonora como quaisquer alterações das propriedades físicas do meio ambiente, proporcionada por harmonia dos sons, de forma desejável ou não, que poderá estar, direta ou indiretamente, causando danos à saúde, à segurança e ao bem-estar da população ou operador (D´Agosto, 2015).

Nos veículos rodoviários, são considerando como fonte de ruído: o funcionamento dos motores, a descarga dos gases queimados, o funcionamento do sistema de transmissão, a vibração das peças e acionamento de componentes, atrito entre componentes mecânicos e da roda com o pavimento (D´Agosto, 2015).

Os ruídos ocasionados pelos modos de transporte, quando comparados a um ambiente calmo, que varia entre 30 e 50 decibéis (dB) ou a um vento suave de 10 a 30 dB, podem chegar até 5 vezes maiores (D´Agosto, 2015), conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2: Níveis dos ruídos por modos de transporte

Fonte	Intensidade (dB)	Sensação	Impacto na saúde
Avião a jato	130 – 140	Acima do limite da dor	Surdez permanente
Buzina	110 – 130	Desconforto alto	Surdez Instantânea
Caminhão pesado	90 – 110	Extrema excitação	Dependência
Tráfego	70 – 90	Bastante excitante	Início da dependência
Tráfego leve	50 – 70	Aceitável	Início do desconforto

Fonte: Adaptado de D´Agosto, 2015.

Diversas doenças crônicas têm sido consistentemente associadas à exposição prolongada ao ruído do transporte rodoviário, conforme estudo de Sørensen *et al*. (2023), a doença cardíaca isquêmica é o desfecho mais possivelmente correlacionado, apresentando um risco aumentado ao nível de ruído (RR de até 1,08 por 10 dB adicionais). Além disso, há evidências robustas que ligam o ruído à insuficiência cardíaca, acidente vascular cerebral (AVC), arritmias e hipertensão, pois o ruído também está associado a doenças metabólicas, como o diabetes tipo 2 e a desfechos neuropsiquiátricos, incluindo demência e sensação de zumbido. Estudos mais recentes sugerem associações com câncer de mama e mortalidade por todas as causas, pois os mecanismos fisiopatológicos compartilhados entre essas condições incluem inflamação de baixo grau, estresse oxidativo crônico e disfunção endotelial, todos exacerbados por distúrbios do sono e desregulação do ritmo circadiano. A resposta imunológica alterada e a ativação persistente de vias pró-inflamatórias contribuem para o agravamento dessas doenças, sendo assim, o ruído ambiental, especialmente o do tráfego rodoviário, manifesta-se como um fator de risco ambiental relevante e complexo, cuja carga em saúde pública ainda é subestimada (Sørensen *et al,* 2023).

A exposição ao ruído proveniente do transporte rodoviário desencadeia, no corpo humano, uma série de respostas fisiológicas relacionadas ao estresse, particularmente via ativação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal (HPA) e do sistema nervoso simpático (SNS). Esses sistemas promovem a liberação de hormônios, como cortisol e catecolaminas, que atuam sobre a pressão arterial, frequência cardíaca e reatividade vascular. Como resultado, ocorre ativação do sistema renina-angiotensina-aldosterona (SRAA), intensificando os efeitos pró-inflamatórios e pró-oxidativos. A persistência dessas ativações promove inflamação sistêmica e estresse oxidativo, prejudicando a função endotelial e induzindo disfunções vasculares. Além disso, a exposição crônica ao ruído interfere no sono e nos ritmos circadianos, agravando, ainda mais os processos inflamatórios (Sørensen *et al,* 2023).

A perturbação do sono leva à fragmentação do repouso e à redução da recuperação fisiológica, criando um estado de alerta constante no organismo. Estudos experimentais em humanos e animais confirmam o aumento da atividade na amígdala cerebral e a inflamação arterial associadas ao ruído, sugerindo uma via cérebro-coração que contribui para eventos cardiovasculares adversos. Esses mecanismos, quando mantidos ao longo do tempo, configuram uma resposta de estresse crônico que favorece o desenvolvimento de doenças. Assim, o ruído do tráfego rodoviário não é apenas um incômodo auditivo, mas um agente estressor, capaz de provocar desregulações moleculares e fisiológicas significativas (Sørensen *et al,* 2023).

Somado aos fatores fisiológicos ocasionados pela exposição contínua do motorista aos ruídos ocasionados pela função, fatores psicossociais também deverão ser levados em conta, pois tendo em vista a possibilidade de agravamento da perturbação do sono e exposição a outros fatores de disfunção orgânica, deverá ser analisado

a exposição ao esgotamento físico e mental. A Norma Reguladora nº 1, preconiza que as condições de labuta associadas as condições de trabalho insalubres que podem afetar a saúde mental dos trabalhadores, como sobrecarga, falta de apoio, burnout, diversos tipos de assédio e violência (MTE, 2025).

O estudo de Baclet *et al*. (2022) considerou a importância de uma análise de sensibilidade na aferição dos ruídos, porém abordou apenas o receptor externo ao veículo, considerando a cidade de Munique na Alemanha, na qual os autores estabeleceram a importância de analisar o pico de tráfego na região, o horário de entregas, a rota utilizada para as entregas e o plano diretor da cidade. Entretanto, o estudo realizou a comparação entre um caminhão movido a diesel e um caminhão com motor híbrido no modo elétrico, o qual apresentou uma redução na sensibilidade maior em áreas urbanas, quando comparadas a áreas com menor densidade populacional, com isto, sugerindo roteirização em áreas mais densas, utilizando veículos híbridos no modo elétrico ou totalmente elétrico, além de considerar o horário de deslocamento (Baclet *et al*., 2022).

A eletrificação da frota de caminhões utilizados para última milha está se tornando necessária, pois mesmo com o alto investimento inicial, insegurança quanto a autonomia da bateria, tem apresentado uma melhor condição socioambiental (Anderson e Richard, 2025). A transição energética proporciona um benefício ambiental, quando analisado a operação do veículo, desconsiderando a geração da matriz energética do país, proporcionando nula a emissão de poluentes atmosféricos e Gases de Efeito Estufa somada a diminuição, quase nula, da poluição sonora (Anderson e Richard, 2025).

A substituição de caminhões a diesel por modelos elétricos oferece impactos positivos diretos à saúde dos motoristas, impreterivelmente em relação à exposição ao ruído diariamente, pois o ambiente acústico interno desses veículos é, significativamente, mais silencioso, reduzindo a exposição contínua ao ruído acima de 85 dB (limiar reconhecido como potencialmente nocivo à audição). A diminuição do ruído contribui para prevenir perdas auditivas pela exposição prolongada e, também, sendo o agente redutor do estresse fisiológico, melhorando a saúde auditiva e psicossocial dos motoristas (Batson, Newnam e Koppel, 2022).

Além dos benefícios auditivos, os caminhões elétricos mitigam as vibrações e proporcionam uma menor emissão dos poluentes atmosféricos, o que reduz a carga tóxica inalável pelos motoristas e melhora as condições cognitivas durante a jornada. O ruído excessivo, combinado a longas jornadas e más condições de trabalho, são um fator agravante de fadiga auditiva, estresse psicológico e déficits de atenção. Elementos que elevam o risco de acidentes e doenças ocupacionais, sendo assim, a redução sonora nos caminhões elétricos aparece como um avanço essencial na engenharia de transporte voltada à promoção de ambientes laborais mais saudáveis e sustentáveis para motoristas (Amoadu, Sarfo e Ansah, 2024).

4. CONCLUSÃO

A eletrificação da frota de caminhões voltados à utilização na última milha apresenta-se como uma alternativa promissora para mitigar os impactos negativos da exposição contínua ao ruído nos motoristas. A redução significativa da poluição sonora nos caminhões elétricos contribui para preservar a saúde auditiva dos condutores, mitigando os riscos de perda auditiva induzida por ruído, além de mitigar sintomas de estresse, fadiga e distúrbios do sono. Tais benefícios ganham especial relevância no contexto de longas jornadas de trabalho e ambientes urbanos densos, onde a sobreposição de fatores psicossociais e fisiológicos agrava os riscos à saúde.

Os ganhos individuais proporcionados pelos caminhões elétricos promovem benefícios coletivos ao reduzirem emissões atmosféricas e contribuírem para a melhoria da qualidade ambiental nas zonas urbanas. Ao alinharem-se às estratégias de implementação de Zonas de Baixa Emissão (ZBE), esses veículos apoiam o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à sustentabilidade e ao bem-estar populacional. Portanto, a transição energética no setor de transportes deve ser compreendida não apenas como uma resposta ambiental, mas também como uma intervenção relevante de saúde ocupacional, com impacto direto na qualidade de vida e segurança dos motoristas profissionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amoadu, M.; Sarfo, J. O.; Ansah, E. W. Working conditions of commercial drivers: a scoping review of psychosocial work factors, health outcomes, and interventions. **BMC Public Health**, v. 24, n. 1, p. 2944, 2024. DOI:

https://doi.org/10.1186/s12889-024-20465-1.

Anderson, A.M.; Kish, Richard J. The Costs and Benefits of Electric Trucks: A Synopsis of the US Trucking Market. **Sustainability**, v. 17, n. 5, p. 2097, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17052097

Baclet, S.; S. Venkataraman; R. Rumpler; R. Billsjo; J. Horvath, P. E. Osterlund. From strategic noise maps to receiver-centric noise exposure sensitivity mapping. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 102, p. 103114, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103114

Batson, A.; S. Newnam.; S. Koppel. Health, safety, and wellbeing interventions in the workplace, and how they may assist ageing heavy vehicle drivers: A meta review. **Safety science**, v. 150, p. 105676, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105676.

Carvalho Neto, D. D; Silva, C. M. Mudanças Climáticas na Cidade do Rio de Janeiro: Impactos Locais e Percepção Ambiental da População. **Pesquisa em Educação Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 1-21, 2024. DOI: https://doi.org/10.18675/2177-580X.2024-18654.

D´Agosto, M. d'. Transporte, uso de energia e impactos ambientais. **Rio de Janeiro: Elsevier**, 2015

Kang, C.; Ota, M.; Ushijima, K. Benefits of diesel emission regulations: Evidence from the World's largest low emission zone. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 125, p. 102944, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.102944

MTE, Ministério do Trabalho e Emprego (2025) Norma Regulamentadora nº 01 – Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Disponível em: http://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/NR01atualizada2024I.pdf. Acesso em: 21 Mai 2025

Sørensen, M.; G. Pershagen; J. D. Thacher; T. Lanki; B. Wicki; M. Roosli; D. Vienneau; M. L. Cantuaria; J. H. Schmidt; G. M. Aasvang; S. Al-Kindi; M. T. Osborne; P. Wenzel; J. Sastre; I. Fleming; R. Schulz; O. Hahard; M. Kuntic; J. Zielinka; H. Sies; T. Grune; K. Frenis; T. Munzel; A. Daiber. Health position paper and redox perspectives-Disease burden by transportation noise. **Redox Biology**, v. 69, p. 102995, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.redox.2023.102995.

Tsoi, K. H., Loo, B. P., Li, X., & Zhang, K. (2023). The co-benefits of electric mobility in reducing traffic noise and chemical air pollution: Insights from a transit-oriented city. *Environment International*, *178*, 108116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108116

Tugwell, P.; D. Tovey. PRISMA 2020. **Journal of Clinical Epidemiology**, v. 134, p. A5-A6, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.04.008.

Dalton Domingues de Carvalho Neto (dalton.domingues@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Leonardo Mangia Rodrigues (leonardo.mangia@uerj.br)
Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, Programa de Engenharia de Produção, Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Juliana Gomes Martins (juliana.gomes@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Gabriela Maciel Wagner (gabriela.wagner@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Lorena Mirela Ricci (lorena.ricci@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Lino Guimarães Marujo (lino.marujo@coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
Márcio de Almeida D´Agosto (dagosto@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

IMPORTÂNCIA DA RENOVAÇÃO DA FROTA: TEMPO DE USO DO MOTOR

Raphael Jose Elino da Silveira[1] , Rodrigo Rodrigues de Freitas [1] , Joyce Azevedo Caetano[2] , Luís Eduardo Santos Fortes[1,2] , Daduí Cordeiro Guerrieri[1]

[1]Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RJ, [2]Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE/PET

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa por veículos estão diretamente relacionadas à queima de combustíveis fósseis e ao tempo de uso dos motores, que se deterioram com o tempo, reduzindo a eficiência e aumentando o consumo. Embora tecnologias e combustíveis alternativos, como o biodiesel, possam reduzir as emissões, desafios técnicos e estruturais limitam sua plena adoção. A degradação dos motores e sistemas de controle de emissões, mesmo com manutenção, é inevitável, especialmente em veículos mais antigos ou mal conservados. Modelos matemáticos como o de Zachariadis (2001) demonstram que a idade média da frota é um fator decisivo: frotas mais novas promovem reduções mais rápidas nas emissões. Estratégias como renovação de frota, incentivos à adoção de tecnologias limpas e políticas de descarte são fundamentais. A quantificação das emissões ao longo da vida útil dos veículos é essencial para definir políticas públicas eficazes na mitigação dos impactos ambientais do transporte rodoviário.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Existe uma forte relação das emissões de gases do efeito estufa por veículos relacionadas ao acionamento do motor por combustão interna. De forma simplificada, é possível relacionar a queima do diesel com o volume de gases emitidos. A autonomia dos veículos de transporte é um fator diretamente ligado ao nível de emissões, pois o tempo de uso do veículo irá resultar numa quantidade de emissões de gases do efeito estufa e de partículas no mínimo proporcional ao consumo de um motor por km rodado. Isso faz com que a melhora da autonomia e economia sejam um fator chave para legisladores, fabricantes de veículos e consumidores. Além do consumo, outros fatores que estão diretamente e indiretamente ligados ao tempo de uso irão influenciar no aumento das emissões (PATANKAR *et al.*, 2021). O uso em serviço de um veículo, desde sua fabricação até sucateamento, resulta na redução natural de sua vida útil, como desgaste do motor e de outros equipamentos relacionados, folgas devido à montagem e desmontagem para a manutenção, perda de eficiência do catalisador, prolongamento excessivo da vida útil do veículo.

Essa relação entre tempo de uso e aumento das emissões destaca a importância de estratégias eficazes e do desenvolvimento de tecnologias que minimizem o impacto ambiental ao longo da vida útil do veículo. As montadoras devem a atender a padrões de tecnologia menos poluentes, entretanto, estratégias de incentivos também podem impulsionar as vendas destes veículos. Além disso, as informações sobre o consumo de combustível e redução de emissões devem chegar ao consumidor, para a tomada de decisões mais conscientes sobre a compra e o uso de seus veículos.

2. CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES

Embora haja movimentos em direção às energias renováveis, o uso de gasolina e diesel permanece elevado, de modo que eliminar o uso de combustíveis fósseis é um desafio. Sendo assim, a modificação dos motores, combustíveis e gases liberados pode melhorar o impacto ambiental das tecnologias e cumprir os regulamentos de emissões para o controle de poluentes, enquanto as energias verdes são desenvolvidas simultaneamente (FAYYAZBAKHSH 2022).

No Brasil, o uso de combustíveis alternativos, como o biodiesel misturado ao diesel e o etanol puro e misturado à gasolina, apresentam boa redução de emissões. Entretanto, o uso de tais combustíveis ainda é dificultado por alguns desafios. O biodiesel, por exemplo, é mais corrosivo que o diesel, o que faz com que não possa ser implementado no Brasil em total substituição ao diesel. Caso fosse, os veículos mais antigos não iriam se adaptar ao combustível. A estratégia utilizada é diluir o biodiesel no diesel a cada ano em maiores quantidades de forma que as frotas possam ser renovadas aos poucos. Por isso, essa renovação deve ser incentivada (FAYYAZBAKHSH 2022).

As tecnologias veiculares são grandes fatores para o consumo e economia de combustível, pois a variação das tecnologias aplicadas em motores também influencia nas emissões. Os avanços nas tecnologias automotivas apresentam saltos de tempos em tempos, que resultam em uma redução no consumo de combustível e consequentemente das emissões de gases do efeito estufa.

O número de veículos a diesel aumentou, a estrutura do tipo de veículo foi otimizada, a proporção de veículos com elevados padrões de emissões aumentou e as emissões absolutas de poluentes diminuíram. Entre estes, as

emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), partículas finas (PM2,5), compostos orgânicos voláteis (COV) e as emissões de dióxido de carbono (CO2) de diferentes modelos veiculares foram reduzidos (AI *et al.*, 2022).

Os veículos modernos a gasolina e diesel estão equipados com sistemas de controle de emissões altamente eficazes que resultam em baixas emissões de poluentes como óxidos de nitrogênio (NOx) quando novos. Além disso, com a adoção de tecnologias de pós-tratamento cada vez mais complexas e sofisticadas, é importante garantir o seu desempenho eficaz ao longo da vida útil do veículo (DAVISON 2022).

Os efeitos das condições de condução e do comportamento do motorista têm grande influência na condução econômica de combustível dos veículos. A operação do motor a frio é conhecida por reduzir a economia de combustível. Indiretamente, o uso do ar-condicionado em temperaturas altas também pode reduzir a economia de combustível (CHEN 2016).

2.1. Degradação do Motor

O uso contínuo gera mudanças na estrutura dos motores. Existem muitos fatores que afetam as emissões dos veículos, tais como tipo de veículo, idade, quilometragem, padrões de emissão e inspeção e manutenção (I/M). As emissões mais elevadas dos veículos resultam de operação pesada, alta quilometragem e falta de manutenção adequada, resultando na deterioração do motor e do catalisador (LAU et al., 2012).
Em curto prazo, muitas medidas podem ser tomadas a fim de mitigar ou até mesmo evitar de forma preventiva esses problemas. Entretanto, em longo prazo, mesmo realizando corretamente a manutenção, pode-se considerar um efeito de degradação desses equipamentos. Problemas como folgas, empeno, riscos, falta de lubrificação, falta de sincronia entre os equipamentos, número de montagens e desmontagens, decaimento do catalisador irão impactar diretamente na degradação dos motores e por consequência, em seu consumo (CHIANGET et al., 2008; LAU et al., 2011, 2012).
Embora o esforço de atuação esteja voltado para a redução das emissões com tecnologia de controle de emissões aprimorada, de acordo com a fase PROCONVE, é imperativo quantificar a mudança nas emissões dos veículos ao longo de toda a sua vida útil, que no Brasil chega a exceder 40 anos, a Tabela 1 demonstra os fatores que influenciam no aumento das emissões. Sabe-se que, em uma média de 5 anos de uso, o catalisador tem uma queda na sua performance, inserindo um acréscimo as emissões já comuns ao veículo. Além disso, à medida que um veículo é conduzido, podem ocorrer alterações no comportamento das emissões devido ao desgaste dos motores, a deterioração dos sistemas de controle de emissões e as tecnologias de pós-tratamento, como catalisadores e filtros de partículas (DAVISON, 2022). Portanto, veículos de alta idade ou alta quilometragem apresentam deterioração significativa da eficiência catalítica, que está associada a emissões mais altas (BEYDOUN e GULDMANN, 2006; CHIANGET et al., 2008).

Tabela 1: Fatores que influenciam no aumento das emissões.

Categoria	Descrição do Problema	Impacto nas Emissões
Problemas Internos	Desgaste de componentes como bomba injetora, turbocompressor, vedadores, cabeçote e pistão, causado por uso intenso e condições adversas.	Aumento no consumo de diesel e nas emissões de CO_2, mesmo para percursos iguais.
Manutenção Inadequada	Postergamento de manutenções preventivas, priorizando correções apenas após falhas.	Maior emissão durante todo o período de funcionamento defeituoso do veículo.
Falhas na Bomba de Combustível	Danos por resíduos ou falhas de controle alteram o volume de combustível enviado ao motor.	Resultam em consumo excessivo de diesel e ineficiência do sistema.
Falta de Sincronia	Descompasso entre componentes mecânicos e elétricos, como ignição fora de tempo ou falha na bomba.	Provocam queima ineficiente, perda de potência e aumento das emissões.

As leis ambientais estão ficando cada vez mais rígidas para reduzir a poluição dos carros, o que levou ao desenvolvimento de tecnologias mais limpas como catalisadores de três vias e filtros de partículas. Essas inovações conseguiram diminuir as emissões de poluentes como óxidos de nitrogênio e material particulado.
O grande problema é que os catalisadores não duram para sempre. Com o tempo e o uso do veículo, eles vão perdendo eficiência - um processo chamado de desativação. Isso acontece principalmente quando o carro se aproxima dos 150.000 quilômetros rodados. Os fabricantes oferecem garantia de 5 anos ou 80.000 km, mas a

partir da fase P8 do PROCONVE (programa brasileiro de controle de emissões), os catalisadores precisarão durar 160.000 km.
Vários fatores influenciam as emissões dos veículos: tipo e idade do carro, quilometragem, forma de dirigir e manutenção. As mudanças tecnológicas também impactam - estudos mostram que houve saltos nas emissões de monóxido de carbono em anos específicos (2000, 2002, 2006, 2008 e 2012), coincidindo com as diferentes fases do PROCONVE.
A deterioração é inevitável: pesquisas indicam que carros entre 3 e 5 anos já começam a emitir mais poluentes, e após 6 anos, a maioria apresenta algum grau de deterioração. Em geral, quanto mais quilômetros rodados, maiores são as emissões

3. METODOLOGIA E RESULTADO - CÁLCULO DA VARIAÇÃO DAS EMISSÕES DEVIDO AO TEMPO DE USO DO VEÍCULO

Para cálculo da variação das emissões devido ao tempo de uso do veículo, foram analisados estudos que apresentaram resultados para o aumento das emissões com o aumento de quilometragem, tempo de vida da frota, incremento nos fatores de emissão, aumento da deterioração dos motores.

Em seu estudo, Al *et al.* (2022), apresentou um método de cálculo para emissões de veículos a diesel, calculados a partir das emissões de poluentes do ar por veículos a diesel calculados com base em dados de registro, extensão de estradas e método do fator de emissão.

$$E_1 = \sum_i P_i * EF_i * VKT_i * 10^{-6} \quad (1)$$

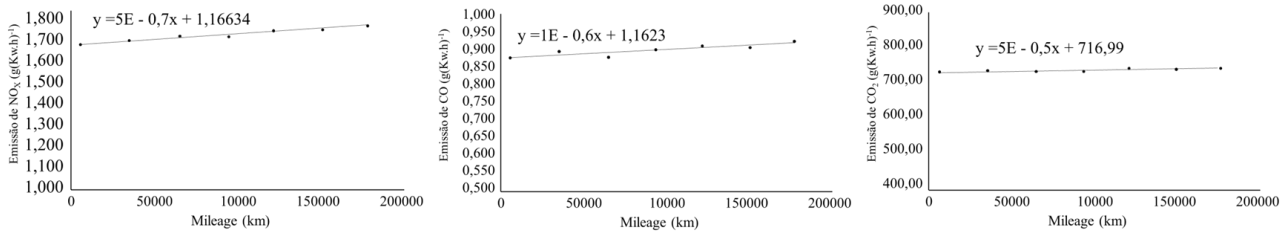
Onde:
E1: é a emissão anual de poluentes correspondente à fonte de emissão do veículo i, em toneladas;
EF_i: é o fator de emissão, que é a quantidade de poluentes emitidos por veículos a diesel do tipo i por quilômetro, em g/km;
P_i: é o número de veículos a diesel registrados; e
VKT_i: é a quilometragem média anual dos veículos a diesel do tipo i, em km/veículo (Ai 2022).

As emissões de veículos a diesel deteriorarão com a quilometragem do veículo, devido ao desgaste gradual do sistema de controle de emissões de escape e das peças do motor, além de manutenção inadequada ou mau funcionamento do motor. Em Hao (2022) na Figura 1, os resultados experimentais mostram que as emissões de CO, CO2 e NOx dos veículos a diesel aumentam com a quilometragem do veículo, mostrando a tendência de deterioração das emissões.

A massa específica de emissão de cada poluente i dentro da *j-ésima* janela pode ser calculada usando:

$$e_{wij} = \frac{m_{ij}}{W(t_{2j}) - W(t_{1j})} \quad (2)$$

Onde:
e_{wij}: é a emissão específica de massa do poluente *i* por unidade de trabalho do motor dentro da *j-ésima* janela, em $g(kW/h)^{-1}$;
m_{ij}: é emissão total de massa de poluente *i* na *j-ésima* janela; e
W(t1,j) e W(t2,j): são os trabalhos do motor produzidos do início para *t1,j* e *t2,j* respectivamente, em *kW/h*.



(a) CO emission (b) NOx emission (c) CO2 emission

Figura 1. Relação da quilometragem viajada e emissões de (a)CO, (b) NOX e (c) CO2. Fonte: Hao (2022).

Em outro estudo, Zachariadis (2001), considerou também modelos de renovação da frota, a sensibilidade à mudança de tecnologia e a taxa de sucateamento dos veículos antigos. O tempo de uso da frota de veículos é especialmente relevante em regiões em desenvolvimento do mundo, onde uma parte significativa da frota de veículos é composta por veículos usados, frequentemente mal mantidos, e importados de países desenvolvidos.

A função de vida útil de um tipo de veículo requer os parâmetros b (índice de falha para veículos) e t (tempo em anos) como variáveis de entrada. Zachariadis (2001) apresenta que a maneira mais confiável de estimar esses dois parâmetros seria derivar os valores, ajustando a função de vida útil aos dados de distribuição de idade de anos passados. No entanto, para muitos países, é difícil coletar tal informação. Dessa forma, o número de veículos recém-registrados a cada ano é um conjunto de dados útil, que pode ser utilizado para estudar a vida útil dos veículos.

A simulação das taxas de sobrevivência e descarte é realizada com o auxílio de uma função de Weibull modificada, de dois parâmetros, com a seguinte função de confiabilidade:

$$\phi_i(k) = exp - k + b_i T_i^{bi} \; and \; \phi_i(0) \equiv 1 \quad (3)$$

Onde:
$\phi i(k)$: é a probabilidade de presença de veículos do tipo i com idade k;
k: é a idade dos veículos, expressa em anos;
b: é a inclinação da taxa de falha para veículos do tipo i (bi > 1, ou seja, a taxa de falha aumenta com a idade); e
T: é a vida útil caracterizada para veículos do tipo i.

Após estabelecer uma distribuição inicial de idade, para cada ano consecutivo, o número total de veículos descartados no ano t é:

$$C_{si}(t) = \sum_{k=1}^{n} CC_i(t-1, k-1)\left(1 - \frac{\phi_i(k)}{\phi_i(k-1)}\right) \quad (4)$$

Onde:
C_{si} (t) é o número de veículos do tipo i que foram descartados durante o ano t;
$CC_i(t,k)$ é o número de veículos descartados com idade k no ano t; e
CC_i (t-1, k-1) é o número de veículos do tipo i e idade k−1 que existiam no ano anterior.

Ao combinar as relações acima com previsões do número total de veículos do tipo i por ano, é possível calcular o número de novos veículos entrando no mercado, seja para substituir os antigos ou devido a um aumento no total de veículos. Ao ter os primeiros registros ao longo de um período significativo (10 anos ou mais), é possível prever os primeiros registros com o cálculo de Csi (t) e selecionar os valores de b e t que melhor se ajustam aos dados reais; esses valores serão então usados para os anos futuros.

Zachariadis (2001), demonstrou em sua análise a sensibilidade do sistema a mudanças tecnológicas. Uma vez que o comportamento de emissões é principalmente impulsionado pela tecnologia, a distribuição de idade dos veículos é transformada em uma distribuição tecnológica, com o auxílio de matrizes apropriadas, que consideram a evolução da legislação nacional e internacional de emissões, definindo assim “tecnologias” como grupos de anos-modelo para os quais o mesmo padrão de emissão é aplicado.

A função de vida útil avalia o número de veículos que permanecerão no mercado no próximo ano, mas não fornece informações sobre o número de veículos recém-registrados no ano. Em mercados automotivos em expansão, a participação de veículos novos terá maior relevância nos resultados, devido a renovação mais recorrente, reduzindo assim a idade média da frota, em comparação com um mercado com a mesma função de vida útil e menor venda de veículos novos. Por outro lado, em mercados próximos à saturação, a venda de veículos novos representará, de forma aproximada, apenas substituições de carros descartados. Nesse caso, a idade média da frota será comparativamente mais alta.

Assumindo que tanto a quilometragem percorrida quanto os fatores de emissão permanecem constantes ao longo do tempo, com base no estudo de Clark et al. (2011), independentemente da idade do veículo, foi conduzida uma análise experimental simplificada que considera diferentes níveis de consumo de combustível conforme as gerações tecnológicas dos motores. Essa estimativa partiu da observação do decaimento do desempenho energético ao longo da vida útil do veículo, focando em veículos de transporte a diesel. Essa abordagem permite isolar o impacto da tecnologia, tornando a sensibilidade às emissões uma função direta da idade média da frota.

Foi realizada uma análise de dispersão relacionando a quilometragem acumulada ao consumo específico de diesel (Figura 2). A análise por regressão linear evidenciou uma tendência crescente no consumo com o aumento da quilometragem, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,995, indicando forte correlação. Esse resultado reforça a hipótese de degradação progressiva do motor ao longo do tempo, servindo como referência para estimar variações de consumo entre diferentes gerações tecnológicas de veículos e avaliar seus impactos

sobre as emissões totais da frota.

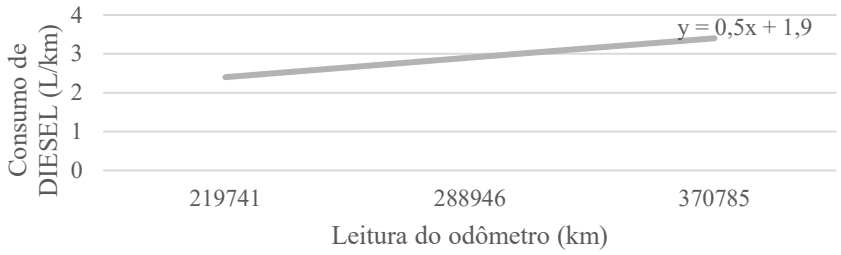


Figura 2. Relação da quilometragem acumulada com o consumo específico de diesel.

A taxa de mudança nas emissões é inversamente proporcional à idade média da frota: um valor pequeno para a idade média leva a mudanças rápidas na relação calculada das emissões com o modelo e grau tecnológico do veículo, já que uma frota com idade mais baixa apresentará veículos com tecnologias de motorização mais modernas. Portanto, as medidas técnicas terão um efeito maior em taxas de renovação elevadas; no entanto, a magnitude e rapidez exatas dessas mudanças são questões mais complexas que requerem uma análise quantitativa.

Esses estudos têm demonstrado as possibilidades do modelo na avaliação do efeito de medidas específicas, como padrões de emissões mais rigorosos, incentivos para descarte de veículos ou outras intervenções administrativas, em conjunto com características específicas da frota nacional, como a evolução das taxas de atividade e a dinâmica interna dos mercados nacionais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As emissões veiculares aumentam com o desgaste dos motores e o uso de combustíveis fósseis, apesar dos avanços em tecnologias e biodiesel. A renovação da frota e políticas eficazes são essenciais para reduzir impactos ambientais. Manutenção adequada e condução eficiente também ajudam a minimizar emissões ao longo da vida útil dos veículos.

Agradecimentos

Expressamos nossa gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) através do Programa de Apoio a Projetos Científicos e Tecnológicos em Mobilidade Urbana-2021 - 260003/011958/2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al, Y. et al. Study on the control targets and measures for total diesel consumption from mobile sources in Beijing, China. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, 25 nov. 2022. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1068861.

Beydoun, M., and J.-M. Guldmann. Vehicle characteristics and emissions: Logit and regression analyses of I/M data from Massachusetts, Maryland, and Illinois. *Transport. Res. D Transport Environ*. 11:59–76. 2006. doi:10.1016/j.trd.2005.09.003.

Chen, Y., Borken-Kleefeld, J. NOx Emissions from Diesel Passenger Cars Worsen with Age. *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 7, p. 3327–3332, 9 mar. 2016. 10.1021/acs.est.5b04704.

Chiang, H.L., Tsai, J.H., Yao, Y.C., HO, W.Y. Deterioration of gasoline vehicle emissions and effectiveness of tune-up for high-polluted vehicles. *Transport. Res. Transport Environ*. 13 (1), 47–53. 2008. 10.1016/j.trd.2007.07.004.

Clark, N.N., Kern, J. M., Atkinson, C. M., Nine, R, D. Factors Affecting Heavy-Duty Diesel Vehicle Emissions. *Journal of the Air & Waste*, 52:1, 84-94, DOI: 10.1080/10473289.2002.10470755

Davison, J. et al. Gasoline and diesel passenger car emissions deterioration using on-road emission measurements and measured mileage. *Atmospheric Environment: X*, v. 14, p. 100162, abr. 2022. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100162.

Fayyazbakhsh, A. et al. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 376, p. 134260, nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134260.

Lau, J., W. Hung, and C. Cheung. Observation of increases in emission from modern vehicles over time in Hong Kong using remote sensing. *Environ. Pollut*. 163:14–23. 2012. doi:10.1016/j.envpol.2011.12.021.

Patankar, N. A.; Lin, J.; Patankar, T. N. Mileage efficiency of cars. *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 4, 2021. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100240.

Zachariadis, T., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. The effect of age and technological change on motor vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(3), 2001. doi:10.1016/s1361-9209(00)00025-0.

MOBILIDADE URBANA E SUSTENTABILIDADE: ESTUDO COMPARATIVO DAS EMISSÕES DE CO_2 PARA ACESSO AO AEROPORTO DE JOINVILLE

Débora Angelica Tavares Difon[1], Vitoria Alves Soares[1], Carmeane Effting[1], Carolina Stolf Silveira[1]
[1]Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

RESUMO
Este estudo tem como objetivo comparar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) geradas em deslocamentos urbanos entre o Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola e o Centro de Joinville/SC, utilizando dois modos de transporte: motorizado individual e transporte coletivo. A metodologia adotada seguiu abordagem quantitativa, com base em dados de distância percorrida, rendimento energético e fatores de emissão de CO_2 por tipo de combustível. Os resultados indicaram que, embora o transporte individual apresente menor emissão por viagem, o transporte coletivo demonstra maior eficiência ambiental, com menor emissão por passageiro (0,32 $kgCO_2eq$). No entanto, as limitações observadas na operação do transporte público, como baixa frequência e horários restritos, comprometem sua utilização. Assim, melhorias na estrutura e na oferta do transporte coletivo são essenciais para aumentar a utilização deste modo, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e promovendo uma mobilidade urbana mais sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A relação entre mobilidade urbana, qualidade de vida e sustentabilidade tem ganhado centralidade nos debates contemporâneos, sobretudo diante da crescente preocupação com as mudanças climáticas. O setor de transportes, por concentrar um elevado fluxo de veículos, responde por uma parcela representativa das emissões globais de Dióxido de Carbono (CO_2), o que demanda atenção em estudos e ações de planejamento urbano (Andrade; D'Agosto, 2019). Em resposta a esse cenário, observa-se um crescimento da consciência ambiental em todo o mundo, impulsionando governos a elaborarem políticas voltadas à redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Um exemplo é a Lei nº 15.042, de 12 de dezembro de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), com o objetivo de incentivar a redução de poluentes atmosféricos e promover ações de enfrentamento às mudanças climáticas (Brasil, 2024). Essas iniciativas dialogam com os princípios da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), estabelecida pela Lei nº 12.587/2012, que reconhece a mobilidade sustentável como eixo fundamental para a redução das emissões ao priorizar os modos de transporte ativos (não motorizados) em relação aos motorizados, e o transporte coletivo sobre o transporte individual, contribuindo para a redução das emissões de CO_2 (Brasil, 2012).

O setor de transporte gera em todo o mundo cerca de um quarto das emissões totais de CO_2 provenientes do consumo de combustível (Raux; Lee-Gosselin, 2010), bem como foi o único a registrar aumento nas emissões de GEE entre 1990 e 2019, com crescimento de 33,5%. De acordo com o Parlamento Europeu (2022), ainda merece destaque o fato de que veículos têm uma baixa taxa de ocupação (1,6 passageiro/carro), o que intensifica o impacto ambiental do transporte individual motorizado. No Brasil, segundo o MCTI (2016), o transporte rodoviário respondeu por 44,5% das emissões do setor de energia e 13% do total nacional, sendo mais da metade proveniente de veículos pesados, como caminhões e ônibus (Brasil, 2022). A Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET) fez uma pesquisa e registrou uma taxa média de 1,4 ocupante por carro (O Globo, 2011). Para Santa Catarina não há registros de pesquisas de ocupação, porém a proporção de veículos emplacados em Joinville é de 1,3 habitante/veículo (IBGE, 2022).

Alinhado a isso, os aeroportos são locais onde existe uma atratividade de pessoas e cargas, com consequente emissão de GEE devido aos veículos e equipamentos que chegam e partem do local. Segundo Avogadro *et al.* (2023), o acesso terrestre por modo motorizado usado pelos passageiros e empregados dos aeroportos são a segunda maior fonte de GEE emitidos nesse local, ficando atrás somente das emissões das aeronaves. A pesquisa identificou que cerca de 33% das emissões no Aeroporto de Gatwick, em Londres, são oriundas do deslocamento até o aeroporto, o que gera impactos que prejudicam à comunidade local.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo comparar as emissões de CO_2 geradas em um deslocamento urbano entre o Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola (JOI) e o Centro de Joinville, usando dois meios de transporte: carro de passeio e ônibus. Esta análise busca mostrar as emissões individuais, contribuindo para a conscientização sobre o impacto ambiental das escolhas de mobilidade cotidianas. Além disso, busca alcançar soluções potenciais para as reduções das emissões atuais nos dois cenários apresentados.

2. MÉTODO DE PESQUISA

O método adotado baseia-se em dados de distância percorrida e fatores de emissão de CO_2 conforme os dados divulgados pelo Instituto de Pesquisas Aplicadas (IPEA), Carvalho (2011), e Soares *et al.* (2009), e os valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP) divulgados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), além de informações de consumo médio dos veículos. Adotou-se uma abordagem quantitativa e exploratória, dividindo-se em três etapas principais: (i) levantamento bibliográfico e documental, (ii) coleta de dados relativos à distância e consumo energético, e (iii) cálculo das emissões de CO_2.

A fundamentação bibliográfica foi realizada com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre as emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes. Buscou-se, especialmente, identificar os principais parâmetros adotados em estudos correlatos, bem como os fatores de emissão utilizados nas estimativas. Adicionalmente, foram analisadas legislações e documentos oficiais pertinentes ao tema, como a Lei Federal nº 15.042/2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), e publicações do Ministério do Meio Ambiente, com o propósito de contextualizar as políticas públicas voltadas à mitigação de emissões no Brasil.

2.1. Coleta de dados relativos ao local da pesquisa, à distância e consumo energético

A pesquisa foi realizada na terceira cidade mais populosa da região Sul do Brasil, Joinville, situada ao norte do estado de Santa Catarina (SC). Este município possui cerca de 616 mil habitantes, com 1127 km² de área territorial e densidade demográfica de 546,41 hab/km², sendo a cidade mais populosa de SC e possuindo uma distância de aproximadamente 30 km de norte a sul (IBGE, 2022). O trajeto estudado tem início no Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola, nomeado como JOI pela *International Air Transport Association* (IATA) e como SBJV pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), e está localizado a nordeste do município. O aeroporto fica situado no bairro Aventureiro, sendo este o mais populoso da cidade com 42,9 mil habitantes (IBGE, 2022). O trajeto tem por destino a Praça da Bandeira, localizada ao lado da Estação Central de ônibus, onde estão boa parte dos serviços, comércio, rede hoteleira e algumas atrações turísticas da cidade (Joinville, 2024).

A distância entre o Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola e a Praça da Bandeira foi determinada considerando, para o automóvel, a rota urbana de menor percurso (11,8 km), a qual percorre: Av Santos Dumont; Rua Blumenau, Rua Maceió; Rua Marcos Welmuth; Av José Vieira, Av Dr. Albano Schulz, chegando a Praça da Bandeira. Já para o transporte coletivo, o itinerário informado pelo site Onibus.Info (12,6 km), necessita de baldeação, utilizando-se duas linhas de ônibus: 7,7 km pela Linha 0240 (Aeroporto via Emílio Landmann até a Estação Iririú) e 4,9 km pela Linha 0800 (Iririú/Centro). As medições foram realizadas por meio da plataforma *Google Maps* (Figura 1) e subsidiaram o cálculo das emissões de CO_2. O ônibus percorre o trajeto da Linha 0240 pelas vias: Av. Santos Dumont; Rua Tuiuti; Rua Antônio Jorge Cecyn; Rua Pica-pau, Rua Prado; Rua Emilio Landmann; Rua Tuiuti; Rua Guaíra; e Rua Iririú onde se localiza a Estação de ônibus Iririú. Na sequência, o trajeto da Linha 0800 parte da Estação Iririú, passando pelas vias: Rua Alpaídes Cardoso; Rua Marquês de Pombal; Rua Tangará; Rua Iririú; Rua Padre Antônio Vieira, Avenida Aluísio Pires Condeixa, Av Marcos Wehmuth, Av José Vieira, Av Dr. Albano Schulz e, finalmente, Rua Nove de Março, na Estação de ônibus Central.

O site Onibus.Info fornece informações em tempo real sobre rotas, paradas e horários das linhas operadas pelas duas concessionárias. Os horários da Linha 0240 funcionam apenas em dias úteis: 04h49 / 05h19 / 07h30 / 11h11 / 14h08 / 16h55 / 17h58 / 18h08 / 18h43 / 20h08. Já a Linha 0800 opera todos os dias, sendo que em dias úteis seu funcionamento ocorre das 04h13 às 23h15 com intervalos de 2 a 15min e um último movimento às 00h15. Já aos finais de semana a oferta é reduzida, no sábado os ônibus partem das 04h10 até as 00h15 com intervalos de 12 a 25min e o último movimento é às 01:15 e nos domingos partem das 04h30 até às 00h15 com intervalos de 15 a 25min. Já o aeroporto possui diferentes horários de voos ao longo do dia, tem sua primeira decolagem a partir das 06h25, com alguns horários ao longo do dia e o último pouso às 22h15, incompatíveis com os horários dos ônibus.

De acordo com Carvalho (2011) e Soares *et al*. (2009), por meio de uma publicação do Instituto de Pesquisas

Aplicadas (IPEA), foram obtidas as informações da Tabela 1 que detalham o consumo e a eficiência energética de veículos automotores leves e pesados. Os valores das emissões são referentes a queima do combustível durante a utilização do veículo e não contempla os dados das emissões da produção e distribuição desse veículo e nem a produção e distribuição do combustível.

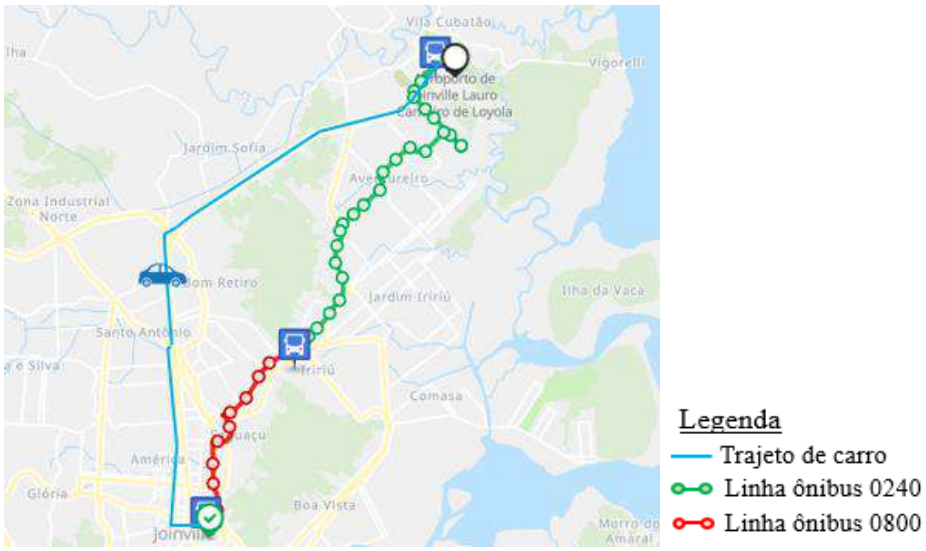


Figura 1: Trajeto do veículo de passeio e do ônibus
Fonte: Adaptado do *Google Maps e Moovit* (2025).

Tabela 1: Rendimento quilométrico e emissões de CO_2 por volume

Tipo de transporte	Capacidade de passageiros	Combustível	Emissões por fonte energética (kg CO_2eq /litro)	Emissões por km (kgCO_2eq/ km)	Rendimento energético (km/l)
Motorizado individual – Automóvel*	1,4	Gasolina	1,747	0,19	8,5
Motorizado individual - Automóvel	1,4	Etanol	1,178	0,056	7
Transporte Público - Ônibus	40	Diesel	2,566	1,28	2,5

*Os dados de emissões dos automóveis a gasolina contemplam a parcela de etanol.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise dos dados coletados, foram calculados os valores de CO_2eq para os cenários propostos.

De acordo com o IPEA, os fatores de emissão de CO_2 associados à queima de combustíveis fósseis são de 2,5668 kg CO_2/litro para o diesel, 1,1780 kg CO_2/litro para o etanol e 1,747 kg CO_2/litro para a gasolina. Para a estimativa do consumo de combustível ao longo de um determinado percurso, foi adotada a seguinte equação (1):

$$Consumo\ de\ combustível = \frac{distância\ percorrida\ (km)}{Consumo\ médio\ do\ veículo\ \left(\frac{km}{l}\right)} \quad (1)$$

Com base na equação (1), foram estimados os volumes de combustível por tipo de transporte. Utilizando esses volumes, juntamente com os fatores de emissão e a capacidade média de passageiros, calcularam-se as emissões de CO_2 por viagem e por tipo de transporte, conforme a equação (2), ambos os resultados estão demonstrados na Tabela 2.

$$Emissão\ de\ CO2 = litros\ de\ gasolina\ \times fatores\ de\ emissão\ de\ CO2 \quad (2)$$

Os resultados indicam que, embora o automóvel emita menos CO_2 por viagem, a maior capacidade do

transporte coletivo resulta em menor emissão por passageiro, o que o torna ambientalmente mais eficiente, em conformidade com a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU).

Tabela 2: Consumo de combustível estimado de cada transporte e as emissões de CO_2 por tipo de transporte.

Tipo de transporte	Volume consumido (litros)	Emissão de $kgCO_2eq$ por viagem	Emissão de $kgCO_2eq$ por passageiro	% de emissão de $kgCO_2eq$ a mais que o transporte coletivo / passageiro
Motorizado individual Automóvel - Gasolina	1,39	2,43	1,73	536%
Motorizado individual Automóvel - Etanol	1,69	1,99	1,42	440%
Transporte Público Ônibus - Diesel	5,04	12,93	0,32	-

Considerando a baixa taxa média de ocupação dos veículos, estimada em 1,6 passageiro/automóvel (Parlamento Europeu, 2022), e o registrado em SP de 1,4 ocupante por carro (O Globo, 2011), o impacto ambiental do transporte individual se intensifica, assim como a eficiência do meio de transporte e custos para a infraestrutura urbana e saúde pública. Entretanto, a opção pelo transporte coletivo está condicionada à fatores como custo, tempo e conforto, encontrando desafios expressivos como longos tempos de espera, baldeações, múltiplas paradas, baixa frequência, oferta desalinhada aos horários de chegada e partida dos voos, ausência de funcionamento aos fins de semana ou em horário de funcionamento do aeroporto, ônibus de piso alto com baixa acessibilidade e conforto, especialmente a passageiros com bagagens, com deficiência ou mobilidade reduzida que comprometem e até impedem seu uso. Dessa forma, observa-se que as atuais linhas de ônibus não atendem satisfatoriamente à demanda aeroportuária, evidenciando a necessidade de reestruturação do sistema para contemplar diferentes perfis de usuários.

4. CONCLUSÕES

No estudo comparativo entre as emissões de CO_2 em deslocamentos entre o Aeroporto Lauro Carneiro de Loyola e o Centro de Joinville, por carro de passeio e ônibus, conclui-se que apesar de o automóvel emitir menos CO_2 por viagem, o ônibus apresenta menor emissão por passageiro, evidenciando maior eficiência ambiental. No entanto, limitações operacionais do transporte coletivo reduzem sua atratividade ou mesmo o tornam um modo de transporte inviável até o Aeroporto da cidade. A análise considerou apenas as emissões diretas de combustível, recomendando-se, em estudos futuros, a inclusão de emissões indiretas do ciclo de vida dos veículos e combustíveis. Também se sugere avaliar o impacto da eletrificação da frota e o uso de biocombustíveis.

Como forma de mitigação dos problemas identificados, propõe-se o estudo de nova linha de ônibus, voltada ao atendimento ao JOI, com horários compatíveis às chegadas e partidas dos voos e itinerário mais direto, com paradas apenas em estações de ônibus e rodoviária. Além disso, é importante considerar as características dos veículos, os quais poderiam ser híbridos ou elétricos, com piso baixo, garantindo acessibilidade aos embarques e desembarques, poltronas estofadas, ar-condicionado e espaços apropriados para bagagens, de forma a aumentar a atratividade do sistema e de fato reduzir a escolha pelo modo de transporte individual.

Agradecimentos

Agradecimentos à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de bolsas de Monitoria de Pós-graduação – PROMOP da UDESC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avogadro, Nicolò *et al*. Assessing airport ground access interventions: An integrated approach combining mode choice modeling and microscopic traffic simulation. *Transport Policy*, v. 148, p. 154-167, 2024.

Andrade, C. E. S.; D'Agosto, M. A. Avaliação dos sistemas metroviários nas emissões de CO_2: análise comparativa das emissões por automóveis, ônibus e metrôs. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, p. 919-927, 2019.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). *Dados digitais sobre transporte no Brasil podem auxiliar na elaboração do Inventário Nacional de gases de efeito estufa*. 2021. Atualizado 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2021/06/dados-digitais-sobre-transporte-no-brasil-podem-auxiliar-na-elaboracao-do-inventario-nacional-de-gases-de-efeito-estufa Acesso em: 04/05/2025.

BRASIL. *Decreto Lei n. 15.042*: Incentivar a redução de emissões poluentes: DOU, 2024. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em 16/04/2025.

BRASIL. *Política Nacional de Mobilidade Urbana* – Lei n.°12587. Brasília: 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: 16/04/2025.

Carvalho, C. H. R. *Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros.* Texto para Discussão No. 1606 do Instituto de Pesquisas Aplicadas - IPEA, 2011. Disponível em https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1578 Acesso em 15/05/2025.

Colovic, A., *et al.* Airport access mode choice: analysis of passengers' behavior in European countries. *Sustainability*, v. 14, n. 15, p. 9267, 2022. https://doi.org/10.3390/su14159267

Ferrulli, P. Green airport design evaluation (GrADE) – Methods and tools improving infrastructure planning. *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 3781-3790, 2016. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.463

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.Disponível em https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/joinville.html - Acesso em 14/05/2025.

JOINVILLE. **Joinville cidade em dados 2024**: Desenvolvimento Social. Disponível em: https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2024/07/Joinville-Cidade-em-Dados-2024-%E2%80%93-Desenvolvimento-Economico.pdf. Acesso em 26/05/2025.

ONU. *A Agenda 2030.* 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 16/04/2025

Parlamento Europeu. *Emissões de dióxido de carbono nos carros. 2022*. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20190313STO31218/emissoes-de-co2-dos-carros-factos-e-numeros-infografias. Acesso em 04/05/2025.

Raux, C.; Lee-Gosselin, M. E. H. Transport, energy and greenhouse gases: perspectives on demand limitation. Guest editorial. *Energy efficiency,* v. 3, p. 111-113, 2010. Disponível em https://doi.org/10.1007/s12053-009-9068-4

Soares, L., *et al*. *Mitigação da emissão de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana de açúcar produzido no Brasil*. Embrapa, abr. 2009 (Circular Técnica, n.º 27). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/630482/mitigacao-das-emissoes-de-gases-efeito-estufa-pelo-uso-de-etanol-da-cana-de-acucar-produzido-no-brasil Acesso em 15/05/2025.

Voitch; G. *São Paulo tem média de 1,4 ocupante por carro*. O Globo: Rio de Janeiro. 22/09/2011, atualizado em 25/10/2011. Disponível em: https://oglobo.globo.com/politica/sao-paulo-tem-media-de-14-ocupante-por-carro-2695421#:~:text=S%C3%83O%20PAULO%20%2D%20O%20motorista%20paulistano,sequer%20um%20passageiro%20no%20ve%C3%ADculo. Acesso em 29/05/2025.

Débora Angelica Tavares Difon (debora.difon@edu.udesc.br) e *Vitoria Alves Soares* (vitoria.soares2@edu.udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina UDESC, Centro Ciências Tecnológicas CCT, Departamento de Pós-Graduação de Engenharia Civil - PPGEC. Endereço: Rua Paulo Malschitzki, 200 – Zona Industrial Norte – Joinville/SC – Brasil.
Carmeane Effting (carmeane.effting@udesc.br) e *Carolina Stolf Silveira* (carolina.silveira@udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina UDESC, Centro Ciências Tecnológicas CCT, Departamento de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC. Endereço: Rua Paulo Malschitzki, 200 – Zona Industrial Norte – Joinville/SC – Brasil.

MUDANÇA CLIMÁTICA E DESAFIOS PARA MANUTENÇÃO DA NAVEGABILIDADE EM HIDROVIAS: UMA PROPOSTA DE GOVERNANÇA

Bruna Renata Cavalcante de Barros, Eliezé Bulhões de Carvalho
Secretaria Nacional de Hidrovias e Navegação – Ministério de Portos e Aeroportos

RESUMO
Em 2023, a seca severa interrompeu a navegação nos rios Solimões e Amazonas e, no ano seguinte, o problema se estendeu para o Tapajós e, além da Amazônia, para o Rio Paraguai. Por outro lado, no Rio Grande do Sul, entre abril e maio de 2024, chuvas intensas causaram enchentes catastróficas e o assoreamento das hidrovias da região. Este trabalho descreve os procedimentos realizados pelo Governo Federal para restabelecer a navegabilidade nos sistemas hidroviários após esses eventos extremos. Foi efetuada análise dos relatórios hidrológicos e meteorológicos, além de pesquisa documental nos acervos do DNIT e do MPOR. Observou-se que as intervenções ocorreram de forma bem-sucedida onde havia contratos de manutenção, mas houve dificuldades para contratação dos serviços emergenciais. Para aumentar a resiliência de hidrovias em face da mudança climática, propõe-se a sistematização do acompanhamento hidrológico como elemento central de um novo sistema de governança baseado em gestão adaptativa.

1. INTRODUÇÃO

A transição entre os eventos climáticos La Niña 2022-23 e El Niño 2023 levou a níveis historicamente baixos de lâmina d'água na Bacia Amazônica (Mamani *et al.*, 2025). A partir de 2023, foi necessário pela primeira vez dragar alguns trechos dos rios Amazonas, entre Manaus-Itacoatiara e Coari-Codajás, e Solimões, nos entre Benjamin Constant-São Paulo de Olivença e Benjamin Constant-Tabatinga. Em 2024, houve interrupção da navegação no Rio Tapajós. A região do Pantanal e a Amazônia enfrentou também situação de seca extrema com grandes incêndios em 2024 (Carvalho *et al.*, 2025). Como consequência, o Rio Paraguai permaneceu em níveis abaixo da normalidade, observados ao longo de todo o ano na estação de Ladário. Em setembro de 2024, a estação registrou o rio abaixo de zero, com situações mais graves em Porto Esperança em Corumbá. Pela primeira vez na história, surgiu a necessidade de dragagem para manutenção da operação hidroviária no Tramo Sul do Rio Paraguai (HN-950), localizado entre Corumbá/MS e a Foz do Rio Apa. No Rio Grande do Sul, as chuvas intensas de abril e maio de 2024 resultaram em um cenário de enchentes catastróficas, com infraestruturas comprometidas, milhares de pessoas desabrigadas e dezenas de mortos (Ferreira Neto *et al.*, 2025). As eclusas do sistema hidroviário do estado também foram afetadas, e houve necessidade de dragagem na Lagoa dos Patos, onde trechos ficaram intransponíveis para as embarcações.

O transporte hidroviário é vulnerável à influência climática no que se refere à profundidade dos rios. Níveis muito baixos forçam a redução da carga ou a interrupção das operações (Santos *et al.*, 2018). Isso leva as empresas de navegação a migrar para rotas mais caras em longas distâncias durante eventos disruptivos (Hosseini *et al.*, 2019). As operações de travessias também podem ser afetadas porque o tráfego seguro depende de níveis mínimos de água (Scheepers *et al.*, 2018). As tempestades são outro risco, pois o aumento excessivo do nível do mar pode danificar portos interiores em localidades com influência de marés (Forzieri *et al.*, 2018). As preocupações crescentes com a mudança climática atraíram os atores interessados para questões de desempenho das infraestruturas (van der Vlist *et al.*, 2015).

Entretanto, a dragagem recorrente não impede a erosão do leito dos rios, que impacta negativamente a navegação, a proteção contra inundações, a ecologia e a agricultura (Havinga, 2020). A modelagem preditiva pode ser uma solução para o controle de descargas em períodos de seca e cheias, que tendem a ser mais intensos devido à mudança climática (Nouasse *et al.*, 2016). Em eventos de escassez hídrica, estratégias baseadas em gestão adaptativa ajudam a decidir quando, onde, e quanta água precisa ser deslocada em sistemas de eclusas e barragens para melhorar as condições de navegação (Desquesnes *et al.*, 2017). Nos regimes adaptativos integrados, a governança pressupõe uma escala múltipla de análise e operação, para uma compreensão abrangente, preenchendo lacunas e facilitando a integração da informação e dos atores envolvidos (Pahl - Wostl, 2009).

Este trabalho tem por objetivo descrever os procedimentos realizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pelo Departamento de Gestão Hidroviária da recém-criada Secretaria Nacional de Hidrovias e Navegação do Ministério de Portos e Aeroportos (SNHN) para restabelecer a navegabilidade nos sistemas hidroviários do Rio Grande do Sul, da Bacia Amazônica e do Rio Paraguai após

os eventos climáticos extremos ocorridos em 2023 e 2024. Para isto, se organiza em quatro seções (Figura 1).

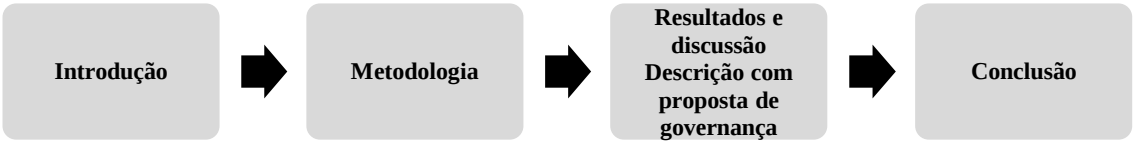


Figura 1: Esquematização deste trabalho. Fonte: elaboração própria.

Após a introdução com contextualização e revisão de literatura, explica-se a metodologia para depois evoluir aos resultados e à discussão, que inclui a proposição de uma nova governança de hidrovas especificamente para a questão climática, e por fim, a conclusão sintetiza os achados e indica caminhos para estudos futuros.

2. METODOLOGIA

Este trabalho descreve as ações efetuadas pelo DNIT e pela SNHN para restabelecer a navegabilidade durante os eventos climáticos extremos de seca, nos rios Solimões, Amazonas, e Tapajós, bem como no Tramo Sul do Rio Paraguai, e de cheia, no sistema do Rio Grande do Sul. Para isso, foram reunidos três conjuntos de dados. Primeiro, foi efetuado o acompanhamento das reuniões de sala de crise da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), realizadas periodicamente com a presença e divulgação de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Serviço Geológico Brasileiro (SGB/CPRM), Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Também foram analisados os documentos técnicos que justificaram as decretações de emergência por parte do DNIT e a solicitação de recursos extraordinários por parte da SNHN para fazer frente às necessidades emergenciais. Em seguida, propõe-se a sistematização do acompanhamento como elemento central de um novo sistema de governança para aumentar a resiliência de hidrovias em face de eventos climáticos extremos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em agosto de 2023 a Marinha do Brasil, a praticagem e os transportadores reuniram informações a respeito das restrições à navegabilidade devido à estiagem nos rios Solimões e Amazonas. Em outubro daquele ano, o DNIT decretou situação de emergência para contratar a dragagem em trechos onde, até então, nunca havia sido necessário intervir para navegar. O trecho entre Coari e Codajás, por exemplo, é fundamental para o abastecimento energético da região, uma vez que abriga uma unidade de processamento de gás natural no Pólo de Urucu, que abastece de GLP as usinas termelétricas. No Amazonas, a rede de transportes terrestres é escassa, e Manaus é a única capital sem ligação com o restante do país por meio de rodovias federais. A restrição à navegação em 2023 impactou o estado em diversos pontos, uma vez que todo tipo de bens e mercadorias, além do combustível, chega por via fluvial. Com o aprendizado, o DNIT instituiu contratos de cinco anos de duração em 2024 nos trechos Manaus-Itacoatiara, Coari-Codajás, Benjamin Constant-São Paulo de Olivença e Benjamin-Constant Tabatinga, a fim de garantir a navegabilidade e, consequentemente, o fluxo de pessoas, bens e o abastecimento (MPOR, 2024).

Em 6 de agosto de 2024 o DNIT declarou situação de emergência no Rio Paraguai, em razão das baixas profundidades observadas. Até então, o déficit acumulado em média na bacia foi de 395 mm. Em outras palavras, a chuva esperada era de 1.097 mm e a observada foi de 702 mm (SGB, 2024). Em quatro anos, a carga transportada pelo Tramo Sul do Rio Paraguai quase quadruplicou, passando de 3.153.734 toneladas em 2020 para 7.918.467 em 2023 (ANTAQ, 2024). O minério de ferro representa 83% de toda a carga transportada, e o transporte desse granel cresceu, em média, 68% ao ano nesse período. Essa tendência se reverteu em 2024: até a interrupção das operações, na segunda quinzena de setembro, os comboios de minério não estavam sendo carregados em sua capacidade total, em razão das restrições de profundidade, e no ano inteiro foram transportadas apenas 3.304.793 toneladas, menos da metade do ano anterior. É possível estimar, pela média de crescimento dos últimos anos, que o minério carregado pela hidrovia em 2024 atingiria 10 milhões de toneladas. Portanto, estima-se que cerca de 7,7 milhões de toneladas de minério seriam transportadas de caminhão.

Uma consequência é o aumento significativo na emissão de gases do efeito estufa, colaborando ainda mais com a mudança climática e desviando o Brasil do compromisso assumido na NDC em razão do Acordo de

Paris, contrariando também o Plano Clima, em fase de atualização. Além disso, o aumento inesperado de tráfego de veículos pesados acelera o afundamento, o escorregamento e o surgimento de trincas no pavimento, que não havia sido dimensionado para as novas condições (Bhandari *et al.*, 2023; Ordaz *et al.*, 2024). Apesar desses argumentos, não foi possível obter autorização ambiental para dragar o Tramo Sul do Rio Paraguai, uma vez que não há previsão legal para o licenciamento de emergências em hidrovias, e a licença ambiental de que o DNIT dispõe desde 1998 se refere apenas ao Tramo Norte, entre Corumbá e Cáceres, onde há histórico de necessidade de dragagens de manutenção.

A região do Rio Tapajós também tem enfrentado situação de seca extrema, e desde setembro de 2024 houve registros próximos aos níveis mínimos históricos na estação de monitoramento localizada em Santarém (PA). Foi registrada na estação de monitoramento de Santarém a cota -18 cm no Rio Tapajós, quarta pior marca histórica. O Tapajós não atingia níveis negativos desde 1998 (SGB, 2024a). A redução da cota de navegação rio afeta de forma direta as comunidades que dependem do Tapajós para sua sobrevivência. O transporte fluvial, fundamental para o acesso a áreas remotas e para o escoamento de produtos, está cada vez mais limitado. Conforme os relatórios do DNIT, na região em torno da comunidade de Boim, no Rio Tapajós, prestadores de serviços de transporte escolar relatam dificuldades extremas para conduzir aos alunos às escolas, e, ultimamente, têm recorrido a atravessarem crianças carregadas em seus ombros para que não percam aula. Nos últimos anos, o volume de cargas transportado pelo Rio Tapajós cresceu de 8,7 milhões de toneladas, em 2015, para 14,1 milhões de toneladas, em 2024. O DNIT obteve a autorização ambiental nº 5.776/2025 junto à Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará para dragagem dos passos Amorim, Itapaiunas e Monte Cristo. Entretanto, a Marinha do Brasil não autorizou a dragagem, alegando que o Ministério Público Federal judicializou a questão, requerendo a suspensão imediata de licenciamentos e requerendo a consulta livre prévia e informada às comunidades tradicionais (MPF, 2024).

Entre os meses de abril e maio de 2024, chuvas intensas, alagamentos, granizo, inundações, enxurradas e vendavais ocorreram no Estado do Rio Grande do Sul. Esses eventos climáticos foram considerados de grande intensidade, classificados como desastres de nível III, quando os danos causados são importantes e os prejuízos, vultosos. O Governo do Estado declarou 78 municípios em estado de calamidade pública e 340 em estado de emergência, perfazendo 418, dos 497 municípios gaúchos (Rio Grande do Sul, 2024 e 2024a). O sistema hidroviário do Rio Grande do Sul é formado por onze vias navegáveis, que somam 1.296 quilômetros de extensão. A Lagoa dos Patos comporta a navegação de embarcações comerciais com calado de até 5,1 m entre os Portos de Rio Grande, Pelotas e Porto Alegre e seus terminais privados, possibilitando o acesso marítimo até a capital. O sedimento trazido pelas inundações causou dificuldades para a navegação em três trechos: Furadinho, Feitoria e Pedras Brancas. Não foi possível contratar a dragagem emergencial desses passos porque as empresas executoras informaram que o orçamento base do DNIT seria inexequível.

Há quatro eclusas no Rio Grande do Sul: Anel de Dom Marco, Fandango e Amarópolis, no Rio Jacuí; e Bom Retiro do Sul, no Rio Taquari, construídas entre as décadas de 1950 e 1970 (Bulhões *et al.*, 2019). Todo esse sistema hidroviário é utilizado para o transporte de combustíveis, produtos petroquímicos e insumos para a agricultura e para a construção civil. Essas infraestruturas, incluída toda a sua área operacional, foram inteiramente submersas em água e lama devido às chuvas intensas de abril e maio de 2024 (Figura 2).



Figura 2: Barragem do Fandango (esq.) e eclusa de Bom Retiro do Sul (dir.), submersas em 2024. Fonte: DNIT.

Grande parte do material que estava nas margens dos rios e em todo o entorno seco das cidades invadidas pelos

leitos deles, composta por terra, pedras, mobiliário e até maquinário foi arrastada para o curso dos rios. A movimentação desse material e da água em velocidades e cotas fora do habitual gerou alterações nas condições de navegabilidade e efeitos que ainda precisam ser adequadamente mensurados por meio de levantamentos hidrográficos. As retroáreas das eclusas, que não devem permanecer submersas, necessitaram de reparos, uma vez que foram totalmente alagadas devido à elevação dos rios a cotas superiores às de projeto desses dispositivos. Além do alagamento de equipamentos que devem operar secos, a força da correnteza carreou sedimentos e diversos tipos de detritos, como uma embarcação e um automóvel, requerendo a reparação dos equipamentos aquáticos, o que foi efetuado por meio dos contratos de manutenção vigentes.

Dos casos analisados, observou-se que, na maior parte dos casos em que não havia contratos de manutenção ativos, não foi possível executar os serviços, com exceção dos trechos dos rios Amazonas e Solimões. Por outro lado, onde havia contratos de manutenção vigentes, estes foram suficientes para restabelecer a operação da hidrovia, como ocorreu nas eclusas no Rio Grande do Sul, apesar da catástrofe de proporções históricas. Com um prognóstico de aumento da intensidade e da frequência de eventos climáticos extremos, é necessário modificar a governança das infraestruturas hidroviárias, a fim de torná-las resilientes à mudança climática.

Depois da criação da SNHN, a partir de junho de 2024, o Departamento de Gestão Hidroviária/SNHN/MPOR tem realizado acompanhamento sistemático das reuniões periódicas promovidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), denominadas Salas de Crise. Esses encontros têm buscado a articulação entre agentes governamentais e da sociedade civil organizada que podem ser impactados por crises hídricas ou têm alguma atuação sobre elas. A partir do acompanhamento, a SNHN elabora relatórios mensais que produzem uma visão analítica do comportamento hidrológico das principais vias navegáveis sob responsabilidade do DNIT. A esse trabalho se soma o diálogo constante com os transportadores, a fim de gerar informação qualificada e responder aos desafios de forma eficaz. Nos contratos existentes, o monitoramento e o diálogo visam providenciar os serviços nos momentos adequados (Figura 3).

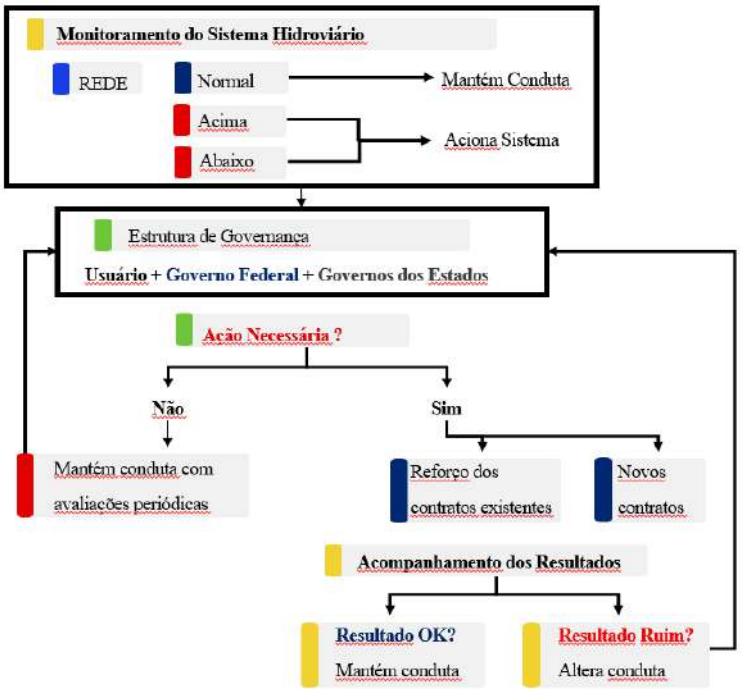


Figura 3: Proposta de modelo de governança de hidrovias frente à mudança climática. Fonte: elaboração própria

Além disso, é possível estimular a celebração de novos contratos de manutenção de médio prazo, a fim de aumentar a cobertura da malha hidroviária com serviços e obras de manutenção das infraestruturas. A intenção é, de forma adaptativa, incrementar os instrumentos de análise e interação, para melhorar as respostas.

4. CONCLUSÃO

Observou-se que o Governo Federal teve dificuldade para efetuar contratações emergenciais durante os eventos climáticos extremos de 2024 nos rios Paraguai, Tapajós e no sistema do Rio Grande do Sul, devido a questões

administrativas e de licenciamento ambiental. Por outro lado, o desempenho nos rios Amazonas e Solimões, assim como nas eclusas, foi mais satisfatória, pois tinha havido o aprendizado no Norte com o ano anterior e, no Sul, as infraestruturas contavam com serviços de manutenção. Portanto, com contratações e execução de serviços certeiras, é possível fazer frente aos desafios da mudança climática com a rapidez e eficiência que o desenvolvimento do país requer. Estudos futuros deverão analisar se o incremento no sistema de governança proposto gerará as respostas que a sociedade merece, em substituição às falhas ocorridas nos eventos recentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhandari, S., Luo, X. & Wang, F. (2024). Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. *International Journal of Transportation Science and Techonology* 12 :1, 258-272.

Brasil (2024) Medida Provisória nº 1.220, de 15 de maio de 2024.

Bulhões, E.C., Calaça, M.S.A., Miranda, S., Barros, B.R.C.B & Brasil Jr., A.C.P. (2019). Proposta de modelo de gestão adaptativa por meio de pontos de inflexão. *In* Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Balneário Camboriú, SC). Rio de Janeiro: ANPET.

Carvalho, R.B., Menor, I.M., Schmidt, I.B., Berlinck, C.N., Genes, L. & Dirzo, R. (2025) Brazil on fire: Igniting awareness of the 2024 wildfire crisis. *Journal of Environmental Management* 389, 126190.

Desquesnes, G.; Lozenguez, G.; Doniec, A. & Duviella, E. (2017) Distributed MDP for water resources planning and management in inland waterways. IFAC-PapersOnLine, 50(1), pp. 6576–6581.

Ferreira Neto, J.B., Freitas, M.S., Simões, P.S.M., Pereira, G., Leão, H.S., Calmon, A.V.V. & Gücker, B. (2025) Impact of April and May, 2024 extreme precipitation on flooding in Rio Grande do Sul, Brazil. *Urban Climate* 61, 102487.

Forzieri, G.; Bianchi, A.; Silva, F.B.; Herrera, M.A.M.; Leblois, A.; Lavalle, C.; Aerts, J.C.J.H. & Feyen, L. (2018) Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change* 48, 97–107.

Havinga, H. (2020) Towards Sustainable River Management of the Dutch Rhine River. *Water* 12:6, 1827.

Hosseini, S.; Ivanov, D. & Dolgui, A. (2019) Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Computers & Industrial Engineering* 93, 252-266.

Mamani, L., Andreloi, R.V., Souza, I.P., Cevalho, W., Sales, D., Kayano, M.T., Souza, R.A.F., Carpio, J.M., Ceron, W.L. & Macedo, T. (2025) Extreme droughts in the Amazon Basin during cyclic ENSO events coupled with Indian Ocean Dipole modes and Tropical North Atlantic warming. *Science of the Total Environment* 963, 178536.

MPF (2024). MPF recomenda suspensão imediata de licenciamento ambiental da Hidrovia Tapajós, no Pará. Disponível em: https://www.mpf.mp.br/pa/sala-de-imprensa/noticias-pa/mpf-recomenda-suspensao-imediata-de-licenciamento-ambiental-da-hidrovia-tapajos-no-para (acesso 04/07/2025).

MPOR (2024). Obras de dragagem nos rios Amazonas e Solimões avançam para garantir passagem segura. Ministério de Portos e Aeroportos. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2024/12/obras-de-dragagem-nos-rios-amazonas-e-solimoes-avancam-para-garantir-passagem-segura (acesso 04/07/2024).

Ordaz, M., Doyle, J. D., & Howard, I. L. (2024). Light Weight Deflectometer Evaluation of Low-Volume Road Structural Deterioration under Rapidly Increased Traffic Patterns. *Transportation Research Record*, *2678*(4), 948-966.

Pahl-Wostl, C., (2009) A conceptual framework for analyzing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global Environmental Change* 19, 354-365.

Rio Grande do Sul (2024) Decreto nº 57.596, de 1º de maio de 2024.

Rio Grande do Sul (2024a) Decreto nº 57.626, de 21 de maio de 2024.

Santos, A.B.; Sproesser, R.L. & Batalha, M.O. (2018) Exploring strategic characteristics of intermodal grain terminals: Empirical evidence from Brazil. *Journal of Transport Geography* 66, pp. 259–267.

Scheepers, H.; Wang, J.; Gan, T.Y. & Kuo, C.C. (2018) The impact of climate change on inland waterway transport: Effects of low water levels on the Mackenzie River. *Journal of Hydrology* 566, 285-298.

SGB (2024). 6ª Reunião da Sala de crise da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal). Disponível em https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/eventos-criticos/apresentacoes-das-reunioes/ (acesso em 03/07/2025).

SGB (2024a). 47° Boletim hidrológico da Bacia do Amazonas. Disponível: https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20241112_14-20241112%20-%20140849.pdf (acesso 03/07/2025)

Van Der Vlist, M.J.; Lighthart, S.H. & Zandvoort, M. (2015) The replacement of hydraulic structures in light of tipping points. Journal of Water and Climate Change 6 (4), 2015, pp. 683-694.

Walz, U.; Richter, B. & Grunewald, K. (2019) Indicators on the ecosystem service “regulation service of floodplains”. Ecological Indicators 102, 547-556.

Bruna Renata Cavalcante de Barros (buru.renata@gmail.com); *Eliezé Bulhões de Carvalho* (eliezec@gmail.com)
Ministério de Portos e Aeroportos, Secretaria Nacional de Hidrovias e Navegação, Esplanada dos Ministérios, Bloco R, Anexo, 1º Andar, Brasília, DF, Brasil.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E FRONTEIRA AGRÍCOLA EM TRANSIÇÃO: IMPLICAÇÕES SOBRE A LOGÍSTICA

Matheus Melo de Souza, **Andréa Leda Ramos de Oliveira**
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), Laboratório de Logística e Comercialização Agroindustrial (LOGICOM)

RESUMO
Este estudo tem como objetivo analisar se diferentes cenários de mudança climática provocam a reconfiguração espacial da produção de soja no Brasil e avaliar os impactos dessa redistribuição na logística de escoamento. A pesquisa utilizou o algoritmo de Máxima Entropia para modelar três cenários temporais e considerou variáveis bioclimáticas, físicas, de uso da terra e infraestrutura logística. Os resultados indicam que, embora a produção siga concentrada em áreas tradicionais como Mato Grosso, Goiás e Matopiba, há potencial de expansão em novas fronteiras, especialmente onde já existe infraestrutura consolidada. Em algumas regiões, a disponibilidade logística mostrou-se mais relevante para a viabilidade produtiva do que o próprio clima. A partir disso, foi elaborado um índice de vulnerabilidade logística municipal. Os achados reforçam a importância de alinhar o planejamento territorial à dinâmica agrícola e de investir em sistemas intermodais e armazenagem.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa uma posição de destaque nas cadeias agroalimentares globais, sendo o maior produtor e exportador de commodities como soja, açúcar, café e suco de laranja, além de liderar as exportações de carnes bovina e de frango (USDA, 2022). Esse protagonismo é resultado de avanços tecnológicos, investimentos em pesquisa agrícola e políticas públicas de incentivo à produção (Souza et al., 2020). A expansão da agricultura brasileira está fortemente associada à conversão de vegetação nativa e à reconfiguração territorial, especialmente nas regiões do Cerrado e da Amazônia (Frey et al. 2018). Essas áreas se tornaram novas fronteiras agrícolas a partir dos interesses dos diferentes agentes econômicos do setor agroindustrial e de programas e incentivos governamentais. Ela se deu de forma regionalizada e mediada pela dinâmica de transporte, concentrada em regiões com maiores investimentos em tecnologia e infraestrutura, sobretudo na região Norte (Frey et al., 2018).

As projeções climáticas indicam que o aumento da temperatura média global e a redução nos volumes de precipitação afetam negativamente a produtividade de culturas agrícolas como a soja (Fernandes et al., 2022). Esses efeitos climáticos adversos também elevam a demanda por irrigação, intensificando o desequilíbrio hídrico em várias regiões produtoras (Zipper et al., 2016). Nesse contexto, torna-se fundamental identificar áreas com potencial agrícola sob diferentes cenários de mudança climática, a fim de orientar estratégias adaptativas para garantir a segurança alimentar (Mall et al., 2004). Este estudo teve como objetivo avaliar se diferentes cenários de mudança climática resultam na reconfiguração espacial da produção de soja no Brasil e examinar os impactos dessa redistribuição sobre a logística de escoamento.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição dos dados

As variáveis (Tabela 1) foram selecionadas com base na literatura e nas características de cultivo e desenvolvimento da soja na região (Frey et al., 2018; Sauer, 2018; Fernandes et al., 2022). O modelo foi construído a partir de 2.595 amostras de ocorrência de soja obtidas a partir dos dados da Coleção 9 do mapa de uso e cobertura da terra do MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2023) na Região do Arco Norte (Tabela 1).

Tabela 1: Variáveis utilizadas no modelo

Variáveis		Descrição	Unidade	Fonte
Físicas	Solos	O tipo de solo	Classes	INPE (2001)
	Declividade	A declividade	%	INPE (2011)
Uso e cobertura da terra	Uso e cobertura da terra	Os diferentes usos e coberturas da terra	Classes	MAPBIOMAS (2023)
	Valor da terra nua	O valor médio de um imóvel rural	R$/ha	Receita Federal (2023)
	Outorga de uso de recursos hídricos	Distância euclidiana para áreas de utilização de água para irrigação	lat/long	ANA (2023)
	Florestas públicas	Áreas que estão sob domínio do governo destinadas a diferentes usos.	ha	BRASIL (2020)

Infraestrutura	Rodovias	Distância euclidiana das rodovias	km	BRASIL (2023)
	Ferrovias	Distância euclidiana das ferrovias	km	BRASIL (2023)
	Hidrovias	Distância euclidiana das hidrovias	km	BRASIL (2023)
	Armazéns graneleiros	Distância euclidiana dos armazéns graneleiros	km	CONAB (2023)
	Portos	Distância euclidiana dos portos	km	BRASIL (2023)
	Terminais de transbordo	Distância euclidiana dos terminais de transbordo	km	BRASIL (2023)
Bioclimáticas	Bio2	Variação diurna média de temperatura	ºC	WORLDCLIM (2022)
	Bio3	Isotermalidade	%	WORLDCLIM (2022)
	Bio4	Sazonalidade de temperatura	%	WORLDCLIM (2022)
	Bio8	Temperatura média do trimestre mais úmido	ºC	WORLDCLIM (2022)
	Bio13	Precipitação do mês mais chuvoso	mm	WORLDCLIM (2022)
	Bio14	Precipitação do mês mais seco	mm	WORLDCLIM (2022)
	Bio15	Sazonalidade da precipitação	%	WORLDCLIM (2022)
	Bio18	Precipitação do trimestre mais quente	mm	WORLDCLIM (2022)
	Bio19	Precipitação do trimestre mais frio	mm	WORLDCLIM (2022)

Foram propostos três cenários para a avaliação da expansão da soja no Arco Norte, sendo o primeiro considerado "*business-as-usual*" que contempla a série histórica das variáveis bioclimáticas entre 1970-2000 (Fick e Hijmans, 2017). Nos cenários 2 e 3 foram incorporadas variáveis bioclimáticas projetadas pelo CMIP6, com base no modelo HadGEM3-GC31-LL do IPCC, além da inclusão de rodovias, ferrovias e hidrovias planejadas no Plano Nacional de Logística 2035 (PNL 2035, 2021) e das projeções climáticas do WORLDCLIM (2022), complementando a rede atual.

2.2. Modelo de Máxima Entropia

A teoria da Máxima Entropia, busca estimar a ocorrência de um evento determinada a partir da combinação de diferentes fatores que influenciam a sua presença (Oliveira et al., 2021). O Método da Máxima Entropia identifica a distribuição, p, de um evento em um conjunto de pixels da área de estudo, X, composto por fatores, x (Oliveira et al., 2021). A função de distribuição de probabilidade (PDF) associado ao fenômeno deve satisfazer duas condições: (1) Cada ponto x deve receber um valor não negativo de probabilidade, e (2) a soma de todas as probabilidades deve ser igual a 1 (Oliveira et al., 2021). A Máxima Entropia pode ser medida pela Equação 1, atendendo aos pressupostos da PDF,

$$H(X) = -\sum_{x \epsilon X} \pi(x) * \ln \pi(x) \quad (1)$$

Em que H: entropia; π: função de probabilidade; x: elemento individual (ponto); X: área de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As maiores probabilidades de expansão da soja concentraram-se em áreas próximas a infraestrutura de armazenagem e eixos viários (Figura 1). No cenário 1, rotas como BR-135, BR-364, BR-163 e BR-155/158 são fundamentais. Nos cenários futuros, projetam-se ampliações na malha rodoviária e ferroviária, incluindo BR-153, BR-060 e BR-251, com destaque para a região Centro-Oeste e Matopiba. Atualmente, a Ferrovia Norte-Sul é a principal via de escoamento, mas com nos novos cenários, outras ferrovias projetadas, como EF-170 (Ferrogrão), EF-334 (FIOL) e EF-364 (Ferronorte), tornam-se estratégicas (Figura 1).

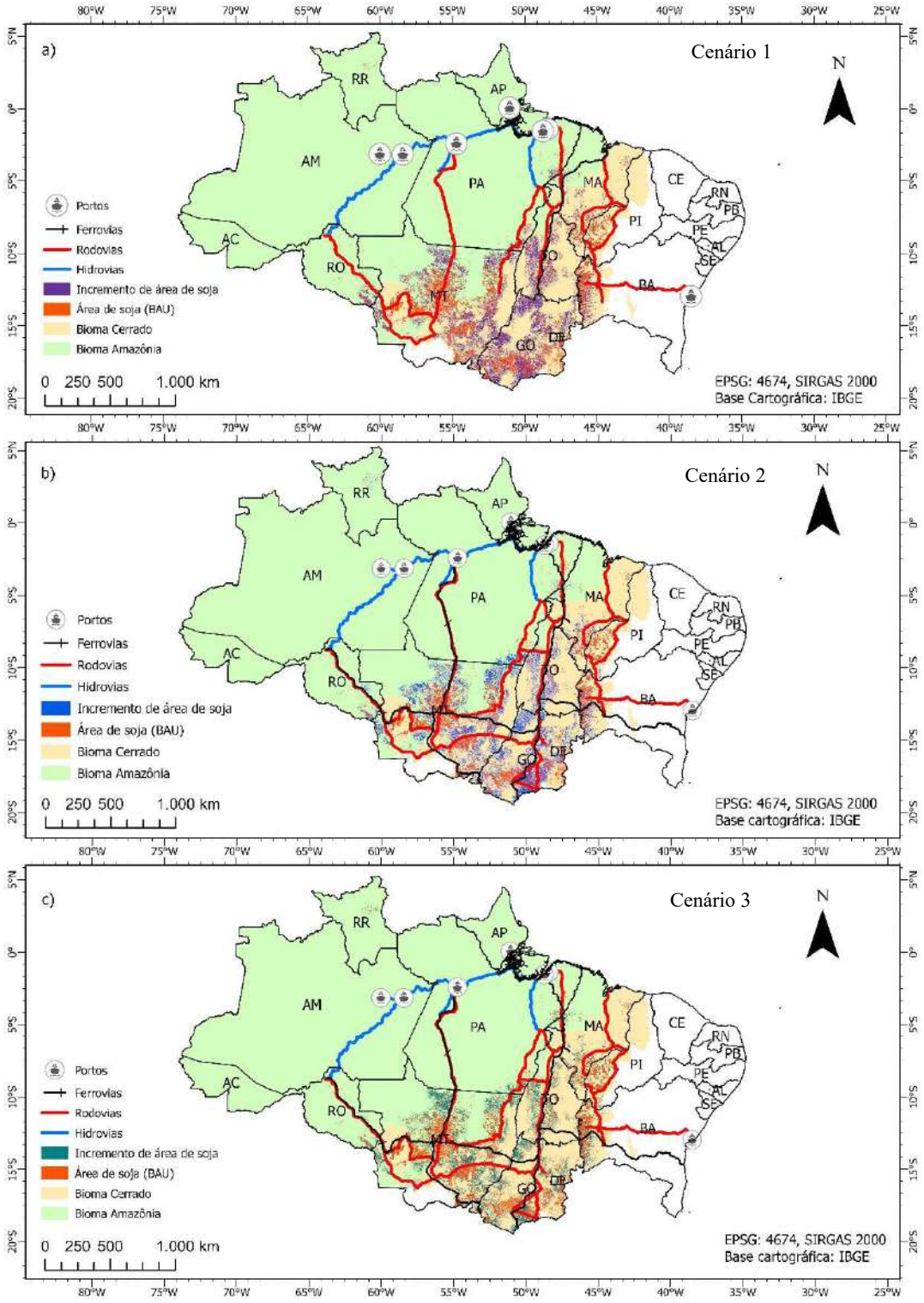


Figura 1: Expansão da soja nos Cenários 1, 2 e 3.

Essas novas rotas são validadas a partir dos corredores descritos no Plano Nacional de Logística 2035, que norteia o planejamento do sistema de transportes brasileiro a partir da integração territorial, eficiência logística e desenvolvimento econômico, social e regional (PNL 2035, 2021). As variáveis mais importantes foram os armazéns graneleiros, valor da terra nua e uso do solo, aliados às variáveis bioclimáticas (Bio15, Bio2, Bio14).

Os resultados do índice de vulnerabilidade logística no Arco Norte mostram concentração de áreas críticas em regiões consolidadas da fronteira agrícola (GO, MT, TO e BA), com cerca de 30% dos municípios vulneráveis em todos os cenários. Nos cenários futuros, a vulnerabilidade se intensifica e se desloca, evidenciando que as

mudanças climáticas ampliam ineficiências onde a expansão agrícola supera a infraestrutura. A análise municipal destaca a heterogeneidade territorial e demonstra que gargalos locais acumulados comprometem a eficiência regional e nacional.

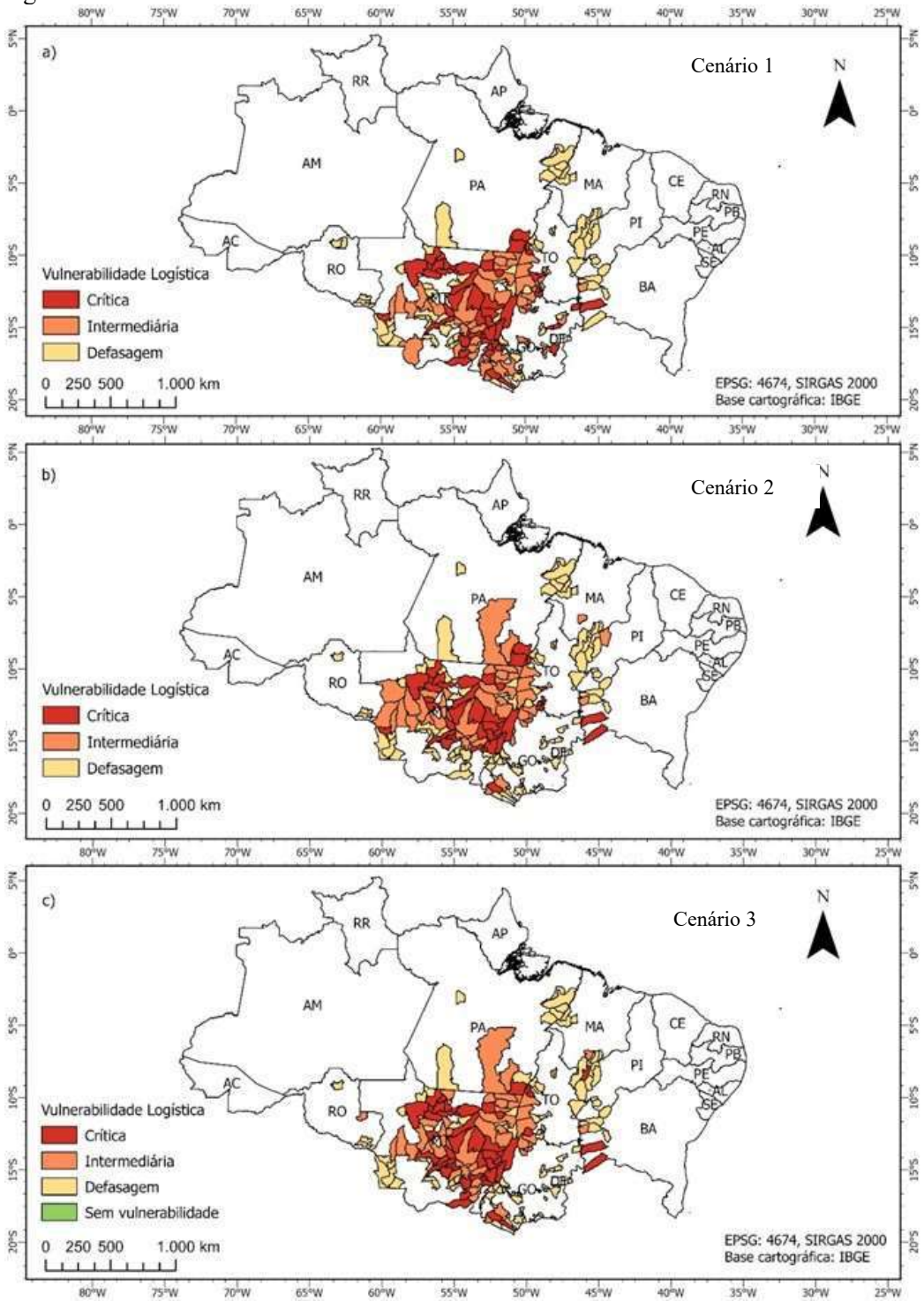


Figura 2: Vulnerabilidade logística das áreas de expansão da soja nos Cenários 1, 2 e 3

A relação entre expansão agrícola e infraestrutura logística identificada neste estudo está alinhada com pesquisas anteriores que destacam a importância de fatores como armazéns e redes de transporte no suporte ao crescimento da produção agrícola (Wang et al., 2024). Mesmo em áreas próximas aos principais corredores logísticos, persistem gargalos relacionados à capacidade de armazenagem, o que pode comprometer a eficiência do escoamento. Projetos como a Ferrogrão e a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) representam oportunidades estratégicas para reduzir custos logísticos e ampliar a eficiência do sistema de

transporte intermodal no Brasil (Branco et al., 2021).

4. CONCLUSÃO

O avanço da fronteira agrícola, intensificado pelas mudanças climáticas, amplia desequilíbrios logísticos no Arco Norte, onde a expansão da soja supera os investimentos em transporte e armazenagem. A persistência de municípios com alta vulnerabilidade revela déficit estrutural, enquanto deslocamentos regionais refletem dinâmicas de planejamento e investimento. A tipologia proposta orienta políticas públicas, priorização de investimentos e estratégias de escoamento e armazenagem, destacando áreas sem déficits próximos às regiões produtoras como potenciais polos de armazenagem (hubs) e de agroindústrias. A expansão da soja na Amazônia e no Cerrado tem gerado desmatamento, perda de biodiversidade e maiores emissões, intensificados pela pressão sobre corredores logísticos. O modelo proposto orienta a produção para áreas já antropizadas e de alta aptidão agrícola, priorizando regiões com infraestrutura consolidada e reduzindo a pressão sobre áreas sensíveis, conciliando crescimento produtivo e conservação ambiental.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2023/08020-2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Branco, J. E. H.; D. B. Bartholomeu; P. N. A. Junior e J. V. Caixeta-Filho (2021) Mutual analyses of agriculture land use and transportation networks: The future location of soybean and corn production in Brazil. *Agricultural Systems*, v. 194, 103264. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103264.

Fernandes, R. D. M.; D. M. de Melo; E. F. Elli e R. Battisti (2022) Climate change impacts on rainfed and irrigated soybean yield in Brazil's new agricultural frontier. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 147, n. 1, p. 803-816. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03865-w.

Fick, S. E. e R. J. Hijmans (2017) WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086.

Frey, G. P.; T. A. West; T. Hickler; L. Rausch; H. K. Gibbs e J. Börner (2018) Simulated impacts of soy and infrastructure expansion in the Brazilian Amazon: A maximum entropy approach. *Forests*, v. 9, n. 10, p. 600. https://doi.org/10.3390/f9100600.

Gibbs, H. K., L. Rausch; J. Munger; I. Schelly; D. C. Morton; P. Noojipady; B. Soares-Filho; P. Barreto; L. Micolm e N. F. Walker (2015) Brazil's soy moratorium. *Science*, v. 347, n. 6220, p. 377–378. https://doi.org/10.1126/science.aaa0181.7

Macedo, F. C.; E. G. Gomes Júnior (2019) Padrão de reprodução do capital, território e infraestrutura de transportes: os casos de Santarém (PA) e Itaituba (PA). *Boletim Goiano Geografia*, v. 39, p. 1-18. https://doi.org/10.5216/bgg.v39i0.55542.

Mall, R. K., M. Lal; V. S. Bhatia; L. S. Rathore e R. Singh (2004) Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 121, n. 1-2, p. 113-125. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00157-6.

MAPBIOMAS - Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. (2023) *Coleções*. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. (Acesso 09/07/2025).

Oliveira, I. K. D., L. K. D. Oliveira e R. A. D. A. Nóbrega (2021) Applying the Maximum Entropy Model to Urban Freight Transportation Planning: An Exploratory Analysis of Warehouse Location in the Belo Horizonte Metropolitan Region. *Transportation Research Record*, v. 2675, n. 12, p. 65-79. https://doi.org/10.1177/03611981211027873.

Sauer, S (2018) Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: The agribusiness economy and its social and environmental conflicts. *Land Use Policy*, v. 79, n. 1, p. 326–338. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.030.

United States Department of Agriculture – USDA. (2022). Oilseeds: world markets and trade. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf. (Acesso 09/07/2025).

Wang, Z., G. B. Martha; J. Liu; C. Z. Lima e T. W. Hertel (2024) Planned expansion of transportation infrastructure in Brazil has implications for the pattern of agricultural production and carbon emissions. *Science of The Total Environment*, v. 928, 172434. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172434.

Zipper, S. C.; J. Qiu e C. J. Kucharik (2016) Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 9, 094021. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094021.

Andréa Leda Ramos de Oliveira (aleda@unicamp.br)
Laboratório de Logística e Comercialização Agroindustrial - LOGICOM - FEAGRI|UNICAMP
Av. Cândido Rondon, 501 - Barão Geraldo 13083-875 - Campinas/SP

O MODELO MRV NA LOGÍSTICA SUSTENTÁVEL: DESAFIOS E AVANÇOS NA MENSURAÇÃO, RELATO E VERIFICAÇÃO DE PRÁTICAS ESG

Bruna Castro Duarte, Daniel Neves Schmitz Gonçalves, Marcio de Almeida D'Agosto
Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

RESUMO
O avanço das tecnologias digitais, impulsionado pela pandemia, intensificou o consumo online e elevou a demanda por entregas, contribuindo para o aumento das emissões de gases poluentes no ambiente urbano. Diante disso, cresce a pressão para que empresas reportem com transparência suas emissões de Gases de Efeito Estufa. Este artigo analisa o comprometimento ESG de dez empresas varejistas brasileiras, de capital aberto e listadas na Bolsa de Valores, por meio de seus relatórios anuais e inventários de emissões, utilizando o modelo MRV — Monitoramento, Reporte e Verificação. A análise documental revelou que, embora a maioria monitore e reporte seus dados, pouco mais da metade realiza verificação externa, o que aponta fragilidades na governança climática e riscos de *greenwashing*. O estudo reforça a importância da verificação para garantir a credibilidade das práticas ESG e contribuir para maior responsabilidade ambiental no setor.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No contexto de mudanças climáticas e a intensificação das exigências por parte de investidores, consumidores e reguladores, os critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*) têm se destacado no centro das decisões corporativas. Descobriu-se que atividades ESG e divulgações de performance ajudam as empresas a atrair investimentos e aumentar o desempenho financeiro (Kim et al., 2021). No cenário brasileiro, empresas do setor logístico enfrentam pressões especialmente na etapa conhecida como "última milha", reconhecida por sua contribuição significativa às emissões de gases de efeito estufa (GEE). O ESG busca adicionar valores ao mundo corporativo, voltados para as áreas ambiental, social e de governança (Garcia; Mendes-Da-Silva; Orsato, 2017).

Como forma de divulgar o desempenho anual em sustentabilidade, muitas empresas publicam relatórios ESG, baseados nos pilares ambiental, social e de governança. Para que esses documentos sejam comparáveis, consistentes e transparentes, utilizam-se *frameworks* de relato amplamente difundidos no mercado, como o GRI (*Global Reporting Initiative*), SASB (*Sustainability Accounting Standards Board*) e TCFD (*Task Force on Climate-related Financial Disclosures*). Esses frameworks podem ser aplicados de maneira isolada ou combinada, permitindo adaptações conforme o setor e a estratégia da organização.

O GRI é a ferramenta de relatórios de sustentabilidade corporativa mais amplamente adotada (Bais; Nassimbeni; Orzes, 2024). Este *framework* está fortemente associado a relatórios com maior comparabilidade entre empresas e mais confiáveis por stakeholders, devido à maior transparência na definição de indicadores, escopo e tratamento de dados (Bais; Nassimbeni; Orzes, 2024). Os GRI Standards são estruturados em três conjuntos principais: os Padrões Universais, aplicáveis a todas as organizações; os Padrões Setoriais, voltados a setores específicos; e os Padrões Temáticos, que abordam tópicos materiais como emissões, uso da água e direitos humanos (GRI, 2021).

Os *Sustainability Accounting Standards Board* (SASB), disponíveis para 77 setores, destacam os riscos e oportunidades de sustentabilidade mais propensos a influenciar os fluxos de caixa, o acesso ao financiamento e o custo de capital de uma entidade, seja no curto, médio ou longo prazo, definindo tópicos e métricas de divulgação mais relevantes para investidores (SASB, 2025). Outra estrutura de relato (*framework*) consolidada, o TCFD, em português, Força-Tarefa para Divulgações Financeiras Relacionadas ao Clima, tem foco na divulgação de implicações financeiras de riscos e dependências relacionados ao clima, em vez de revelar os impactos de uma corporação nas mudanças climáticas (O'Dwyer; Unerman, 2020).

No setor logístico, uma das áreas mais relevantes no controle de emissões de carbono está relacionada ao transporte, respondendo por 15 % das emissões humanas totais, 23 % das emissões relacionadas à energia (Hu et al., 2023). Com a digitalização e o crescimento do *e-commerce*, observou-se um aumento expressivo na demanda por entregas, especialmente na última milha (*last-mile delivery*), caracterizada pela entrega final diretamente ao consumidor, contribuindo no volume de emissões (Li, 2023). Dessa forma, a emissão de GEE associada à última milha se tornou um dos principais elementos a serem contabilizados nos inventários

corporativos em empresas com foco no setor logístico (Kemp; López-García; Shah, 2025). É fundamental que o processo de divulgação de inventários GEE siga um padrão técnico estruturado, como o proposto pelo GHG Protocol, padrão técnico mais amplamente adotado para contabilidade e inventário de GEE por empresas (Greenhouse Gas Protocol Initiative, 2004).

A estrutura proposta pelo GHG Protocol organiza as emissões em três escopos distintos: o Escopo 1 abrange as emissões diretas provenientes de fontes que são de propriedade ou controle da empresa; o Escopo 2 compreende as emissões indiretas associadas à geração de energia elétrica, vapor ou calor adquiridos; e o Escopo 3 contempla outras emissões indiretas ao longo da cadeia de valor. Essa classificação sistemática orienta a definição de metas e estratégias de mitigação alinhadas às exigências ambientais contemporâneas (Greenhouse Gas Protocol Initiative, 2004).

A última-milha é enquadrada nas emissões indiretas (Escopo 3), na categoria *downstream*, ou seja, aquelas geradas após as operações da organização, mais especificamente a Categoria 9 – Downstream Transportation and Distribution (GRI, 2013). A inclusão do Escopo 3, incluindo o *last-mille*, pode aumentar em até 71 % o total de emissões relatadas por empresas (Castillo; Álvarez, 2023). A última milha representa um dos principais pontos de atenção nas operações logísticas (Pourmohammadreza; Akbari Jokar; Van Woensel, 2025). Desta forma, em empresas varejistas, em que o transporte, etapa logística, é base do negócio, considerar o Escopo 3 é parte fundamental do seu inventário de emissões para possibilitar a tomada de decisões.

Diante da crescente demanda por transparência e rastreabilidade nas práticas ambientais corporativas, o modelo MRV (Monitoramento, Reporte e Verificação) surge como um instrumento importante para avaliar a integridade, a credibilidade e a consistência das informações relacionadas às emissões de GEE. O conceito de MRV foi originalmente desenvolvido no âmbito das negociações climáticas internacionais, especialmente no contexto da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Desde então, seu uso foi adaptado e incorporado a diversas práticas corporativas, regulatórias e setoriais (UNFCCC, 2014).

O MRV estrutura-se em três componentes principais:

i. Monitoramento (*Monitoring*): estabelecimento de metodologias para mensurar emissões de forma sistemática e contínua. Isso inclui a coleta de dados primários, como consumo de combustível, quilometragem de frota, uso de energia e outros insumos relevantes. O monitoramento deve seguir diretrizes padronizadas, como as do GHG Protocol, ISO 14064 ou IPCC Guidelines (IPCC, 2006).
ii. Reporte (*Reporting*): organização e divulgação das informações obtidas em relatórios técnicos ou corporativos, com estrutura clara, acessível e comparável. A qualidade do reporte é ampliada quando se utilizam *frameworks* reconhecidos, como o GRI, SASB e TCFD, pois permitem uma apresentação mais objetiva e alinhada às expectativas do mercado e dos stakeholders (GRI, 2021; TCFD, 2017).
iii. Verificação (*Verification*): etapa que confere credibilidade às informações divulgadas, a partir da auditoria ou certificação realizada por partes independentes. A verificação pode ser conduzida por empresas auditoras focadas na auditoria de emissões de gases, certificadoras ambientais ou ainda via programas nacionais voluntários, como o Registro Público de Emissões do Programa Brasileiro GHG Protocol, que oferece selos de verificação (Bronze, Prata ou Ouro).

A adoção do MRV pelas empresas permite aumentar a confiabilidade das informações divulgadas, evitar *greenwashing* e fortalecer o engajamento com a agenda climática. A verificação externa das emissões reduz significativamente o risco de manipulação de dados e melhora a percepção da empresa junto a investidores e sociedade. Em análise feita por (Roszkowska-Menkes; Aluchna; Kamiński, 2024) observou-se que grande parte das organizações divulga seus inventários sem auditoria externa ou com escopo limitado, comprometendo a confiança dos dados reportados.

Diante dos conceitos apresentados, este artigo busca entender o grau de comprometimento de empresas brasileiras varejistas com a gestão de suas emissões de GEE. Para tanto, aplica-se o método MRV a uma amostra de dez empresas do setor, de capital aberto e listadas na Bolsa de Valores B3, classificando-as conforme o grau de comprometimento com a agenda climática, com base na presença, divulgação e verificação dos inventários de emissões em seus relatórios anuais.

2. METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa qualitativa, de caráter descritivo, baseada na análise documental de relatórios anuais e de sustentabilidade de dez empresas brasileiras do setor varejista, todas de capital aberto e listadas na Bolsa de Valores (B3). A escolha das organizações considerou a relevância das operações logísticas em seus modelos de negócio, com ênfase no transporte urbano de curta distância, conhecido como última milha. Os dados analisados de oito empresas referem-se ao ano de 2023, uma de 2021 (Empresa C) e uma de 2022 (Empresa D), sendo estas duas últimas tendo publicado o seu último relatório nos referidos anos, e foram extraídos de fontes públicas disponibilizadas pelas próprias empresas, incluindo sites institucionais e registros no Programa Brasileiro GHG Protocol.

Para cada empresa, foram observados três critérios, sendo o primeiro o Monitoramento, que diz respeito à consistência na realização de inventário de emissões de GEE, seja total ou parcial. Desta forma, é necessário que cada empresa tenha pelo menos mais um inventário de emissões divulgado anteriormente, de forma a possibilitar uma base comparativa. O segundo quesito, o Reporte, é caracterizado pela divulgação do inventário em documento oficial, com link rastreável e menção aos escopos contemplados (1, 2 e 3). O terceiro critério consiste na Verificação, identificada pela certificação ou auditoria externa ou interna voltadas para inventário de emissões, como a concessão de selos do GHG Protocol (Ouro, Prata ou Bronze). Com base nesses critérios, as empresas foram classificadas em três níveis de comprometimento com as práticas de mensuração, reporte e verificação (MRV): pouco comprometidas, quando atendem a zero ou apenas um dos critérios; comprometidas, quando atendem a dois; e muito comprometidas, quando cumprem os três critérios. A Tabela 1 resume os critérios adotados na metodologia.

Tabela 1: Critérios MRV

Critério	Descrição
Monitoramento	Consistência na realização de inventário de emissões (total ou parcial).
Reporte	Divulgação do inventário em documento oficial, com link rastreável e menção aos escopos
Verificação	Certificação ou auditoria externa, como o Selo GHG Protocol (Ouro, Prata ou Bronze).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das dez empresas analisadas, nove divulgaram informações sobre emissões de GEE em seus relatórios, sendo que uma o fez apenas uma vez, sem base comparativa. Entre elas, sete contaram com validação externa por meio do Selo Ouro do Programa Brasileiro GHG Protocol, e seis dessas também realizaram auditoria externa. As outras três empresas não apresentaram evidências de verificação dos dados reportados. Com base nos critérios do método MRV (Mensuração, Reporte e Verificação), classificou-se sete empresas como muito comprometidas, uma como comprometida e duas como pouco comprometidas com a transparência e responsabilidade ambiental. A Tabela 2 sintetiza essa classificação.

Tabela 2: Classificação final das empresas avaliadas

Empresa	Monitoramento	Reporte	Verificação	Classificação Final
A	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023 e Audit. Ext.)	Muito comprometida
B	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023 e Audit. Ext.)	Muito comprometida
C	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023 e Audit. Ext.)	Muito comprometida
D	Não	Sim	Não	Pouco comprometida
E	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023 e Audit. Ext.)	Muito comprometida
F	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023)	Muito comprometida
G	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023 e Audit. Ext.)	Muito comprometida
H	Sim	Sim	Não	Comprometida
I	Não	Sim	Não	Pouco comprometida
J	Sim	Sim	Sim (Selo Ouro 2023)	Muito comprometida

Os resultados indicam que nem todas as empresas demonstram comprometimento com o monitoramento das emissões. As empresas D e I, por exemplo, apresentaram inventários em 2023 sem base comparativa com anos anteriores — a primeira cobrindo os escopos 1, 2 e 3 e a segunda apenas os escopos 1 e 2. Essa limitação

compromete a transparência e levanta dúvidas sobre a confiabilidade dos dados divulgados. Sete das dez empresas analisadas possuem o selo Ouro, evidenciando um esforço significativo do setor em buscar validação externa como indicador de compromisso ambiental. No entanto, a ausência de verificação externa em parte das empresas com forte atuação logística revela espaço para avanços, especialmente frente às crescentes exigências sociais e de mercado. Destaca-se o fato de nenhuma empresa adotar auditoria interna específica para verificação de emissões de GEE, o que representa uma lacuna importante no fortalecimento dos mecanismos de controle e confiabilidade das informações. Por fim, embora apenas uma empresa não divulgue inventário de emissões — o que pode ser interpretado como um avanço —, o cenário ainda sugere a presença de práticas simbólicas, nas quais o reporte cumpre papel institucional, mas não se traduz necessariamente em gestão efetiva.

4. CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS

A aplicação do método MRV aos relatórios de sustentabilidade de empresas do setor logístico revelou diferentes níveis de comprometimento com a agenda climática. Embora o monitoramento e o reporte de emissões sejam práticas relativamente comuns, a verificação externa — essencial para garantir a confiabilidade dos dados — ainda é pouco adotada. A auditoria interna, por sua vez, é ainda menos frequente quando se trata da verificação de emissões de GEE, não sendo encontrada na amostra analisada. Além disso, a comparação entre inventários de diferentes anos é limitada pela falta de padronização no recorte temporal. O estudo destaca a importância da padronização e da auditoria no contexto ESG e reforça a necessidade de ampliar o uso de *frameworks* consolidados, como o GRI, especialmente em setores críticos como transporte na logística. Sugere-se, para pesquisas futuras, a ampliação da análise para outros setores e o acompanhamento da evolução dessas práticas ao longo do tempo. Como próximos passos, recomenda-se avaliar, sob a ótica MRV, as ações efetivas de mitigação relatadas pelas empresas, permitindo conectar a prática declarada aos seus impactos reais na redução de emissões. Além disso, sugere-se para estudos futuros a realização de análises comparativas em âmbito internacional, aplicando o MRV em empresas do setor do varejo de outros países, para buscar ampliar o entendimento da aplicabilidade do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIS, B.; NASSIMBENI, G.; ORZES, G.; Global Reporting Initiative: Literature review and research directions. *Journal of Cleaner Production*, v. 471, p. 143428, 2024.

CASTILLO, O.; ÁLVAREZ, R.; Electrification of Last-Mile Delivery: A Fleet Management Approach with a Sustainability Perspective. *Sustainability*, v. 15, n. 24, p. 16909, 2023.

GARCIA, A. S.; MENDES-DA-SILVA, W.; ORSATO, R. J. Sensitive industries produce better ESG performance: Evidence from emerging markets. J*ournal of Cleaner Production*, v. 150, p. 135–147, 2017.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL INITIATIVE. Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington, D.C.: World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (acesso em 28/05/2025).

GREENHOUSE GAS PROTOCOL INITIATIVE. Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (Companion to the Scope 3 Standard). Washington, D.C.: World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2013. Disponível em: < https://ghgprotocol.org/> (acesso em 01/06/2025).

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. GRI Standards. 2021. Disponível em: <https://www.globalreporting.org> (acesso em 15/05/2025)

HU, X. *et al.* Carbon Emissions in Transportation: A Synthesis Framework. Sustainability, v. 15, n. 11, p. 8475, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE *et al.* 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Japan and Geneva, Switzerland: Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (acesso em 02/06/2025).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (acesso em 10/06/2025).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/> (acesso em 18/06/2025).

KEMP, M. P.; LÓPEZ-GARCÍA, M. E.; SHAH, A. R.; The Role of CO_2 Emission Reporting Requirements for Last-Mile Delivery. *BRC Academy Journal of Business*, v. 14, n. 1, p. 62–81, 2025.

KIM, J. *et al.* Competitiveness of e-commerce firms through ESG logistics. *Sustainability* (Switzerland), v. 13, n. 20, p.

11548, 2021.
LI, Z.. The Impact of E-commerce Last-mile Delivery on Environmental Sustainability. *In*: Guangzhou, China: dez. 2023. Disponível em: <https://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.8-12-2023.2344383> (acesso em 10/06/2025)
O'DWYER, B.; UNERMAN, J.; Shifting the focus of sustainability accounting from impacts to risks and dependencies: researching the transformative potential of TCFD reporting. Accounting, Auditing & Accountability Journal, v. 33, n. 5, p. 1113–1141, 10 jun. 2020.
POURMOHAMMADREZA, N.; AKBARI JOKAR, M. R.; VAN WOENSEL, T.; Last-Mile Logistics with Alternative Delivery Locations: A Systematic Literature Review. Results in Engineering, v. 25, p. 104085, 2025.
ROSZKOWSKA-MENKES, M.; ALUCHNA, M.; KAMIŃSKI, B.; True transparency or mere decoupling? The study of selective disclosure in sustainability reporting. Critical Perspectives on Accounting, v. 98, p. 102700, 1 jan. 2024.
SUSTAINABILITY ACCOUNTING STANDARDS BOARD. SASB Navigator. Disponível em: <https://navigator.sasb.ifrs.org/login> (acesso em 16/05/2025)
TASK FORCE ON CLIMATE-RELATED FINANCIAL DISCLOSURES (TCFD). Final Recommendations Report. *[S.l.]*: Financial Stability Board, 2017. Disponível em: <https://www.fsb-tcfd.org> (acesso em 02/04/2025).
UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Handbook on Measurement, Reporting and Verification for Developing Country Parties. Bonn, Germany: United Nations Climate Change Secretariat, 2014. Disponível em: <https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom_/application/pdf/non-annex_i_mrv_handbook.pdf> (acesso em 01/06/2025).

Bruna Castro Duarte (bruna.duarte@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE-UFRJ. Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão
Daniel Neves Schmitz Gonçalves (danielnsg@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE-UFRJ. Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão
Marcio de Almeida D'Agosto (dagosto@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE-UFRJ. Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão

OTIMIZAÇÃO DE EMISSÕES NO TRANSPORTE DE SOJA NA AMAZÔNIA: UM MODELO PARA SUSTENTABILIDADE

Harlenn dos Santos Lopes[1,2], Daniel Oliveira Rodrigues[2], Ellyedson Azevedo Cavalheiro[2], Renato da Silva Lima[1], Guilherme Santos Lucca[1]
[1]Universidade Federal de Itajubá, [2]Universidade Federal do Pará

RESUMO
O objetivo do trabalho é estudar a otimização das emissões de CO_2 no transporte de soja na Amazônia, um setor que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Utilizando programação linear, o modelo visa minimizar as emissões, considerando rotas existentes e futuras, e a adição de biodiesel. Foram avaliados14 cenários, projetando a carga atual de 2023 e projeções para 2034. Os resultados mostram que a integração de novas infraestruturas multimodais, como a Ferrogrão e a Ferrovia Norte-Sul, combinada com o uso de biodiesel B15, reduz consideravelmente as emissões. O estudo conclui que portos como Santarém e Barcarena são estratégicos para investimentos em logística sustentável e que a multimodalidade e a transição energética são cruciais para um transporte de soja mais sustentável e ambientalmente responsável na região amazônica. O estudo alinha-se aos ODS 3, 7 e 13.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de soja mundial. A busca pela competitividade vem direcionando novas alternativas logísticas no país, utilizando os portos da Amazônia para exportação, dada a menor distância marítima aos mercados consumidores. Essa expansão é economicamente relevante, porém traz consigo desafios ambientais significativos, como o desmatamento e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Barona et al., 2010). A eficiência no planejamento de transportes contribui significativamente para a redução de impactos ambientais, considerando que o transporte de cargas está entre os principais emissores de gases poluentes no Brasil, ocupando o primeiro lugar em emissões de energia em 2024, representando 44% de GEE, cerca de 223,8 $MtCO_2$. (Eloy et al., 2023; SEEG, 2024). O uso intensivo de combustíveis fósseis, como diesel e gasolina, neste setor tem elevado as emissões a níveis recordes, contribuindo para a poluição atmosférica e aumentando a vulnerabilidade das populações às mudanças climáticas (SEEG, 2024).

Em resposta à urgência de um desenvolvimento global mais sustentável, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em 2015 (ONU BRASIL, 2025). No contexto brasileiro, a cadeia produtiva da soja tem um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais, exigindo soluções que harmonizem o crescimento agrícola com a preservação dos recursos naturais (Silva Junior et al., 2021). A emissão de GEE pelos modais de transporte na cadeia de distribuição para exportação é uma das principais problemáticas ambientais.

Neste contexto, visando a redução das emissões de GEE e alinhamento aos ODS, esta pesquisa utilizou um modelo de otimização baseado em programação linear para comparar rotas alternativas da exportação de soja na Amazônia brasileira, com as emissões sendo a variável de decisão para alocação otimizada da carga nas rotas e modais disponíveis. O modelo alinha-se ao ODS 3, 7 e 13, ao propor soluções sustentáveis para melhorar a infraestrutura logística na Amazônia. Usando tecnologia e modelos matemáticos, o estudo sugere um uso mais eficiente dos recursos no transporte da soja e prioriza a redução das emissões de GEE, buscando cenários com menor impacto ambiental. Plaza et al. (2020) mostraram que a economia pode ser estendida do nível econômico para o ambiental pela redução das emissões, atingindo metas estabelecidas em acordos internacionais, reforçando ainda mais o alinhamento da gestão de transportes aos ODS.

2. METODOLOGIA

Na construção do modelo, estruturaram-se as rotas, a formulação matemática e os coeficientes de emissão de CO_2 por modal. As rotas têm como destinos os quatro principais portos da Amazônia — Itacoatiara (ITA), Santarém (STM), Barcarena (BAR) e Itaqui (ITQ) — e como origens microrregiões (MCR) dos nove estados amazônicos, selecionadas até cobrir aproximadamente 90% da produção regional; no Mato Grosso, consideraram-se apenas as regiões setentrionais, pois o sul escoa historicamente para portos do Sudeste e Sul (SALIN, 2024). Como ponto geográfico de origem, adotaram-se os municípios de maior produção de soja em cada MCR.

Definiram-se dez rotas uni e multimodais, combinando os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário,

conectando cada origem a pelo menos um dos portos analisados. A base de produção é a Safra 2023 (IBGE, 2023). Os fatores de emissão de GEE seguem Mathers et al. (2019) para os três modais. As premissas de estruturação do modelo constam na Tabela 1.

Tabela 1: Configuração do modelo proposto. Fonte: (AMPORT, 2023), (Google Maps, 2025) e (SECEX 2023).

	ITA (AM)		STM (PA)			BAR (PA)				ITQ (MA)				
Rotas	**A1**	**B1**	**B2**	**B3**	**B5**	**C1**	**C2**	**C3**	**C6**	**C7**	**D1**	**D2**	**D3**	**Exp. Mi (Ton)**
Modais	**R-TH**	**R-TH**	**R-TF**	**H**	**R**	**R-TH1**	**R-TH2**	**R-TF**	**F**	**R**	**R-TF**	**F**	**R**	
Origens														**TOTAL**
Alto T. Pires (MT)	1.075	1.075	86	289	1.374	1.075	1.511	86	933	1.981	67	2.617	2.301	5,43
Parecis (MT)	1.289	1.355	366	289	1.654	1.289	1.881	218	2.581	2.261	218	2.617	2.767	3,49
Canarana (MT)	1.380	1.381	804	289	1.680	803	1.094	609	933	1.565	609	1.716	1.884	2,79
N. Araguaia (MT)	2.240	1.464	881	289	1.763	2.397	1.037	881	933	1.508	812	1.716	1.828	2,42
Sinop (MT)	1.370	994	0	289	1.292	993	1.429	0	933	1.898	150	2.617	2.218	2,27
Arinos (MT)	1.383	1.227	282	1.489	1.570	1.227	1.707	282	2.581	2.177	282	2.617	2.805	1,96
Paranatinga (MT)	1.718	1.411	422	289	1.710	1.411	1.468	422	933	1.939	321	2.617	2.354	1,20
Paragominas (PA)	2.564	1.306	1.809	289	1.233	1.306	394	238	477	283	238	513	590	1,08
G. Balsas (MA)	2.947	1.689	1.795	289	1.615	1.689	707	490	686	1.102	490	722	940	0,94
Colíder (MT)	1.698	931	204	289	1.255	931	1.388	204	933	1.868	351	2.617	2.178	0,79
Aripuanã (MT)	1.328	1.372	411	289	1.673	1.372	1.807	411	933	2.277	351	2.617	2.597	0,75
Gurupi (TO)	2.649	1.863	1.353	289	1.119	1.863	881	227	1.197	1.426	227	1.233	1.473	0,55
Miracema (TO)	2.448	1.537	954	289	1.619	1.537	581	317	1.197	1.051	317	1.233	1.360	0,54
P. Nacional (TO)	2.797	1.699	1.269	289	1.431	1.698	716	0	1.197	1.186	0	1.233	1.308	0,47
Jalapão (TO)	2.768	1.510	1.587	289	1.431	1.510	528	436	477	940	436	513	918	0,39
Alta Floresta (MT)	1.808	903	314	289	1.208	909	1.377	314	933	1.846	461	2.617	2.166	0,37
C. Oeste (RO)	1.009	1.009	840	1.489	2.101	1.802	2.236	177	3.227	2.708	177	3.263	3.356	0,35
C. Araguaia (PA)	2.382	1.471	887	289	1.445	1.471	541	384	1.197	1.012	384	1.233	1.331	0,34
P. Velho (RO)	0	0	1.370	1.489	1.621	1.258	2.241	0	3.997	2.486	0	4.033	3.043	0,32
R. Formoso (TO)	2.767	1.748	1.164	289	1.670	1.748	766	170	1.197	1.237	170	1.233	1.358	0,31
	A2	**1.026**		**B4**	**933**		**C4**	**1.534**		**C5**	**494**			

R: Distância rodoviária – km; F: Distância ferroviária – km; H: Distância hidroviária – km; R-TH: Distância rodoviária entre a origem e o terminal hidroviário; R-TF: Distância rodoviária entre a origem e o terminal ferroviário

A formulação adotada corresponde a uma aplicação do problema de transporte baseado em programação linear, cujo objetivo é minimizar as emissões totais de CO_2 nas rotas, respeitando as disponibilidades nas origens e as capacidades de recebimento nos portos. O modelo de otimização proposto está descrito nas Equações 1 a 4:

$$\text{Min Z} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}[(c_{ij}d_{ij})] \,.\, x_{i,j} \quad (1)$$

Composição de Custos:

$$C_{ij} = C_r + C_f + C_h \quad (2)$$

Para c_{ij} da origem até os portos exportadores:
c_r = Custo ambiental de transporte rodoviário, em $MtCO_2$; c_f = Custo ambiental de transporte ferroviário, em $MtCO_2$; c_h= Custo ambiental de transporte hidroviário, em $MtCO_2$;

Sujeito as restrições:
Capacidade dos Portos

$$\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} \leq J_j, para\ j = 1, \dots n \quad (3)$$

Oferta e demanda

$$\sum_{i=1}^{m} x_{i,j} = a_i, para\ i = 1, \dots m \quad (4)$$

Onde:

m: número de origens produtoras de soja; n: número de portos exportadores ou pontos de transbordo;
J_j: capacidade do porto exportador j; a_i: quantidade ofertada em cada origem i; $c\tilde{ij}$: custo ambiental da movimentação logística entre a origem i até o porto exportador j; d_{ij}: distância entre a origem i até o porto exportador j; x_{ij}: quantidade transportada da origem i até porto exportador j;
Z: custo total de emissão de CO_2 do transporte.

Elaboraram-se 14 cenários, com e sem restrições de capacidade nos portos, considerando a demanda de 2023 e projeção para 2034 (MAPA, 2024). Em parte deles, avaliou-se a adoção do B15 (15% biodiesel e 85% diesel mineral) na frota rodoviária, assumindo redução estimada de 15% nas emissões de CO_2, sem prejuízo ao desempenho operacional e em processo de adequação regulatória (MME, 2019). Os resultados oferecem alternativas comparativas sob a ótica ambiental. Os parâmetros dos cenários encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros para os cenários considerados. Fonte: Autores

		Destinos - Capacidade (Milhões de Toneladas)			
Cenário	**Características**	**ITA**	**STM**	**BAR**	**ITQ**
1	SR Somente rotas reais existentes. Carga 2023.	SR	SR	SR	SR
2	CR Somente rotas reais existentes. Carga 2023.	3.67	3.21	10.13	10.01
3	EQ Somente rotas reais, Carga 2023 +B15.	6.70	6.70	6.70	6.70
4	CR Somente rotas reais +B15.	3.66	3.21	10.13	10.01
5	SR Considera rotas em construção ou projetos. Carga 2023.	SR	SR	SR	SR
6	CR Considera rotas em construção ou projetos. Carga 2023.	3.66	3.21	10.13	10.07
7	EQ Considera rotas em construção ou projetos. Carga 2023.	6.69	6.69	6.69	6.69
8	SR Considera rotas em construção ou projetos. Carga 2023 +B15.	SR	SR	SR	SR
9	CR Considera rotas em construção ou projetos. Carga atual 2023. +B15.	3.66	3.21	10.13	10.07
10	SR Considera rotas reais. Carga - projeção para 2034 (+30,76%) + B15.	SR	SR	SR	SR
11	CR Considera apenas rotas reais. Carga 2034 (30,76% de aumento) + B15.	4.78	4.20	13.24	13.16
12	SR Considera rotas em construção ou projetos. Carga 2034 (+30,76%) + B15	SR	SR	SR	SR
13	CR Considera rotas em construção ou projetos. Carga 2034 (30,76% de aumento).	4.78	4.20	13.24	13.16
14	SR Considera rotas reais. Carga 2034 (30,76% de aumento).	SR	SR	SR	SR

SR – Sem restrições de capacidade nos portos. CR – Com restrições reais de capacidade nos Portos. EQ – Com restrições de equilíbrio de capacidade entre os portos. +B15 – Adição de mistura B15 de biodiesel nas rotas rodoviárias.

3. RESULTADOS

Utilizando o *software* Microsoft Excel e Microsoft Power Bi, foi elaborado um *dashboard* com os principais resultados obtidos após geração dos 14 cenários comparativos do modelo, apresentados na Figura 1.



Figura 1: Principais resultados após implementação dos cenários comparativos.

A Figura 1 indica B2+B4 como rota mais utilizada e B1+B3 como menos utilizada em todos os cenários. No painel "Emissões por cenário ($MtCO_2$)", o pior desempenho ocorre em C11 (3,51 Mi) e o melhor em C8 (1,34 Mi), definindo o intervalo de variação entre C1–C14. No recorte por portos, as participações consolidadas são: Santarém 39,31%, Barcarena 35,78%, Itaqui 23,30% e Itacoatiara 1,61%. Os painéis inferiores apresentam, para cada cenário, os totais de emissões nas execuções sem e com biodiesel, permitindo a comparação direta com o painel principal.

De acordo com Wang et al. (2024), projetos do PNL2035 análogos aos do C8 (Norte–Sul Açailândia–Barcarena, Ferrogrão, Bioceânica, FIOL e terminais interiores) reconfiguram custos e hinterlândias na Amazônia, favorecendo o Arco Norte (especialmente BAR e STM) sob expansão gradual; com maior expansão, há reequilíbrio entre as costas Norte e Sul e perda de vantagem relativa de ITQ conforme avança a Norte–Sul. Ambientalmente, o principal vetor de impacto de implantação/expansão é indireto (mudança de uso do solo): a infraestrutura altera custos relativos e pode deslocar produção, afetando o balanço de carbono. No agregado, o pacote PNL2035 aponta redução de 30,7 $MtCO_2$ (uso do solo + emissões veiculares), mas os benefícios climáticos são sensíveis às hipóteses de mobilidade dos fatores, restrições de mobilidade reduzem esse ganho.

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a logística de transporte de soja na Amazônia brasileira sob a ótica das emissões de CO_2, comparando 14 cenários que combinam rotas atuais e futuras. Os resultados indicam que a multimodalidade e a introdução de novos projetos logísticos são determinantes para a sustentabilidade do escoamento: a ampliação isolada de capacidade portuária não foi suficiente para reduzir emissões, e a configuração vigente permanece intensiva em carbono, demandando reestruturação da matriz de transporte. Em contraste, a combinação de infraestrutura multimodal com adoção do B15 posiciona os Cenários 8 e 12 como os de melhor desempenho ambiental no conjunto analisado.

No nível operacional, sobressaem as rotas B2+B4 (associada à Ferrogrão) e C3+C4+C6 (trecho da Ferrovia Norte–Sul), bem como a relevância do Porto de Santarém e da ETC de Miritituba como nós estratégicos. Ademais, mesmo sem a implementação ainda das rotas projetadas, a reconfiguração dos fluxos priorizando destinos multimodais — especialmente Barcarena, Itaqui e Santos — já proporciona reduções adicionais de emissões.

Dado o contexto socioambiental sensível da Amazônia, a implantação das obras requer condicionantes proporcionais (passagens de fauna, controle de sedimentos, PGRS/PRAD e compensações) e monitoramento adaptativo (desmatamento, qualidade da água, fauna atropelada, acidentes). Recomenda-se explicitar o estoque

de emissões de obra e estimar o payback de carbono frente às reduções operacionais, apoiado por governança territorial.

O trabalho alinha-se aos ODS 3, 7 e 13, ressalta a integração entre transporte e armazenagem no desenho de corredores e aponta o uso de modelos matemáticos, simulações e IA e *Machine Learning* como instrumentos para apoiar decisões e priorizar investimentos em ativos com maior potencial de mitigação e eficiência operacional.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, FAPEMIG e FAPESPA pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPORT (2025) Associação dos Terminais Portuários e Estações de Transbordo de Cargas da bacia Amazônica. Infraestrutura logística. Disponível em: <http://amport.com.br/infraestrutura/>. (Acesso em 24/06/2025).

Barona, E.; Ramankutty, N.; Hyman, G.; Coomes, O. (2010) The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters,* v. 5, p. 2–10 DOI: 10.1088/1748-9326/5/2/024002

Eloy, L.; Senra, E. B.; Silva, A. L.; Campos, C. (2023) A aceleração recente da produção de soja na Amazônia: uma história do desmonte ambiental "em prática" no estado de Roraima. *Nuevo mundo mundos nuevos,* p. 2–12. https://doi.org/10.4000/nuevomundo.93688

GOOGLE MAPS (2025) Google Maps. Disponível em: https://www.google.com/maps/@-9.8971906,-60.5528489,6z?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D (Acesso em 5/5/2025).

IBGE (2025) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>. Acesso em: 19 jun. 2025.

MAPA (2024) Ministério da Agricultura e Pecuária. Projeções do Agronegócio. Brasil 2023/24 a 2033/34. Projeções de longo prazo. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf . (Acesso em: 31/03/2025).

Mathers, J.; Craft, E.; Norsworthy, M.; Wolfe, C. (2019) *The Green Freight Handbook A Practical Guide for Developing a Sustainable Freight Transportation Strategy for Business.* Environmental Defense Fund. Disponível em: https://netzeroaction.org/app/uploads/2023/07/EDF-Green-Freight-Handbook-1.pdf (Acesso em: 06/06/2025).

MME (2019) Ministério de Minas e Energia. Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização de Biodiesel B15 em motores e veículos. 2019. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/documentos/relatorios-de-aprovacao-do-b15/copy_of_Relatriodeconsolidaodostestese.....pdf (Acesso em 30/05/2025).

ONU BRASI (2025). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. (Acesso em: 29/04/2025).

Plaza, C. V. Guimarães, V. A. Ribeiro, G., B., Laura (2020) Economic and environmental location of logistics integration centers: the Brazilian soybean transportation case. *TOP*, v. 28, p. 749–771. DOI: 10.1007/s11750-020-00566-x

SALIN, D. (2024) *Soybean Transportation Guide. Brazil 2024.* U. S. Departament of Agriculture, Agricultural Marketing Service. Web. http://dx.doi.org/10.9752/TS048.09-2024

SECEX (2025) Secretaria de Comércio. Ministério do desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Comex Stat. Dados Gerais. Disponível em: https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral (Acesso em 29/04/2025)

Silva Jr, C. H. L.; Pessôa, A. C. M.; Carvalho, N. S.; Reis, J. B. C.; Anderosn, L. O.; Aragão, L. E. O. C (2021) The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nat Eco Evol*, 5, 144-145. https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x .

SEEG (2023) Sistema de Estimativas Emissões e Remoções de Gases Efeito Estufa. Observatório do Clima. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021. Observatório do clima. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2021&start_year=1990>. (Acesso em 28/04/2025).

Wang, Zhan, et al. "Planned Expansion of Transportation Infrastructure in Brazil Has Implications for the Pattern of Agricultural Production and Carbon Emissions." Science of the Total Environment, vol. 928, no. 172434, 1 June 2024, pp. 7–13, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172434.

Harlenn dos Santos Lopes (harlenn@ufpa.br) , *Daniel Oliveira Rodrigues* (daniel.rodrigues@abaetetuba.ufpa.br), *Ellyedson Azevedo Cavalheiro* (ellyedson.cavalheiro@abaetetuba.ufpa.br)
UFPA, Faculdade de Engenharia Industrial, Trav. Manoel de Abreu s/n, Mutirão, Abaetetuba-PA, Brasil.
Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br), *Guilherme Santos Lucca* (delucca1717@gmail.com)
UNIFEI, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Rua BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá- MG, Brasil.

POTENCIAL DO USO DO BIOMETANO NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL

Juliana Gomes Martins[1], **Dalton Domingues**[1], **Lorena Mirela Ricci**[1], **Márcio de Almeida D'Agosto**[1],
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro – Programa de Engenharia de Transportes

RESUMO
A descarbonização do transporte rodoviário de cargas é fundamental para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil. O biometano, biocombustível derivado do biogás, surge como alternativa promissora, capaz de reduzir até 90% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) em comparação ao diesel e promover a economia circular. O Brasil possui um elevado potencial de produção de biometano, estimado em 41,4 bilhões de m^3/ano, volume suficiente para substituir parte significativa do consumo de diesel no transporte de cargas. No entanto, desafios como custos de produção, infraestrutura limitada e barreiras regulatórias ainda dificultam a sua ampla adoção. Políticas públicas e incentivos econômicos são essenciais para viabilizar sua competitividade no mercado. Alinhado às metas do Acordo de Paris, o biometano é uma oportunidade estratégica para a transição energética sustentável.

1. INTRODUÇÃO

O avanço das emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) tem provocado impactos significativos nas mudanças climáticas globais. Essas emissões, derivadas principalmente dos setores industriais, de transporte e de energia, intensificaram a urgência de tecnologias sustentáveis para mitigar os efeitos do aquecimento global (IPCC, 2023).

A busca por fontes alternativas de energia, como formas de geração energética com base em recursos renováveis, que não apenas supram a crescente demanda energética global, mas que também contribuam de forma a minimizar as implicações decorrentes das mudanças climáticas, configura-se como uma prioridade estratégica. Nesse cenário, as energias provenientes da biomassa se destacam como uma alternativa promissora, sendo a segunda maior fonte de carbono disponível no planeta, atrás apenas do petróleo (Oliveira, 2022).

A transição energética, por sua vez, representa um compromisso global para a redução do uso de combustíveis fósseis e demais fontes não renováveis na matriz energética. O objetivo central é conter as emissões de GEE por meio da ampliação do uso de energias renováveis, seja para geração de eletricidade, seja como substituição direta dos combustíveis fósseis. Nesse contexto, é necessário que haja um marco regulatório que garanta a segurança jurídica e incentivos para o setor (Merli, 2023).

O setor de transportes, no Brasil, representa 65% do total de consumo de energia, sendo o modo rodoviário responsável por 13% das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO2e) do setor, destacando-se como o principal emissor. Sendo assim, por conta de sua representatividade, esse setor desempenha um papel muito importante para a promoção de estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (Nichi, 2023).

Borges *et al.* (2021) enfatizam a necessidade crescente da implementação de tecnologias alternativas para a redução das emissões no setor de transportes, especialmente porque o sistema de transporte brasileiro é predominantemente rodoviário. Nessas circunstâncias, o biometano surge como uma alternativa viável e sustentável, ocupando posição de destaque por sua capacidade de reduzir a poluição atmosférica e melhorar a qualidade das áreas urbanas (Sinigaglia *et al.*, 2022). No contexto da busca por novas alternativas, o uso do biometano como substituto do diesel no transporte rodoviário pesado surge como uma estratégia completamente alinhada às metas globais de gerar menor impacto negativo ambiental, além dos ganhos sociais e de saúde pública (Cardoso e Mouette, 2023).

Este trabalho tem como finalidade analisar o potencial do biometano como alternativa energética no setor de transporte rodoviário de cargas no Brasil, destacando seus benefícios ambientais e os desafios à sua adoção. Para isso, apresenta-se para estrutura do estudo, na seção seguinte a metodologia adotada, posteriormente, discute-se os principais resultados, e, por fim, são expostas as conclusões e perspectivas futuras.

2. METODOLOGIA

Este estudo adotou a abordagem de uma revisão narrativa da literatura, complementada por uma análise comparativa, com foco na avaliação do potencial de uso do biometano no transporte rodoviário de cargas no Brasil. Para isso, foram consultadas bases de dados científicas como Scopus, Web of Science, Google Scholar e SciELO, além da busca de relatórios institucionais de fontes reconhecidas, como o *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás). Com esse propósito, foram incluídos descritores como "biometano", "transporte rodoviário de cargas", "energia sustentável", "mitigação de emissões" e "biocombustíveis", em português e inglês para realizar a busca.

A seleção dos materiais para realização da pesquisa priorizou publicações feitas entre os anos de 2019 e 2025, com foco na realidade brasileira e aplicações diretas e indiretas no setor de transportes. Os dados encontrados foram analisados de forma comparativa, com foco nos benefícios ambientais gerados, barreiras enfrentadas e possíveis estratégias de implementação em escala nacional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento dos estudos analisados aponta que o biometano tem grande potencial estratégico como alternativa energética para o transporte rodoviário de cargas no Brasil. Gás renovável, proveniente da purificação do biogás, a partir da decomposição anaeróbia de matéria orgânica (Silva e Godoy, 2024), torna-se um importante vetor energético para a descarbonização do setor de transportes, tradicionalmente dependente de combustíveis fósseis e responsável por uma das principais fontes de emissões de GEE no país.

3.1. Potencial de redução de emissões

Os dados levantados na literatura, sintetizados na Tabela 1, validam o biometano como uma possibilidade de combustível com alto desempenho ambiental. Pesquisas como as de CIBiogás (2024) e Borges *et al*. (2021) indicam que seu uso é capaz de reduzir em até 95% das emissões de CO_2, fator que supera o desempenho do gás natural fóssil, no qual sua redução varia de 21 a 25%. Além disso, o biometano consegue eliminar quase toda emissão de material particulado (MP) e reduz significativamente os óxidos de nitrogênio (Ferreira *et al.,* 2019). Bidart *el al*. (2022) apontam que ao longo do ciclo de vida do biometano os impactos positivos estão nas categorias de mudança climática, oxidação fotoquímica, eutrofização e acidificação.

Tabela 1: Estudos selecionados sobre o uso do biometano no transporte rodoviário de cargas no Brasil

Referência	Ano	Benefícios	Desafios	Aplicação no Setor de Transporte	Local do Estudo
Ferreira *et al.*	2019	Redução significativa nas emissões de GEE, NOx, MP e CH_4 ao substituir o diesel por biometano em veículos pesados. Menor impacto ambiental nas categorias de acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e mudança climática. Apoio à descarbonização da matriz energética.	Necessidade de purificação (dessulfurização) e compressão do biogás. Ausência de dados padronizados e dependência de características regionais. Limitações da infraestrutura de distribuição e motores adaptados para maior eficiência.	Aplicação direta. O estudo compara o uso do biometano com diesel e gasolina em veículos leves e pesados. Conclui que o uso em veículos pesados (transporte de cargas) apresenta os melhores resultados ambientais em todas as categorias avaliadas.	Brasil (Campinas-SP)
Borges *et al.*	2021	Redução de até 99% nas emissões de MP10 com a substituição do diesel por GNL. Melhoria na qualidade do ar. Potencial redução de mortes prematuras e custos com saúde pública.	Fatores de emissão dependentes do motor, manutenção e combustível. Falta de dados robustos e incertezas nos modelos.	Aplicação direta. Estudo simula a substituição de 100% da frota de caminhões movidos a diesel por GNL na Av. Marginal Tietê, com base em 273,5 caminhões/dia no trecho analisado.	Brasil (São Paulo)
Balzan	2022	Redução de emissões de CO_2 em até 90%. Alternativa limpa ao diesel. Diversidade de matérias-	Falta de infraestrutura de abastecimento. Alta manutenção. Custo elevado dos veículos. Baixa produção de	Aplicação direta. O estudo aborda especificamente o transporte rodoviário de cargas no Brasil e avalia o uso do	Brasil (ênfase nacional)

Referência	Ano	Benefícios	Desafios	Aplicação no Setor de Transporte	Local do Estudo
		primas. Redução da dependência de combustíveis fósseis. Tecnologias veiculares já disponíveis. Potencial competitivo e ambiental.	veículos adaptados. Poucos postos disponíveis. Tecnologia ainda em fase de desenvolvimento e altos investimentos iniciais necessários.	biometano como alternativa ao diesel, destacando seu potencial para reduzir custos, emissões e aumentar a sustentabilidade do setor.	
Oliveira	2022	Redução das emissões de GEE (CO_2 e CH_4). Valorização de resíduos urbanos. Economia circular. Possível autossuficiência energética local.	Alto custo de implantação de planta. Necessidade de adaptação da frota. Falta de incentivos e regulação específica.	Aplicação direta. Proposta de substituição do diesel por biometano em frotas de caminhões de coleta de lixo no Rio de Janeiro. Modelo baseado em autogeração a partir de RSU.	Brasil (Rio de Janeiro)
Sinigaglia *et al.*	2022	Redução significativa de emissões de GEE. Produção descentralizada a partir de resíduos orgânicos. Compatível com infraestrutura de GNV. Geração de CBIOs via RenovaBio.	Alto custo do processo de purificação (upgrading). Escala produtiva ainda limitada. Viabilidade econômica reduzida para pequenos produtores. Barreiras regulatórias e tributárias.	Aplicação indireta. Estudo aborda o uso do biometano como combustível veicular no Brasil, mas não trata especificamente do transporte rodoviário de cargas nem apresenta dados de frota ou aplicação prática.	Brasil (ênfase nacional)
Cardoso	2023	Redução de até 80% nas emissões de CO_2. Aproveitamento de resíduos orgânicos. Contribuição às metas do Acordo de Paris. Geração de CBios.	Produção incipiente (0,01% da oferta de GN) e oferta limitada de biometano. Infraestrutura de abastecimento insuficiente. Alto custo dos veículos. Falta de escala e incentivos adequados.	Aplicação direta. Cerca de 544 caminhões movidos a GNV/biometano em operação no Brasil, com potencial de expansão no transporte de cargas.	Brasil (ênfase nacional)
Merli	2023	Redução de GEE. Produção descentralizada. Complementaridade ao gás natural. Contribuição às metas climáticas.	Baixa escala de uso no transporte. Barreiras regulatórias. Pouca infraestrutura. Desafios técnicos na purificação e distribuição.	Aplicação indireta. Estudo regulatório e energético. Menciona possibilidade de uso veicular de biometano, mas sem foco específico em transporte rodoviário de cargas ou dados de frota.	Brasil (ênfase nacional)
Silva	2023	Consolidação do biometano como fonte renovável no mercado nacional de gás. Possibilidade de injeção na rede de GN. Estímulo à transição energética. Geração de CBIOs. Desenvolvimento regional e inclusão de pequenos produtores. Redução de impactos ambientais de atividades rurais e urbanas.	Alto custo de purificação em pequenas plantas. Falta de padronização e infraestrutura adequada. Riscos operacionais e barreiras regulatórias. Incerteza jurídica nos estados que ainda não regulamentaram o biometano. Dificuldade de inserção de pequenos produtores e necessidade de políticas públicas mais robustas.	Aplicação indireta. O estudo é focado nas implicações regulatórias e estruturais da Nova Lei do Gás sobre a cadeia de biometano, sem tratar diretamente do uso no transporte rodoviário de cargas.	Brasil (ênfase nacional)

Referência	Ano	Benefícios	Desafios	Aplicação no Setor de Transporte	Local do Estudo
CIBiogás	2024	Redução de até 95% nas emissões de CO_2 em comparação ao diesel. Aproveitamento de resíduos orgânicos. Compatibilidade com veículos GNV. Incentivo à economia circular. Potencial de expansão da produção de 1,6 para 7 milhões m³/dia até 2029.	Necessidade de ampliação da infraestrutura de produção, distribuição e armazenamento. Dependência de políticas públicas e incentivos regulatórios. Baixa adesão de produtores ao RenovaBio (apenas 37% certificados).	Aplicação direta. O estudo aborda especificamente o uso do biometano no transporte, destacando projetos como a Unidade de Produção e Demonstração de Biometano de Itaipu, que abastece veículos da frota de Itaipu e ônibus turísticos.	Brasil (ênfase nacional)

3.2. Aplicações e cenários nacionais

A aplicação do biometano como combustível em veículos pesados já é tecnicamente viável, a partir das tecnologias já amplamente utilizadas e disponíveis no mercado para o GNV (Balzan *et al*., 2022). A Tabela 1 mostrou que um conjunto de estudos trataram sobre aplicações diretas em caminhões, sugerindo que haja substituições por escalas. A Associação Brasileira de Biogás (ABiogás, 2024) projeta que o Brasil tem potencial de produção de até 120 milhões de Nm³/dia, valor este suficiente para suprir até 62% do diesel atualmente consumido no transporte rodoviário.

3.3. Barreiras e desafios estruturais

O cenário é promissor, porém a análise revela desafios críticos que dificultam a expansão do biometano em questões logísticas. O custo de produção é elevado (Machado *et al*., 2024), em grande parte devido à etapa de purificação necessária para garantir a qualidade do combustível. A infraestrutura de distribuição e abastecimento é limitada (Pomar, 2023) a injeção na rede de gasodutos é viável, entretanto na maior parte do território, a alternativa é a compressão descentralizada, que encarece a cadeia. Além disso, persistem barreiras regulatórias, marcadas pela ausência de políticas públicas específicas e a fragmentação de normas federais, sob responsabilidade da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e estaduais, ligadas à distribuição, gerando insegurança jurídica. Embora a Lei do Combustível do Futuro represente avanço ao elaborar instrumentos, como os Certificados de Origem do Biometano, os estudos indicam que o principal gargalo não está na viabilidade técnica, mas na falta de condições estruturantes.

3.4. Viabilidade setorial e estratégias de consolidação

O Brasil dispõe de uma matriz energética favorável à adoção de combustíveis de baixa emissão, com representação de 47,4% de sua energia e 88% de sua eletricidade proveniente de fontes renováveis (EPE, 2023). Esse cenário demonstra que o país tem vantagens no processo de transição energética. Além disso, segundo a ABiogás (2024) o país possui variadas disponibilidades de biomassa e projeções concretas de crescimento com capacidade produtiva nacional de crescimento de 351% entre 2025 e 2032, passando de 1,77 milhões para 8,0 milhões de metros cúbicos por dia.

4. CONCLUSÃO

A transição energética e tecnológica do setor de transporte rodoviário de cargas para um modelo sustentável é uma necessidade urgente diante dos desafios climáticos globais. Nesse contexto, além do biometano representar uma solução estratégica para descarbonizar o setor, ele também alia benefícios sociais, ambientais e econômicos. Sua produção originada de resíduos orgânicos contribui para a economia circular e reduz significativamente as emissões de poluentes atmosféricos e GEE.

O Brasil, com sua abundante oferta de biomassa e elevado potencial de produção de biometano, se encontra em uma condição privilegiada para liderar essa transição. No entanto, para que essa alternativa se consolide em larga escala, é fundamental superar os desafios estruturais, como as limitações de abastecimento e infraestrutura, os custos de produção. Assim, políticas públicas robustas, segurança judiciária para investimentos privados e incentivos fiscais serão fatores determinantes para viabilizar a competitividade do biometano frente aos combustíveis fósseis.

O papel do biometano na matriz energética de transporte, diante do compromisso internacional do Brasil com a redução de emissões de GEE, representa uma estratégia fundamental para o cumprimento das metas

condicionais do Acordo de Paris e do Programa RenovaBio. Projeções indicam que, o biometano poderá substituir uma parcela expressiva do diesel consumido no país, com o suporte adequado. Portanto, com atuação em conjunto entre governo, setor privado e academia, o biometano é capaz de se consolidar como solução eficaz para um transporte rodoviário de carga mais limpo e sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abiogás (2024) *Mapeamento de plantas de biometano até 2032*. São Paulo: Abiogás. Disponível em: https://www.abiogas.org.br (acesso em 04/04/2025)

Balzan, P. Z. (2022) *Transporte rodoviário de cargas: vantagens e desvantagens no uso de combustíveis renováveis*. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Logística). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Bento Gonçalves. Disponível em: https://dspace.ifrs.edu.br/xmlui/handle/123456789/1439 (acesso em 04/04/2025)

Bidart, C.; M. Wichert; G. Kolb e M. Held (2022) *Biogas catalytic methanation for biomethane production as fuel in freight transport – A carbon footprint assessment*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 168, p. 112802. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112802

Borges, R. R.; A. C. R. Teixeira; D. Mouette e F. N. D. Ribeiro (2021) *Modelagem da dispersão atmosférica de material particulado (MP10) e os impactos da utilização de veículos de carga movidos a GNL em São Paulo*. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 41, p. e185828–e185828. DOI: https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.185828

Cardoso, M. e D. Mouette (2023) *Transporte pesado do Brasil movido a gás natural veicular de origem fóssil e renovável*. In *Anais do XLVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (Santos, SP). Rio de Janeiro: ANPET. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/transporte-pesado-do-brasil-movido-a-gas-natural-veicular-de-origem-fossil-e-ren (acesso em 04/04/2025)

CIBiogás (2024) *Biometano é o caminho para a descarbonização para o setor de transportes*. Disponível em: https://cibiogas.org/blog/biometano-e-o-caminho-para-a-descarbonizacao-para-o-setor-de-transportes/ (acesso em 04/04/2025)

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2023) *Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 274 p.

Ferreira, S. F.; L. S. Buller; M. Berni e T. Forster-Carneiro (2019) *Environmental impact assessment of end-uses of biomethane*. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 613–621. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.034

IPCC (2023) *Summary for Policymakers*. In: H. Lee e J. Romero (eds.) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, p. 1–34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.00

Machado, M. V. S.; I. Ávila e J. A. Carvalho Jr. (2024) *Bibliometric analysis of renewable natural gas (biomethane) and overview of application in Brazil*. *Energies*, v. 17, n. 12, p. 2920. DOI: https://doi.org/10.3390/en17122920

Merli, I. M. (2023) *O biogás e o biometano como aceleradores da transição energética e sua importância para o atendimento das NDCs brasileiras no Acordo de Paris*. Monografia (Bacharelado em Direito). Faculdade Nacional de Direito, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Nichi, J. (2023) *O desafio da mobilidade sustentável em cidades inteligentes: o caso da cidade de São Paulo*. In *Smart Cities e Smart Factory: insights sobre tendências e padrões*. São Paulo: Editora Científica, p. 87–106. DOI: https://doi.org/10.37885/230814205

Oliveira, F. D. (2022) *Análise de viabilidade do uso de biogás nas frotas de caminhões de coleta de lixo urbano no Rio de Janeiro*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Pomar, P. B. (2023) *Evaluación medioambiental de la obtención del biogás-biometano por digestión anaerobia de residuos mediante el análisis del ciclo de vida y su uso en el transporte*. Dissertação (mestrado). Máster Universitario en Ingeniería Ambiental, Universitat Politècnica de València. València.

Silva, M. J. P. e E. Godoy Jr. (2024) *Efeitos da Nova Lei do Gás sobre a cadeia de biometano*. *Revista de Política Agrícola*, v. 32, n. 4, p. 44–52

Sinigaglia, T.; T. E. Freitag; A. Machado; V. B. Pedrozo; F. F. Rovai; R. T. G. Guilherme; T. D. M. Lanzanova; M. D. Nora e M. E. S. Martins (2022) *Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil*. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 24, p. 12074–12095. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.234

Juliana Gomes Martins (juliana.gomes@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Programa de Engenharia de Transporte, Av. Horácio Macedo, 2030, Bloco H - Sala 117, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

PREVISÃO DAS EMISSÕES DE CO_2 NO TRANSPORTE DE SOJA BRASILEIRA PARA EXPORTAÇÃO: APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS

Patrícia Regina da Silva Zaluski, Liandra dos Santos Jesus, Gisele de Lorena Diniz Chaves
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
O objetivo deste estudo é estimar as emissões de carbono equivalente (CO_2 eq) provenientes do transporte de soja para exportação no Brasil entre 2025 e 2035. Para isso, foram aplicados os modelos preditivos Holt-Winters e Modelo de Média Móvel Integrada Autorregressiva Sazonal (SARIMA, *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average*) a séries históricas mensais de exportação (2014–2024), abrangendo 35 rotas principais e três modais de transporte: rodoviário, ferroviário e hidroviário. Os resultados apontam para o modo rodoviário permanecendo como principal responsável pelo crescimento contínuo das emissões. O modelo SARIMA apresentou maior precisão, enquanto o Holt-Winters mostrou maior aderência aos dados reais. O estudo destaca a necessidade de diversificação da matriz de transporte e investimentos em modais mais sustentáveis, como ferrovias e hidrovias, para mitigar as emissões e fortalecer a competitividade do agronegócio brasileiro.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como um dos maiores exportadores mundiais de soja, impulsionado pela alta produtividade e demanda global crescente (USDA, 2023). As exportações de soja apresentam comportamento sazonal bem definido, conhecido como ciclo de commodity, com pico concentrado entre abril e junho, coincidindo com o período de colheita, e posterior diminuição ao longo do ciclo anual. A matriz logística brasileira para transporte de grãos é predominantemente rodoviária, resultado da falta de investimentos em malha ferroviária e infraestrutura adequada em regiões estratégicas. Durante a safra, o custo do frete rodoviário pode superar 30% do valor do grão, comprometendo significativamente a competitividade dos produtores (IMEA, 2017).

Do ponto de vista ambiental, a dependência do modo rodoviário intensifica as emissões de CO_2, comprometendo a adoção de rotas mais sustentáveis e a competitividade brasileira no cenário internacional. As rotas eco-eficientes, que buscam conciliar custos logísticos com redução de emissões, enfrentam obstáculos significativos como infraestrutura intermodal deficiente, localização inadequada de pontos de transbordo e altos custos operacionais (Zaluski, 2018). Essa problemática ganha maior relevância considerando os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris, que prevê redução de 37% das emissões até 2025 e 43% até 2030 (Gurgel *et al.*, 2019), metas ainda não alcançadas segundo dados do SEEG (2024).

O objetivo deste artigo é estimar as emissões de CO_2 derivadas do transporte de soja destinado à exportação nos próximos anos, considerando aspectos de sazonalidade através da análise de séries históricas de exportação, aplicando os modelos preditivos SARIMA e Holt-Winters devido à sua comprovada capacidade de capturar padrões sazonais e tendências em séries históricas. O modelo Holt-Winters utiliza suavização exponencial considerando componentes de nível, tendência e sazonalidade, sendo eficaz em previsões de longo prazo para dados com flutuações regulares influenciadas por eventos cíclicos. Este modelo possui duas variações - aditiva e multiplicativa - escolhidas conforme a natureza do componente sazonal, onde o método aditivo é indicado quando as variações sazonais são aproximadamente constantes, enquanto o multiplicativo é apropriado quando as mudanças são proporcionais ao nível da série temporal (Kumar *et al.*, 2024).

O modelo SARIMA (Modelo de Média Móvel Integrada Autorregressiva Sazonal) representa uma extensão do método clássico ARIMA, que captura dependências, estrutura de tendência e efeitos sazonais com maior precisão em séries temporais. Embora demande mais parâmetros para fazer previsões comparado ao modelo ARIMA convencional, o SARIMA se destaca por sua capacidade de modelar padrões complexos, assumindo estabilidade de padrões sazonais ao longo do tempo. O modelo utiliza operadores autorregressivos (AR) e de média móvel (MA) tanto para componentes regulares quanto sazonais, permitindo capturar dependências de curto e longo prazo nos dados (Xian *et al.*, 2023).

Espera-se que as estimativas resultantes poderão orientar a avaliação do impacto de medidas destinadas a minimizar essas emissões e subsidiar políticas públicas para descarbonização do setor de transporte de

commodities agrícolas.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo consiste em uma abordagem sequencial dividida em cinco etapas principais demonstradas na Figura 1, para estimar as emissões de CO_2 eq das exportações de soja brasileira. Nesse contexto, para capturar adequadamente os padrões sazonais e as tendências históricas das exportações, foram selecionados dois modelos preditivos Holt-Winters (Kumar *et. al* 2024) e o SARIMA (Box *et al.* 2015).

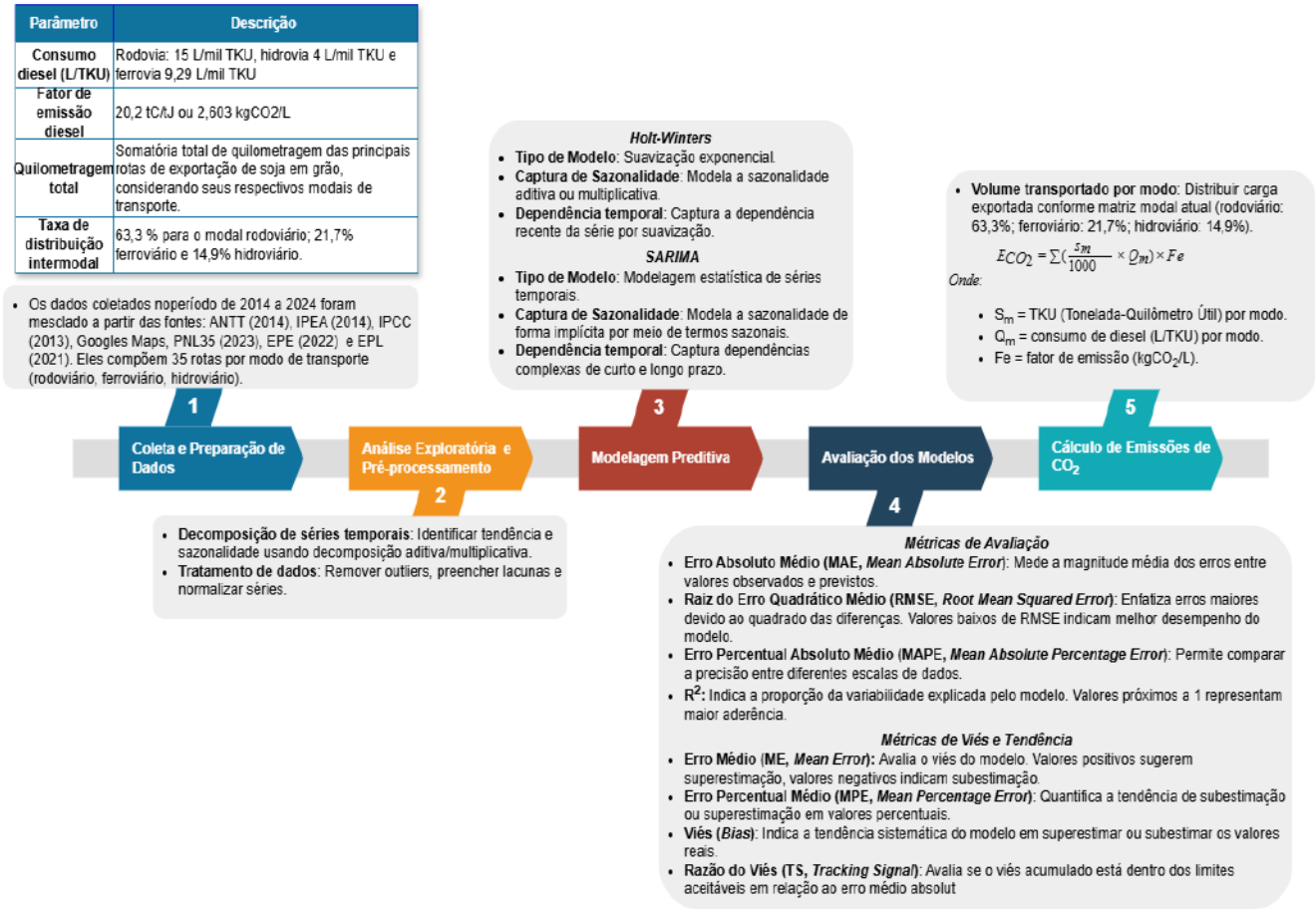


Figura 1: Processo metodológico da pesquisa

O modelo Holt-Winters foi configurado com base nos resultados da decomposição, utilizando sazonalidade multiplicativa e tendência aditiva, adequados para séries onde as variações sazonais são proporcionais ao nível da série. Os parâmetros de suavização (α, β, γ) foram otimizados através de técnicas de validação cruzada. Já, os parâmetros do SARIMA foram identificados por meio da análise das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF). Para avaliar a performance e aderência dos modelos preditivos, foram empregues oito métricas estatísticas. As métricas de precisão incluíram o Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE) e Coeficiente de Determinação (R^2). Adicionalmente, foram calculadas métricas de viés, incluindo Erro Médio (ME), Erro Percentual Médio (MPE), Viés absoluto e Razão do Viés (*Tracking Signal*), seguindo as metodologias propostas por Chopra e Meindl (2016).

O estudo contemplou 35 rotas origem-destino das principais regiões exportadoras de grãos do Brasil, resultando em 88 alternativas de escoamento distribuídas entre os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. As distâncias percorridas pelos modais ferroviário e hidroviário foram calculadas utilizando o banco de dados georreferenciado do Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT) de 2010, processado através do software QGIS para garantir precisão nas medições considerando variações topográficas. As distâncias rodoviárias foram obtidas através do Google Maps, proporcionando dados atualizados sobre as rotas disponíveis.

Por fim, as emissões de CO_2 foram calculadas aplicando-se a metodologia recomendada pelo IPCC (2013), ANTT (2014) e MCTIC (2010), conforme a equação apresentada na etapa 5 da Figura 1. Ademais, utilizou-se linguagem Python por meio do ambiente Jupyter Notebook para tratamento estatístico dos dados.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos através da aplicação dos modelos preditivos Holt-Winters e SARIMA para estimar as emissões de CO_2 eq no transporte de soja destinada à exportação no Brasil. A análise compreende a execução dos modelos preditivos, a comparação de seu desempenho e a estimativa das emissões futuras baseadas nas projeções de exportação.

A decomposição da série temporal de exportações de soja revelou uma tendência crescente consistente ao longo do período analisado e um padrão sazonal bem definido, com picos anuais concentrados entre os meses de abril a junho, coincidindo com o período de colheita. Os componentes extraídos indicaram que a tendência apresenta crescimento relativamente suave, sugerindo adequação para modelagem aditiva. Em contrapartida, o padrão sazonal apresenta variações proporcionais ao nível da série, justificando a adoção do modelo multiplicativo para este componente. Consequentemente, a configuração mais apropriada para o modelo Holt-Winters foi definida como sazonalidade multiplicativa e tendência aditiva. Assim, a Figura 2 apresenta o modelo Holt-Winters.

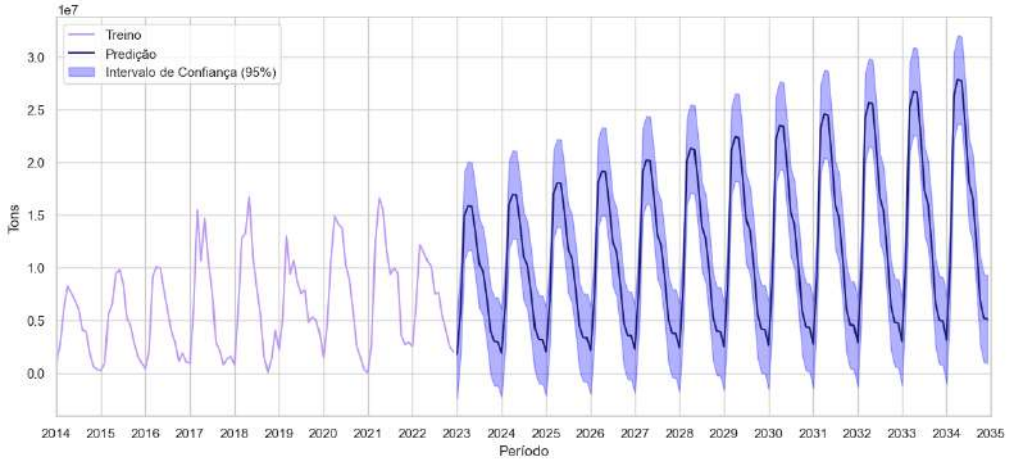


Figura 2: Predição Holt-Winters para um intervalo de confiança de 95%

A implementação do modelo SARIMA iniciou-se com a verificação da estacionariedade da série temporal. Como esperado para séries com sazonalidade, foi necessária a diferenciação de primeira ordem para tornar os dados adequados à modelagem SARIMA. A análise das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) orientou a identificação dos parâmetros do modelo. Os resultados indicaram: ordem autorregressiva (p) = 2: baseada na significância das primeiras duas defasagens no PACF; ordem de média móvel (q) = 1: determinada pela autocorrelação significativa na defasagem 1; e sazonalidade (s) = 12: correspondente ao ciclo anual de exportações. Com isso, a Figura 3 apresenta o resultado do modelo SARIMA utilizando os parâmetros identificados.

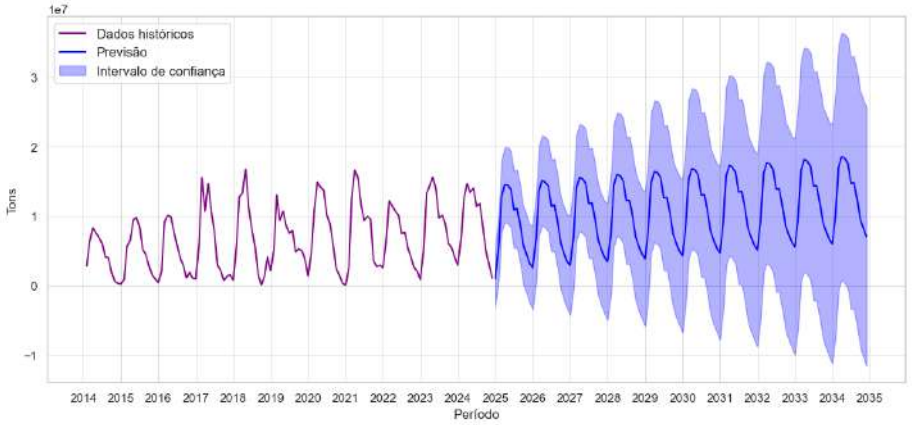


Figura 3: Predição SARIMA para um intervalo de confiança de 95%

A partir disso, a comparação entre os modelos é apresentada na Tabela 1, que contém as métricas de desempenho.

Tabela 1: Resultados das métricas de desempenho

Modelo	MAPE	ME	MAE	MPE	RMSE	R^2	Viés	Razão do viés
Holt-Winters	0,2716	205.628,5	1.28E+06	**0,0966**	1.58E+06	**0,959**	4935084,73	3,86
SARIMA	**0,2022**	**173,697**	**1,01E+06**	0,1101	**1,13E+06**	0,932	**3473,94**	**0,0034**

O modelo SARIMA demonstrou maior precisão preditiva quando avaliado por meio das principais métricas estatísticas de erro. Este modelo apresentou valores superiores em MAPE, MAE e RMSE, configurando-se como uma opção mais confiável para estimativas futuras. Adicionalmente, o modelo mostrou-se mais equilibrado e consistente, exibindo menor viés sistemático nas previsões em comparação ao método concorrente. Por outro lado, o modelo Holt-Winters destacou-se pela maior aderência aos dados históricos, evidenciada pelo coeficiente de determinação (R^2) mais elevado. Esta característica torna o modelo particularmente eficaz para séries temporais que apresentam padrões sazonais e tendências bem definidas. Outro ponto forte foi o desempenho no MPE, no qual apresentou valores próximos a zero, indicando ausência significativa de viés direcional nas previsões.

A análise comparativa demonstra a superioridade estatística do modelo SARIMA, que apresentou razão de viés excepcionalmente baixa (0,0034) em relação aos dados observados e menor distorção sistemática nas estimativas. O modelo SARIMA destacou-se especialmente na reprodução precisa dos padrões sazonais da série histórica analisada. A partir disso, com base nas previsões de volume exportado, foram estimadas as emissões de CO_2 para o período 2025-2035, considerando a distribuição atual do modo de transporte. Desse modo, a Tabela 2, apresenta o acumulado do valor absoluto das emissões de carbono projetadas.

Tabela 2: Total de emissões de CO_2 acumuladas por modelo preditivo

Modelo	Rodovia	Ferrovia	Hidrovia	Total
Holt-Winters	1,8 trilhões	320 bilhões	15,5 bilhões	2,13 trilhões
SARIMA	1,55 trilhões	277 bilhões	13,4 bilhões	1,84 trilhões

Com isso, ambos os modelos sugerem um crescimento das emissões e apresentam o rodoviário como modo de transporte predominante e responsável pela maior parcela das emissões.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo do estudo foi alcançado ao estimar, por meio dos modelos preditivos Holt-Winters e SARIMA, as emissões de CO_2 associadas ao transporte de soja para exportação no Brasil no período de 2025 a 2035. Ambos os modelos indicaram tendência de crescimento contínuo das emissões, refletindo o aumento projetado da produção e da demanda internacional. O modelo SARIMA destacou-se por sua superioridade em precisão de previsão e menor viés (MAPE de 20,22% e razão

do viés de 0,0034), sendo mais equilibrado em suas previsões em comparação com o Holt-Winters.

A análise de distribuição dos modos de transportes demonstra que o rodoviário é o principal responsável pelas emissões de carbono da soja de exportação. No período de 2025-2035, o modo rodoviário foi projetado para contribuir com 1,8 trilhões de CO_2 (Holt-Winters) e 1,55 trilhões de CO_2 (SARIMA) das emissões totais acumuladas. Embora os modos ferroviário e hidroviário tenham demonstrado potencial para redução de emissões, a predominância do transporte rodoviário ainda impõe desafios significativos para a mitigação de gases de efeito estufa, principalmente devido à falta de investimentos em malha ferroviária e infraestrutura adequada, além dos altos custos operacionais (Faria *et al*., 2024).

Uma limitação importante deste estudo reside na escolha do combustível para a análise, pois as emissões foram estimadas considerando apenas o diesel como principal fonte de energia utilizada na matriz logística. Para trabalhos futuros, recomenda-se: a validação dos modelos preditivos quando os dados reais referentes a 2025 forem disponibilizados pelas fontes oficiais; aprofundar a análise com a substituição gradual do diesel por fontes renováveis, como biodiesel ou a eletrificação de veículos; e a inclusão de novos métodos preditivos, como redes neurais recorrentes ou modelos híbridos que combinam estatística clássica com aprendizado de máquina, para avaliar a robustez das previsões e capturar padrões mais complexos nas séries temporais.

Este estudo contribui para a compreensão dos impactos ambientais do transporte de commodities agrícolas no Brasil, ao quantificar as emissões de CO_2 e projetar cenários futuros. A pesquisa destaca a importância de políticas públicas e incentivos à descarbonização do setor e a necessidade de diversificação da matriz de transporte, impulsionando a descarbonização e garantindo a competitividade do agronegócio brasileiro no cenário internacional.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Processo 312382/2021-9).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT (2014) Acompanhamento Das Concessões Ferroviárias – Relatório Anual 2013. Brasília, 2014.
Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time series analysis: Forecasting and control (5th ed.). Wiley.
Chopra, S; Meindl, P. (2016) Supply chain management. Strategy, Planning, and operation. (Global edition) Pearson.
EPE (2022). Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 - Demanda Energética do Setor de Transportes.
EPL e IEMA (2021). Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e poluentes locais. Acordo de Cooperação Técnica – EPL e IEMA.
Faria, C. H. F., Almeida, J. F. F. e Pinto, L. R. (2024) Simulation-Optimisation Approach for Sustainable Planning of Intermodal Logistics in the Brazilian Grain Export Industry. *Decision Analytics Journal*, Volume 10, 2024, 100388
Gurgel, A.C., Paltsev , S. e Breviglieri, G.V. (2019). The Impacts of The Brazilian Ndc and Their Contribution to The Paris Agreement on Climate Change. *Energy And Development Economics*, 1-18.
IMEA (2017). Entendendo O Mercado Da Soja, Workshop Jornalismo Agropecuário. 2017.
IPCC (2013) IPCC Factsheet: What Is the IPCC? International Panel on Climate.
Kumar, L., Khedlekar, S. e Khedlekar, U. K. (2024). A comparative assessment of Holt-Winter exponential smoothing and autoregressive integrated moving average for inventory optimization in supply chains. *Supply Chain Analytics*, 8, 100084.
MCTIC (2010). Segundo Inventário Brasileiro De Emissões Antrópicas De Gases De Efeito Estufa. Relatórios De Referência. Emissões De Gases De Efeito Estufa Por Queima De Combustíveis: Abordagem Bottom-Up. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 62p. Brasília, 2010.
SEEG (2024). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil.
USDA (2023) USDA Agricultural Projections To 2031. U.S. Department of Agriculture.
Xian, X., Wang, L., Wu, X; Tang, X., Zhai, X., Yu, R., Qu, L. e Ye, M. (2023). Comparison of SARIMA model, Holt-winters model and ETS model in predicting the incidence of foodborne disease. *BMC Infectious Diseases* 23, 803.
Zaluski, P. R.S. (2018) Análise do transporte intermodal da soja destinada à exportação, considerando os custos de emissões de CO2 no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás PUC GO.

Patrícia Regina da Silva Zaluski (przaluski@gmail.com);
Liandra dos Santos Jesus (liandrasj@gmail.com);
Gisele de Lorena Diniz Chaves (gisele.chaves@ufsc.br).

QUAL A INFLUÊNCIA DOS DEFEITOS DOS PAVIMENTOS NAS EMISSÕES VEICULARES? UMA REVISÃO DA LITERATURA

Victor Cardoso Oliveira, Bruno Vieira Bertoncini, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN).

RESUMO
Este artigo tem o objetivo de revisar a literatura sobre a influência dos defeitos nos pavimentos urbanos nas emissões veiculares. A qualidade do pavimento, incluindo aspectos como rugosidade, defeitos localizados e tipo de superfície, tem um impacto significativo nas emissões de poluentes atmosféricos. Estudos indicam que pavimentos irregulares, avaliados pelo Índice de Rugosidade Internacional (IRI), estão positivamente correlacionados com o aumento nas emissões de CO_2, NO_x e material particulado (PM do inglês, Particulate Matter), devido ao aumento da resistência ao rolamento. Além disso, pavimentos permeáveis têm mostrado potencial para reduzir as concentrações de poluentes na superfície dos pavimentos. Os modelos de simulação, como o MOVES e o HDM-4, são amplamente utilizados para prever as emissões com base nas condições dos pavimentos, porém a sua aplicação em climas tropicais ainda exige ajustes. A revisão destaca as lacunas na literatura, especialmente em relação aos defeitos localizados, e fornece sugestões para trabalhos futuros.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transportes é um dos principais responsáveis pela emissão de poluentes atmosféricos, contribuindo significativamente para a deterioração da qualidade do ar e para o aumento das concentrações de Gases do Efeito Estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO_2) (Nicolau *et al*., 2018). Além dos veículos e do combustível utilizado, a infraestrutura rodoviária também desempenha papel importante na geração de poluentes. Nesse contexto, a qualidade do pavimento das vias urbanas é um fator que pode influenciar diretamente o desempenho dos veículos, afetando suas emissões de poluentes. Pavimentos irregulares ou com presença de defeitos, aumentam o atrito entre os pneus e a superfície, resultando em maior resistência ao rolamento, consumo de combustível e, consequentemente, emissões de gases poluentes (Fontaras *et al*., 2017).

Diversos estudos indicam que as condições de superfície dos pavimentos afetam as emissões de poluentes de diferentes formas (Kalembo *et al*., 2012; Azevedo *et al*., 2021). A irregularidade do pavimento, medida por índices como o Índice de Rugosidade Internacional (IRI), pode gerar variações no consumo de combustível e nas emissões de CO_2 e NO_X. No entanto, a literatura ainda apresenta lacunas quanto ao entendimento completo dessa relação, especialmente no que se refere a presença de defeitos específicos nos pavimentos urbanos e seu impacto nas emissões veiculares.

Este artigo tem como objetivo revisar a literatura sobre a influência dos defeitos nos pavimentos nas emissões veiculares, explorando as principais descobertas científicas e os métodos utilizados para avaliar essa interação. Além disso, busca-se identificar as lacunas de pesquisa e sugerir direções para estudos futuros que possam contribuir para a melhoria da infraestrutura de transportes urbana, com vistas à redução das emissões de poluentes.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a revisão da literatura focou na análise dos estudos disponíveis sobre a relação entre os defeitos dos pavimentos e as emissões veiculares. A premissa foi identificar e sintetizar as principais descobertas relacionadas ao impacto das condições de pavimento nas emissões de poluentes atmosféricos oriundos de fontes móveis, além de avaliar a adequação dos métodos de medição e modelos utilizados nos estudos. A metodologia pode ser dividida em 3 etapas.

2.1. Busca e seleção dos trabalhos

A seleção dos estudos foi baseada em critérios específicos, sendo priorizados artigos que apresentassem medições diretas de emissões de poluentes veiculares em relação às condições de pavimento. A busca foi realizada em bases de dados como: *Google Scholar, Scopus e Web of Science*, utilizando palavras-chave como "*pavement defects*," "*vehicle emissions*," "*road roughness*," "*International Roughness Index (IRI)”*.

Nesta etapa foram selecionados trabalhos que apresentassem medições de emissões de CO_2, NO_x, PM e outros gases poluentes emitidos pelos veículos ou simulações em *software*. Além disso, somente foram analisados trabalhos que investigaram os pavimentos com relação a defeitos (trincas, buracos/panelas, afundamentos),

irregularidade (IRI) ou parâmetros de aderência (macrotextura, microtextura, atrito).

Foram excluídos trabalhos que apresentaram dados sobre consumo de combustível, sem dados diretos de emissões, em função das características dos pavimentos. O intuito foi investigar a relação do pavimento com as emissões de poluentes veiculares.

2.2. Análise e extração dos dados

A análise dos estudos selecionados foi realizada de forma qualitativa e quantitativa. Para cada estudo, foram extraídos dados sobre os seguintes aspectos:

- Localização e características do estudo: detalhes sobre a localização geográfica do estudo, características das vias analisadas (por exemplo, tipo de pavimento, área urbana ou rural);
- Métodos de medição de emissões: tecnologias utilizadas para medir as emissões veiculares, como o Sistema de Medição de Emissões Portátil (PEMS, do inglês *Portable Emissions Measurement System*) ou modelos de simulação como o MOVES e o HDM-4;
- Emissões de gases e particulado: tipos de emissões de analisadas, incluindo CO_2, NO_x e PM;
- Características e parâmetros dos pavimentos: tipo de pavimento, condições funcionais do pavimento, defeitos, afundamento, IRI, macrotextura, entre outros;
- Resultados e conclusões: principais achados dos estudos, como a correlação entre incidência/tipo defeitos de pavimento e aumento nas emissões de gases poluentes.

2.3. Síntese dos resultados encontrados

Após a coleta dos dados, foi realizada uma síntese qualitativa para identificar as tendências gerais, tais como as condições de pavimento que mais influenciam as emissões e os tipos de emissões mais afetados. Além disso, foi feita uma comparação entre os resultados dos métodos utilizados, destacando os mais eficazes e as limitações encontradas nos estudos. A análise também incluiu uma avaliação das lacunas existentes na literatura, apontando áreas que ainda precisam de maior investimento científico como o impacto de defeitos localizados, as condições específicas de pavimentos em climas tropicais ou a análise de pavimentos localizados em centros urbanos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos estudos analisados, foram identificados padrões entre as condições dos pavimentos urbanos e as emissões veiculares. A seguir, são apresentados os principais trabalhos/contribuições obtidos a partir das premissas utilizadas.

Tabela 1: Principais aspectos dos artigos selecionados

Estudo	Localização	Parâmetro	Métodos de Medição	Tipo de Emissões	Principais Resultados
Liu *et al.* (2012)	Taiwan	Pavimento permeável	Não especificado	CO_2, PM	Redução de 40-87% as emissões de poluentes superfície
Kalembo *et al.* (2012)	Baltimore, EUA	Rugosidade do pavimento	PEMS, IRI (App)	CO_2, NO_x, PM	Emissões aumentam com o aumento da rugosidade
Li *et al.* (2015)	Texas, EUA	IRI (0-6 m/km)	PEMS, IRI (App)	CO_2, NO_x	Aumento das emissões com o aumento do IRI
Akbarian (2015)	Califórnia, EUA	Pavimento com defeitos	Configuração experimental, modelo de viga viscoelástica	Não especificado	Aumento das emissões com incidência de defeitos no pavimento
Perrotta *et al.* (2017)	Inglaterra, M18	Macrotextura e até mesmo pavimento	Sensores, MOVES	CO_2, NO_x, PM	Impacto de até 5% nas emissões devido à macrotextura
Qiao *et al.* (2020)	Texas, EUA	IRI moderado	PEMS, IRI (App)	CO_2, NO_x	Condições moderadas de rugosidade associadas a menor consumo de combustível
Azevedo *et al.* (2021)	Ceará, Brasil	IRI, textura de superfície	SmartIRI (App), HDM-4	CO_2, NO_x	Correlação positiva entre IRI e CO_2
Plati *et al.* (2022)	Não especificado	IRI (0,60-3,50 m/km)	*Laser*, MOVES	CO_2, NO_x	Correlação entre IRI e velocidade do veículo, aumento das emissões

A revisão da literatura revelou que a incidência de defeitos nos pavimentos urbanos tem impacto significativo nas emissões veiculares, sendo a relação entre a qualidade do pavimento e a intensidade das emissões um tema central de diversos estudos. Em particular, as condições de rugosidade e defeitos (tais como: buracos e irregularidade) são fatores determinantes que influenciam, diretamente, o comportamento do condutor e o desempenho dos veículos, afetando a resistência ao rolamento e, consequentemente, o consumo de combustível e as emissões de gases poluentes. A literatura sugere que pavimentos com maior nível de irregularidade, medida através do IRI por exemplo, resulta em aumento substancial das emissões, especialmente de CO_2 e NO_x (Plati *et al*., 2022). No entanto, a variação dos impactos das diferentes condições de pavimento no nível de emissões geradas sugere que a relação entre a rugosidade do pavimento e as emissões não é linear, como indicado por estudos como o de Qiao *et al.* (2020).

Além disso, as diferentes tipologias de pavimentos, como os permeáveis, mostram um potencial significativo para reduzir as concentrações de poluentes no ar próximo ao solo, pois esses pavimentos podem ajudar a reduzir as concentrações de poluentes perto da superfície (“dissipar os poluentes”) o que pode melhorar a qualidade do ar em áreas urbanas. Estudos como o de Liu *et al.* (2012) demonstram que pavimentos permeáveis podem atenuar significativamente as concentrações de poluentes, sendo uma alternativa viável para áreas urbanas mais sustentáveis. Entretanto, embora os pavimentos permeáveis apresentem resultados promissores, sua implementação em larga escala, especialmente em climas tropicais, ainda precisa ser mais bem estudada. Além disso, deve-se considerar o risco de colmatação, o que pode comprometer sua eficiência hidráulica e, consequentemente, reduzir os benefícios associados à melhoria da qualidade do ar.

Outra questão relevante levantada pelos estudos revisados diz respeito aos modelos de previsão de emissões, como o MOVES e o HDM-4. Embora esses modelos sejam amplamente utilizados para prever as emissões veiculares, há limitações em suas aplicações a contextos urbanos específicos, como em regiões tropicais. A alta variabilidade climática e a rápida degradação dos pavimentos podem influenciar os resultados oriundos desses modelos, sugerindo que ajustes locais ou a criação de novos modelos específicos para essas condições poderiam melhorar a precisão das previsões de emissões (Plati *et al*., 2022; Azevedo *et al*., 2021).

A literatura também aponta para uma falta de estudos empíricos focados nos defeitos específicos presentes em pavimentos urbanos, como buracos, trincas e variações de textura (Kalembo *et al*., 2012; Azevedo *et al*., 2021). Uma parte dos estudos revisados se concentrou na rugosidade geral do pavimento e no impacto do IRI, mas nenhum estudo investigou como defeitos isolados afetam as emissões de forma específica (Plati *et al*., 2022; Perrotta *et al*., 2017). Este é um ponto crítico que precisa ser mais bem explorado, uma vez que, no contexto urbano, os pavimentos frequentemente apresentam falhas localizadas que podem ter um efeito desproporcional nas emissões veiculares.

A interação entre pavimentos e veículos é complexa, fatores como o tipo de veículo, o padrão de condução e as condições ambientais também devem ser considerados para uma avaliação mais precisa das emissões. Estudos como o de Kalembo *et al.* (2012) e Azevedo *et al.* (2021) indicam que a redução da velocidade dos veículos, devido à má condição dos pavimentos, resulta em aumento nas emissões. Este fenômeno, conhecido como "*stop and go*", ocorre quando os veículos desaceleram e aceleram constantemente devido a irregularidades na via, resultando em combustão incompleta e maior consumo de combustível.

Além disso, os modelos de previsão de emissões existentes, como o MOVES, baseiam-se em dados de condições de tráfego e pavimento, mas a calibração desses modelos para refletir as condições locais de pavimentos urbanos tropicais ainda é uma área em desenvolvimento (Azevedo *et al*., 2021; Qiao *et al*., 2020). A adaptação dos modelos para considerar as especificidades locais pode oferecer uma ferramenta mais acurada para a análise das emissões.

4. CONCLUSÃO

A análise da literatura sobre a influência dos defeitos dos pavimentos nas emissões veiculares revela que a qualidade do pavimento desempenha papel importante na determinação das emissões de poluentes, especialmente em áreas urbanas com tráfego intenso. Os pavimentos irregulares, com defeitos como buracos, trincas e alta rugosidade, aumentam a resistência ao rolamento, o que resulta em maior consumo de

combustível e emissões mais elevadas de CO_2 e NO_x. Contudo, há evidências que sugerem que pavimentos com rugosidade moderada podem ser mais eficientes em termos de emissões, indicando que a relação entre a qualidade do pavimento e as emissões é multifacetada e depende de vários fatores.

Estudos sobre pavimentos permeáveis indicam que esses podem ser uma solução eficaz para reduzir as concentrações de poluentes atmosféricos nas áreas urbanas. No entanto, a aplicabilidade desses pavimentos em diferentes contextos climáticos e urbanos, como em cidades tropicais, ainda necessita de mais investigação. Além disso, os modelos de previsão de emissões, como o MOVES e o HDM-4, são ferramentas valiosas, mas sua aplicação em condições urbanas específicas requer ajustes para melhor refletir as características dos pavimentos e do tráfego local.

Por fim, é evidente que as condições de pavimentos urbanos têm impacto nas emissões veiculares, e mais estudos empíricos focados nos defeitos específicos dos pavimentos são necessários para uma compreensão mais detalhada dessa interação. A implementação de pavimentos mais sustentáveis e a calibração de modelos de previsão podem ser passos importantes para reduzir as emissões de poluentes nas áreas urbanas e promover cidades mais limpas e eficientes.

4.1. Sugestões para trabalhos futuros

Apesar do progresso significativo na compreensão do impacto dos defeitos dos pavimentos urbanos nas emissões veiculares, várias áreas ainda necessitam de mais investigação. Com base nas lacunas identificadas na literatura revisada, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir.

Primeiramente, seria interessante explorar a medição das emissões com o dispositivo PEMS. Esse sistema permite a medição direta das emissões veiculares, proporcionando dados mais precisos e representativos das condições reais de operação dos veículos em diferentes tipos de pavimento. A utilização do PEMS em estudos futuros poderia oferecer uma visão mais detalhada da relação entre defeitos nos pavimentos e as emissões de poluentes, com maior controle sobre as variáveis externas.

Além disso, a utilização da classificação de defeitos específicos ao invés de apenas o IRI poderia representar um avanço significativo na avaliação da qualidade do pavimento. O IRI, embora amplamente utilizado, oferece uma visão generalizada da rugosidade do pavimento, enquanto a classificação de defeitos específicos, como buracos, panelas e afundamentos, poderia fornecer uma análise mais detalhada e relevante para o contexto urbano. A investigação de como esses defeitos isolados afetam as emissões veiculares poderia gerar dados mais precisos e aplicáveis para estratégias de manutenção de pavimentos urbanos.

Outra área promissora para futuras pesquisas é a análise das emissões em diferentes tipos de veículos, leves e pesados. A maioria dos estudos existentes tem se concentrado principalmente em veículos leves. Contudo, a inclusão de uma gama maior de veículos nas medições permitiria uma avaliação mais abrangente, considerando as diferenças no consumo de combustível e nas emissões de acordo com o tipo de veículo e seu desempenho em diferentes tipos de pavimento.

Por fim, a medição das emissões em cidades com clima tropical é essencial, uma vez que as condições climáticas específicas podem influenciar a degradação dos pavimentos e o desempenho dos veículos. As altas temperaturas e a umidade, características típicas de muitas regiões tropicais, podem afetar a resistência ao rolamento e, consequentemente, o consumo de combustível e as emissões. A realização de estudos focados em contextos urbanos tropicais ajudaria a adaptar os modelos de previsão de emissões e otimizar as estratégias de pavimentação e manutenção para essas regiões.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FUNCAP, a CAPES e ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo, J. A. H.; Cassiano, D. R.; Feitosa, B. B.; Oliveira, M. L. M.; Lima, E. P.; Bertoncini, B. V. (2017) Influências dos modos de operação nas emissões de poluentes provenientes de veículos flex em região urbana. Transportes, v. 25, n. 2, p. 91–100. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1304.

Beckett, K. P.; Freer-Smith, P.; Taylor, G. (2000) The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban

sites. Arboric. J., v. 24, p. 209–230. DOI: 10.1080/03071375.2000.9747273.

Cavalcante, R. M.; Rocha, C. A.; De Santiago, I. S.; Da Silva, T. F. A.; Cattony, C. M.; Silva, M. V. C.; Silva, I. B.; Thiers, P. R. L. (2017) Influence of urbanization on air quality based on the occurrence of particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in a tropical semiarid area (Fortaleza-CE, Brazil). Air Quality Atmosphere and Health, v. 10, n. 4, p. 437–445. DOI: 10.1007/s11869-016-0434-z.

Fontaras, G.; Zacharof, N. G.; Ciuffo, B. (2017) Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. Progress in Energy and Combustion Science, v. 60, p. 97–131. DOI: 10.1016/j.pecs.2016.12.004.

Kalembo, C.; Jeihani, M.; Saka, A. A. (2012) Evaluation of the impact of pavement roughness on vehicle gas emissions in Baltimore County. Journal of Environmental Engineering, v. 138, n. 5, p. 509–514. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000450.

Li, Q.; Qiao, F.; Yu, L. (2015) Clustering Pavement Roughness Based on the Impacts on Vehicle Emissions and Public Health. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 38, p. 33–45. DOI: 10.1016/j.trd.2015.04.003.

Liu, C. M.; Chen, J. W.; Tsai, J. H.; Lin, W. S.; Yen, M.; Chen, T. H. (2012) Experimental studies of the dilution of vehicle exhaust pollutants by environment-protecting pervious pavement. Journal of the Air and Waste Management Association, v. 62, n. 7, p. 799–805. DOI: 10.1080/10473289.2011.630628.

Nicolau, O. N. B.; Chaves, G. D. L. D.; Zanchetta, I. T. (2018) Avaliação do consumo energético e emissão de dióxido de carbono do setor de transportes rodoviário do Brasil (2016-2026). *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 54, p. 1–20. DOI: 10.5380/dma.v54i0.62606.

Perrotta, F.; Parry, T.; Neves, L. (2017) Using truck sensors for road pavement performance investigation. Journal of Transportation Engineering, v. 143, n. 8, p. 04017049. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000965.

Plati, C.; Pomoni, M.; Drainakis, A.; Loizos, A. (2022) Integrating Roughness Data to Assess Greenhouse Gas Emissions Within Pavement Management Decision-Making. Road and Rail Infrastructure VII. DOI: 10.5592/co/cetra.2022.1401.

Qiao, F.; Nabi, M.; Yu, L.; Li, Q. (2020) Estimating Light-Duty Vehicle Emission Factors Using Random Forest Regression Model with Pavement Roughness. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 80, p. 102244. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102244.

Victor Cardoso Oliveira (victoroliveira@det.ufc.br)
Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@det.ufc.br)
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes.
CEP:60455-760. Av. Mister Hull, S/N – Bairro: Pici. Campus do Pici, Bloco 703 – Fortaleza, CE, Brasil.

SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA E A RESILIÊNCIA DO TRANSPORTE HIDROVIÁRIO INTERIOR FRENTE À MUDANÇA DO CLIMA

Valeria Xavier da Costa, Victor Hugo de Souza Abreu, Andrea Santos Souza
PET/COPPE/UFRJ

RESUMO
Com a crise climática, eventos extremos como fortes chuvas, altas temperaturas e aumento no nível médio do mar tem se intensificado e, como consequência, afetado sistemas de transportes, em especial o transporte hidroviário de interior e suas infraestruturas, por serem sensíveis às flutuações dos níveis de água. Nesse contexto, Soluções baseadas na Natureza apresentam potencial para promover infraestruturas mais resilientes. O presente artigo propõe uma revisão sistemática da literatura com abordagem bibliométrica, com o objetivo de identificar iniciativas no âmbito das SbNs, que destaquem a resiliência do Transporte Hidroviário Interior (THI) e suas instalações portuárias frente à mudança do clima. O estudo revela uma lacuna existente na literatura, o que constitui uma oportunidade de pesquisa na área.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte hidroviário interior (THI) destaca-se por sua eficiência energética, apresentando baixos índices de emissão de gases de efeito estufa e uma elevada capacidade de carga em comparação com outros modos de transporte (BARROS *et al*, 2022). As atividades portuárias constituem um motor que impulsiona a economia em muitos países, tanto que grandes cidades do mundo se desenvolvem a partir de um porto comercial. Sendo assim, é fundamental a constante modernização de suas infraestruturas, pois constituem o ponto de conexão entre o ambiente aquático e terrestre (KANE *et al*, 2017). A mudança do clima, caracterizada pelo aumento na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos como fortes chuvas, altas temperaturas e aumento no nível médio do mar, constitui uma realidade percebida no mundo inteiro e vem causando danos materiais, ecossistemas e seres humanos. Eventos extremos levantam a necessidade de medidas de adaptação e resiliência das infraestruturas de transportes frente às alterações do clima (MORETTI & LOPRENCIPE, 2018). Para uma instalação portuária ser implantada é necessária avaliação preliminar do ambiente físico, das correntes e das condições climáticas de forma a preservar a segurança de sua infraestrutura (SANTOS *et al*, 2025). Nesse contexto, a implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) constitui uma opção para estimular o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e resilientes. As SbNs podem ofertar possibilidades de transformação global gerando benefícios econômicos e ambientais. A utilização de infraestrutura natural como parte dessa estratégia pode garantir cidades mais inteligentes e resilientes para o futuro, como por exemplo, a implementação de áreas naturais na infraestrutura urbana como parte do sistema de drenagem ou a implantação de parques lineares nas margens de rios evitando enchentes e inundações, proporcionando maior segurança diante das consequências de eventos climáticos extremos (Fundação Grupo Boticário, 2024). Nesse sentido, o conceito de SbN está relacionado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), e assim a implementação de SbNs podem contribuir para concretizar as agendas globais e suas metas. Assim, a implementação de uma SbN, além de atender a demanda para a qual foi criada, também contribui para o cumprimento dos ODS, especialmente os ODS 3, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 15 e 17. (BARROS & CARVALHO; FUNDAÇÃO GRUPO BOTICÁRIO, 2024). Dessa forma, a presente trabalho pretende realizar uma revisão na literatura existente visando identificar iniciativas no âmbito das SbNs, que destaquem a resiliência do THI e suas instalações portuárias frente à mudança do clima.

2. METODOLOGIA

O presente artigo propõe uma revisão sistemática da literatura com abordagem bibliométrica, com o objetivo de identificar iniciativas no âmbito das SbNs, que destaquem a resiliência do THI e suas instalações portuárias frente à mudança do clima. A primeira etapa da pesquisa consistiu em uma busca nas bases de dados Scopus e Web of Science, que apresentam alcance e cobertura satisfatórios, conforme demonstrado na Tabela 1. Destaca-se que foram utilizados termos em inglês por ser o idioma predominante em publicações científicas de destaque internacional, e também porque geralmente estudos de outros idiomas apresentam resumos em inglês, o que amplia as possibilidades da pesquisa. Não foi utilizado o termo SbN na busca, uma vez que, por ser um tema relativamente recente, não houve incidência de nenhum artigo ao ser adicionado ao tópico. Assim, foi utilizada uma revisão documental adicional, de forma complementar, voltada especificamente para a temática das SbNs, para dar suporte à pesquisa.

Tabela 1: Descrição das estratégias de busca aplicadas no presente estudo.

Critérios	Descrição
Tópicos	TS=("waterway* infrastructure" AND "climate change" AND "adaptation") OR TS= ("inland waterway*" AND "climate change" AND "adaptation") OR TS= ("Navigable waterway*" AND "climate change" AND "adaptation") OR TS= ("Interior waterway*" AND "climate change" AND "adaptation"') OR TS= ("Inland navigation route" AND "climate change" AND "adaptation")
Método de pesquisa	Busca direta
Inclusão	Tempo de cobertura: todos os anos do banco de dados (2012-2025)
Base de Dados	Scopus e Web of Science
Data da Busca	3 de julho de 2025

Após essa primeira etapa da busca direta, a inserção das combinações resultou em 11 artigos na Base de dados *Web of Science* e 10 artigos na base de dados *Scopus*. Após a junção de ambas as bases, foram descartados 7 estudos duplicados, sendo o resultado final, de 14 artigos. Na sequência, as 14 referências foram avaliadas com base no título e resumo e foi verificado que todos os estudos apresentaram conexão direta com a temática principal. Cabe destacar o baixo número de estudos no tema, que revela falta de investimentos em pesquisas no transporte hidroviário de interior. Segundo CNT (2019), o Brasil possui alto potencial hidroviário e aproveita apenas um terço dos 63 mil quilômetros existentes de rios navegáveis, principalmente devido à obstáculos de infraestrutura, operacionais, institucionais e burocráticos, falta de políticas públicas, baixa eficácia de planos e programas, bem como baixos recursos investidos no setor.

3. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

Na pesquisa direta, constatou-se que 14 estudos apresentaram relação direta com o tema em estudo e foram considerados no repositório da pesquisa. Nesse universo, uma análise da distribuição das publicações ao longo dos anos, ilustrada na Figura 1, revela uma uniformidade no número de publicações. Um leve aumento no número de publicações em 2014 pode estar relacionado à publicação do Quinto Relatório Síntese do Painel Governamental das Mudanças Climáticas, no mesmo ano. Destaque também para o lapso temporal entre 2017 e 2022, provavelmente os anos de pandemia, entre 2020 e 2023, tiveram interferência nesse período de ausência de publicações.

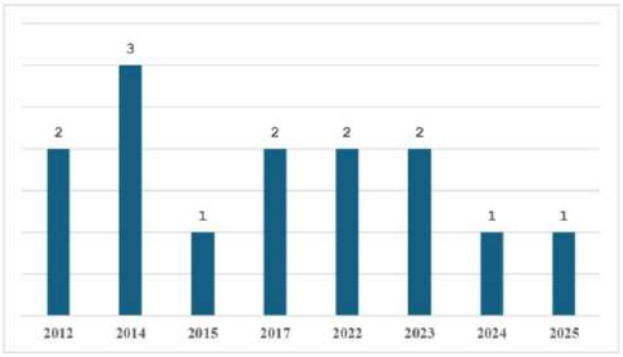


Figura 1: Número de publicações por ano.

A Figura 2 revela a distribuição geográfica da produção acadêmica sobre SbN aplicadas à resiliência do THI frente à mudança do clima, evidenciando que a Holanda se destaca isoladamente como o país com maior número de publicações, totalizando três, o que está em consonância com sua reconhecida tradição em engenharia hidráulica, gestão hídrica integrada e políticas voltadas à adaptação climática. Em seguida, aparecem Reino Unido, Polônia, França e Alemanha, com duas publicações cada, concentrando a produção acadêmica principalmente em países da Europa Ocidental, fato que está alinhado ao apontamento de GBAKO *et al* (2025), que destaca o papel estratégico do THI na conectividade dos portos europeus, especialmente em regiões densamente urbanizadas e com sistemas intermodais desenvolvidos. O Canadá, a Bélgica e a Austrália, com uma publicação cada, representam contribuições mais pontuais, indicando um estágio ainda emergente nas pesquisas voltadas ao uso de SbN na resiliência climática do THI em seus respectivos contextos nacionais.

Essa predominância de países europeus, especialmente aqueles localizados ao redor do Mar do Norte e dos principais corredores fluviais, como o Reno, sugere que o avanço da agenda climática nesses territórios tem

estimulado abordagens inovadoras, como as SbN, em setores estratégicos como o transporte. A dependência histórica das redes fluviais para o escoamento de cargas, aliada aos impactos crescentes das mudanças climáticas, como secas e inundações, reforça a urgência de soluções resilientes e sustentáveis. Ademais, o destaque da Holanda pode ser interpretado como reflexo das políticas públicas e investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento voltados à adaptação climática, por meio da integração entre infraestrutura cinza, tradicional, e infraestrutura verde, baseada na natureza.

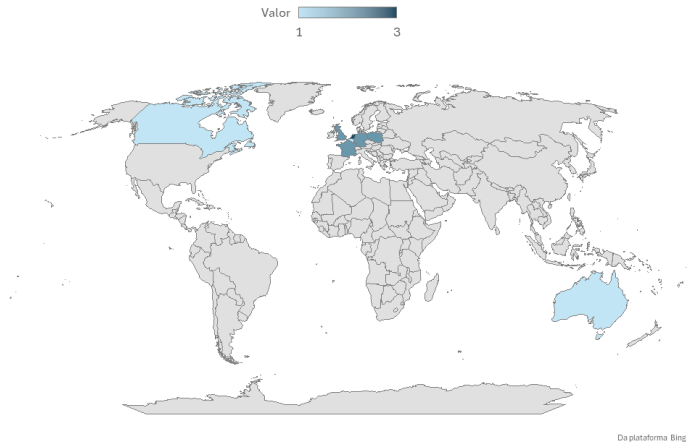


Figura 2: Produção científica por país.

Também é importante avaliar as principais palavras-chave encontradas nos estudos incluídos no repositório de pesquisa, conforme identificadas na rede de interconexão entre palavras-chave, desenvolvida com o auxílio do software VOSviewer (Centro de Estudos em Ciência e Tecnologia, Universidade de Leiden, Holanda), que constrói e visualiza redes bibliométricas. Essa estratégia permite que os pesquisadores encontrem com mais facilidade estudos diretamente relacionados ao tema investigado, bem como identifiquem novas direções de pesquisa, determinando os fatores, as dimensões-chave e as principais áreas. A rede gerada pela base de dados da Scopus, representada na Figura 3, composta por 17 itens, 3 *clusters* e 88 *links*/conexões, nos quais é possível identificar as palavras-chave mais utilizadas (de acordo com o tamanho da esfera sob sua representação) e as interconexões entre elas (de acordo com as conexões entre as esferas).

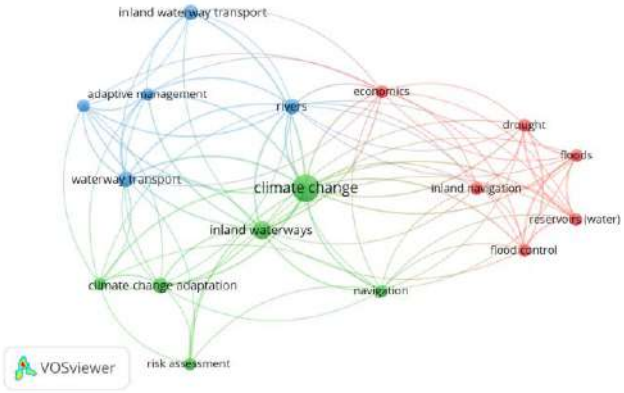


Figura 3: Rede de conexão entre palavras-chave da base *Scopus*.

A Figura 3 ilustra um mapa de concorrência de termos associados à mudança do clima, revelando uma estrutura temática espraiada, porém interconectada. O termo central "*climate change*" apresenta conexões diretas com os termos principais do estudo como rios, transporte hidroviário, hidrovia de interior e navegação de interior. No entanto apresenta também conexões periféricas relevantes com áreas como seca, enchentes e controle de enchentes, gestão ambiental, avaliação de riscos, medidas adaptativas e adaptação à mudança climática, todos diretamente associados às SbN. A figura, portanto, reforça a necessidade de aprofundar investigações que conectem diretamente SbN à infraestrutura portuária de interior, promovendo uma abordagem sistêmica e adaptativa frente à mudança do clima. Trata-se de um campo ainda emergente, com potencial de contribuição científica e prática significativa.

4. RESULTADOS SISTEMÁTICOS

A metodologia de busca realizada, permitiu conduzir revisões sistemáticas de forma a facilitar a análise crítica do conjunto de informações provenientes dos estudos disponíveis no banco de dados. A seguir, serão colocados os principais tópicos considerados essenciais para o tema, identificados durante o processo de revisão da literatura.

4.1. A influência da mudança do clima no THI

No contexto da mudança do clima, novos aspectos começam a chamar atenção na operação do THI, pois apresenta maior sensibilidade diante das flutuações dos níveis de água, mesmo sendo considerado um meio de transporte de alta confiabilidade e segurança quando comparado com outros modais (HENDRICKX & BREEMERSCH, 2012). Para enfrentar os desafios da mudança climática, os canais artificiais para navegação oferecem soluções inovadoras para alguns dos problemas enfrentados, em termos de secas, inundações e ondas de calor. Projetos de canais podem incorporar funções de defesa contra inundações com reservatórios de água que podem ser utilizados para controle de inundações e armazenamento de água (ROSE & WALKER, 2014). Essas estratégias estão alinhadas ao conceito das cidades esponja que utilizam SbN para gerenciar fluxos hídricos, promovendo a absorção, retenção e infiltração da água no ambiente urbano, combatendo enchentes e alagamentos (HLUSHCHENKO *et al*, 2022). Como exemplo tem-se o THI como uma das principais atividades econômicas na região do Rio Reno, importante canal de navegação que atravessa Suíça, Alemanha, França, Holanda e deságua no Mar Norte, com impactos significativamente influenciados pelas consequências da mudança climática, constituindo um fator preocupante para operadores, indústria e formuladores de políticas públicas (RIQUELME-SOLAR *et al*, 2015). As condições climáticas futuras possivelmente influenciarão o THI na Europa Ocidental (JONKEREN, 2014). Especialmente na Alemanha, estudos conduzidos por HÄNSEL *et al* (2022), demonstram resultados que apontam para aumentos previstos nas temperaturas extremas e precipitação intensa, destacando a importância de criar medidas de adaptação às mudanças climáticas para o THI.

4.2. Necessidade de adaptação das infraestruturas

Para GBAKO *et al* (2025), a modernização e inovações tecnológicas nas infraestruturas de THI são importantes para aumentar a eficácia e a eficiência do transporte hidroviário de forma a alcançar um sistema de transporte sustentável. De acordo com BARROS & CARVALHO (2024), as melhorias tecnológicas em obras hidráulicas e em projetos de embarcações representam estratégias fundamentais para a redução das emissões de poluição e para a otimização do desempenho energético. A partir da importância da constante modernização das infraestruturas portuárias e devido a necessidade de trazer a pauta da Gestão de Riscos Ambientais de projetos de infraestrutura de navegação, um grupo de trabalho designado pela Associação Mundial para Infraestrutura de Transporte Aquaviário (PIANC), foi responsável por desenvolver diretrizes para as temáticas: “Trabalhando com a Natureza", "Serviços Ecossistêmicos” e "Adaptação às Mudanças Climáticas". Tal ação revela a importância de realizar estudos que relacionem diretamente SbN à infraestrutura portuária de interior (KANE *et al*, 2017). As alterações climáticas constituem um risco comercial de grande relevância para portos e hidrovias interiores, configurando-se, assim, como um elemento essencial no planejamento e na gestão dessa infraestrutura (BROOKE *et al*, 2014). Ao longo da revisão, pode-se identificar a contribuição do tema analisado para o atendimento de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No que se refere à adaptação das infraestruturas, destacam-se os ODS 6 (Água potável e saneamento), 13 (Ação contra a mudança global do clima) e 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), relacionados à modernização e à incorporação de inovações tecnológicas nesses sistemas. As ações voltadas para melhorias no fluxo e na segurança estão alinhadas aos ODS 3 (Saúde e bem-estar), 8 (Trabalho decente e crescimento econômico) e 11 (Cidades e comunidades sustentáveis). Por fim, as práticas de planejamento e gestão contribuem diretamente para os ODS 8, 12 (Consumo e produção responsáveis) e 17 (Parcerias e meios de implementação).

4.3. Oportunidade para implementação de SbN em infraestruturas portuárias

Segundo IPCC (2023), o planejamento e implementação de ações de adaptação avançaram em diversos setores e regiões do mundo, sendo que fluxos financeiros globais destinados à adaptação são insuficientes, restringindo a implementação, principalmente em países em desenvolvimento. Abordagens de adaptação baseada em ecossistemas, conceito relacionado às SbNs, demonstraram eficácia na redução de riscos de inundações e do calor urbano. Neste contexto, o incentivo de implementação das SbNs, especialmente em infraestruturas

portuárias de interior, de forma a fomentar o transporte hidroviário, está em consonância com as medidas adaptativas necessárias para mitigar a vulnerabilidade dessa infraestrutura diante de eventos extremos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu identificar os desafios do THI frente à mudança do clima, principalmente por ser constituído de infraestruturas sensíveis às alterações do nível do mar. Ainda, diante da lacuna de estudos identificados no âmbito das SbNs, revelou-se uma oportunidade de aprofundar estudos na aplicação da temática, de forma a mitigar os impactos de eventos extremos nessa infraestrutura de transporte e atender aos ODS. A análise bibliométrica constatou países emergentes no campo de pesquisa do THI, podendo servir de modelo para desenvolvimento de estudos em outros países, principalmente não desenvolvidos. Como sugestão para futuras investigações, verifica-se a importância de ampliar o escopo de estudos sobre iniciativas de SbN, especialmente no que diz respeito às instalações portuárias de interior, uma vez que estas representam pontos de conexão essencial entre os ambientes terrestre e aquático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, Bruna Renata Cavalcante; CARVALHO, Eliezé Bulhões; JUNIOR, Antonio Cesar Pinho Brasil. Inland waterway transport and the 2030 agenda: Taxonomy of sustainability issues. Cleaner Engineering and Technology, v. 8, p. 100462, 2022.

BARROS, Bruna Renata Cavalcante de; CARVALHO, Eliezé Bulhões de. Transporte hidroviário interior sob a perspectiva da tecnologia e dos 5P da Agenda 2030: uma revisão. Ministério de Portos e Aeroportos, Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ISSN: 2965-7350. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos. Acesso em: 8 de abril de 2025.

CNT (Confederação Nacional do Transporte). Aspectos Gerais da Navegação Interior no Brasil. Cadernos Hidroviários CNT. Volume 1. 2019. Disponível em: https://cnt.org.br/aspectos-gerais-navegacao-brasil?_gl=1*8d4txm*_gcl_au*NDE5MjY5ODY5LjE3NTEzOTQwMTU.*_ga*MTA0MjA3NDg3MS4xNzUxMzk0MDE2*_ga_7GB3MLTQLS*czE3NTEzOTQwMTUkbzEkZzEkdDE3NTEzOTQ1MDQkajYwJGwwJGgw. Acesso em: 01 julho de 2025.

FUNDAÇÃO GRUPO BOTICÁRIO. Cidades Baseadas na Natureza. Infraestrutura Natural para Resiliência Urbana. Disponível em: https://fundacaogrupoboticario.org.br/wp-content/uploads/2024/12/8907A-AF-Paper-Cidades-Baseadas-na-Natureza.pdf. Acesso em 11 dez. 2024.

GBAKO, S. et al. (2025). A systematic literature review of technological developments and challenges for inland waterways freight transport in intermodal supply chain management. Benchmarking: An International Journal. v. 32, n. 1, p. 398-431.

HAENSEL, Stephanie et al. Climate services in support of climate change impact analyses for the German inland transportation system. Meteorologische Zeitschrift, v. 31, n. 3, p. 203-226, 2022.

HENDRICKX, Christophe; BREEMERSCH, Tim. The effect of climate change on inland waterway transport. Procedia-Social and Behavioral Sciences, v. 48, p. 1837-1847, 2012.

HLUSHCHENKO, Roman et al. “Green structures” for effective rainwater management on roads. Production Engineering Archives, v. 28, 2022.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

JONKEREN, Olaf et al. Climate change and economic consequences for inland waterway transport in Europe. Regional Environmental Change, v. 14, p. 953-965, 2014.

KANE, Kevin J. et al. PIANC guideline-environmental risk management of navigation infrastructure projects. In: Australasian Coasts & Ports 2017: Working with Nature: Working with Nature. Barton, ACT: Engineers Australia, PIANC Australia and Institute of Professional Engineers New Zealand, 2017. p. 677-682.

MORETTI, L. & LOPRENCIPE, G. 2018. Climate Change and Transport Infrastructures: State of Art. Sustainability. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su10114098.

RIQUELME-SOLAR, M.; VAN SLOBBE, E.; WERNERS, S. E. Adaptation turning points on inland waterway transport in the Rhine River. Journal of Water and Climate Change, v. 6, n. 4, p. 670-682, 2015.

ROSE, Carly B.; WALKER, Luke. Inland waterway systems–a solution to drought and flooding issues. Water Resources in the Built Environment: Management Issues and Solutions, p. 180-195, 2014.

SANTOS, Edson Mesquita dos, *et al*. Planejamento portuário: Recomendações para acessos náuticos. Rio de Janeiro: Praticagem do Brasil, 2022. Disponível em: https://www.praticagemdobrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/07/livro-planejamento-portuario.pdfAcesso em: 28/04/2025. ISBN 978-65-5854-606-1.

TRANSPORTE DE MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: A EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2) E O TRANSPORTE MULTIMODAL

Oliver de Oliveira Barros Lucena de Aquino[1], Natalíe Francisca Figueiredo Hashimoto[1], Generoso De Angelis Neto[1], Rafaela De Angelis Barros[2]
[1]Universidade Estadual de Maringá, [2]Amity University Dubai

RESUMO
Os meios de transportes são responsáveis por grande parte das emissões de gases do efeito estufa, deste modo este estudo teve como objetivo comparar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) geradas pelo transporte de materiais da construção civil entre os modos unimodal rodoviário e multimodal (ferroviário-rodoviário). A metodologia consistiu na coleta de dados sobre consumo de combustível e emissões de poluentes com base em relatórios nacionais e internacionais, além da definição dos trajetos mais curtos pelo *Google Maps* e da localização das fábricas por meio de bancos de dados do setor cerâmico. Foram selecionados blocos cerâmicos e cimento utilizados na construção de 1 m² de alvenaria convencional. Os resultados revelaram que o transporte multimodal apresenta uma emissão significativamente inferior de CO_2 em comparação ao rodoviário, com redução de 99,88%. Este achado destaca a relevância de soluções logísticas mais sustentáveis para o setor da construção civil e reforça o potencial do uso combinado de meios de transporte como estratégia eficaz para a mitigação de impactos ambientais.

1. INTRODUÇÃO

Todo material, independentemente de sua natureza, depende de algum meio de transporte para chegar ao seu destino de uso humano, sendo que a escolha do modo e do processo logístico influencia diretamente tanto nos custos quanto nas emissões de gases poluentes. Os meios de transporte classificam-se em aquaviário (marítimo, fluvial e lacustre), terrestre (rodoviário e ferroviário) e aéreo, podendo ser utilizados de forma unimodal, intermodal, multimodal ou por transbordo. O transporte unimodal utiliza apenas um meio de início ao fim do trajeto; o intermodal envolve dois ou mais meios, contratados separadamente, em casos em que o unimodal não é viável; o multimodal também emprega múltiplos meios, mas com uma única empresa responsável por todo o transporte; e o transbordo caracteriza-se pelo uso de mais de um veículo de um mesmo meio para completar a entrega (Keedi, 2004; Asa; Nautwima, 2025).

No Brasil destaca-se a utilização do transporte rodoviário, segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT), 64,9% do transporte de cargas do país é realizado pela modalidade rodoviária, esta primazia se justifica pela capilaridade característica deste tipo de transporte, ou seja, a carga pode ser transportada até seu destino sem a necessidade de transferência da carga para outra modalidade, outra vantagem é que a infraestrutura rodoviária pode ser construída de forma muito mais rápida que outras modalidades e não necessita de pontos logísticos de acesso de embarque e desembarque de cargas (CTN, 2022; Suksri; Tunasive, 2025).

Todavia, a escassez de infraestrutura das rodovias brasileiras atrelada ao custo para manutenção da malha rodoviária existente, faz com que o transporte rodoviário possua um maior custo operacional para o poder público quando comparado a uma infraestrutura de qualidade. Segundo o Fórum Econômico Mundial (2019), a qualidade das rodovias do país recebeu nota 3 em uma escala de 1 (pior) a 7 (melhor). Em 2021, a pesquisa da CNT apontou que o Brasil possui 212.886 km de rodovias pavimentadas, representando apenas 12,4% do total da malha viária nacional, das quais 61,8% apresentam condição inferior a regular, classificada como ruim ou péssima. Essa deficiência resultou no consumo excedente de 1,072 bilhões de litros de diesel e na emissão de 2,83 milhões de toneladas de CO_2, além de elevar os custos operacionais em até 30,9% (CNT, 2022) e o tempo de viagem em até 60% (Barat, 2007).

Em contraste, a modalidade de transporte ferroviário, conforme relatório da Agência Nacional de Transportes Ferroviários (ANTF) é utilizado quase exclusivamente para o transporte de *commodities* no Brasil, destacando-se pela alta previsibilidade e pelo baixo consumo energético em relação à sua capacidade de carga (ANTF, 2022; Palmer *et al.*, 2018). Segundo ANTF (2023), um vagão ferroviário tem capacidade para transportar cerca de 100 toneladas, equivalente a três caminhões graneleiros de 33 toneladas, sendo que uma composição pode conter até 120 vagões. Apesar dessa alta capacidade, o transporte ferroviário exige uma logística sistematizada, pois opera entre terminais específicos de embarque e desembarque, o que limita sua capilaridade em comparação ao meio de transporte rodoviário. Além disso, os elevados custos e prazos de implantação, construção e manutenção das ferrovias e seus terminais, bem como os impactos sociais decorrentes de sua instalação em áreas urbanizadas, como a segregação espacial, configuram desafios significativos (Li, 2010). Atualmente, o Brasil conta com uma malha ferroviária de 30.800 km, concentrada nas regiões Sul e Sudeste, número que contrasta com os 293.560 km dos Estados Unidos ou, proporcionalmente, com os 18.000 km da

Argentina, país com território 67,37% menor (ANTF, 2023).
Segundo a ANTF (2023), a modalidade de transporte ferroviário emite aproximadamente 85% de emissões de dióxido de carbono (CO_2) em comparação ao rodoviário, contudo, sua limitação em termos de capilaridade para o transporte de insumos e materiais resulta em subutilização no Brasil. A construção civil, assim como a maioria das cargas não classificadas como *commodities*, depende quase exclusivamente do transporte rodoviário, o que contribui para o encarecimento da construção e da manutenção das vias já sobrecarregadas. Isso ocorre porque esse tipo de carga pesada e de deslocamento lento exige, conforme a NBR 9910 (2017), um desempenho estrutural diferenciado das rodovias. Soma-se a isso o envelhecimento da frota nacional, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (2023), Sindipeças SNICVA, 18,3% dos caminhões possuem mais de 16 anos, o que acentua a emissão de gases de efeito estufa (GEE), visto que veículos mais antigos são mais poluentes.
Dados do The World Bank Group (2023) indicam que 20,6% das emissões globais de GEE provêm das indústrias de fabricação de materiais da construção civil, enquanto o transporte, de forma geral, é responsável por 44,8% dessas emissões, evidenciando a urgência de soluções mais sustentáveis nesse setor. O relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) projeta que até 2100 pelo menos 40 milhões de pessoas poderão morrer em decorrência dos efeitos causados pelas emissões de GEE. Além das emissões, o transporte enfrenta desafios como a precariedade da infraestrutura, a falta de segurança viária e de educação no trânsito, que, em 2022, resultaram em 5.432 mortes apenas nas rodovias brasileiras (CNT, 2022). Diante do alto custo de implantação de novas infraestruturas e da urgência por práticas sustentáveis, é imprescindível repensar a logística do transporte de materiais, otimizando o uso das estruturas existentes de forma mais eficiente e ambientalmente responsável.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O objetivo deste trabalho consistiu em analisar as emissões CO_2 no transporte dos materiais da construção civil, entre os meios de transporte rodoviário e ferroviário, por vias e ferrovias já existentes no contexto do sul e sudeste brasileiro, em comparação ao transporte unimodal rodoviário convencional, através da análise de relatórios nacionais e internacionais de consumo e emissão de gases poluentes de caminhões de carga e trens, a fim de verificar uma média de comparação dessas emissões.
Os materiais adotados para analise constituem-se de materiais para a construção de uma vedação convencional de alvenaria de 1m² com blocos cerâmicos, assentados com argamassa convencional, chapisco, emboço e reboco rodados em obra, cujos materiais são mais adotados na construção no Brasil (Sposto *et al.,* 2016). Para o estudo não foi adotado revestimento cerâmico com argamassa colante, pois a cidade de Maringá/PR possui fabricantes destes materiais.
Para a análise das distâncias do transporte, adotou-se hipoteticamente o centro de Maringá/PR como destino final, sendo os fornecedores selecionados com base na menor distância, considerando dados de empresas locais da construção civil. As localizações dos fabricantes de blocos cerâmicos foram obtidas na Associação Nacional da Indústria da Cerâmica (2023), enquanto os dados relativos ao cimento Portland foram extraídos do Programa Setorial da Qualidade (PSQ) (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2023). As distâncias percorridas foram calculadas por meio da ferramenta *Google Maps*, comparando-se as logísticas do transporte unimodal e multimodal, no unimodal rodoviário, considerou-se o trajeto integral entre a fábrica selecionada e o centro de Maringá/PR pelas rodovias; no modelo multimodal, o percurso envolveu o transporte por caminhão até o terminal ferroviário mais próximo, seguido pelo transporte ferroviário até o terminal de Maringá/PR, com posterior deslocamento até o centro da cidade por via rodoviária.
No transporte unimodal, foi considerado Jataizinho/PR na latitude e longitude (-23.265730229027277, -50.97271022866872), sendo o fabricante de blocos cerâmicos como ponto inicial e Maringá/PR na latitude e longitude (-23.41984746707155, -51.92996782698877) como ponto final, enquanto para cimento Portland foi considerando Balsa Nova/PR na latitude e longitude (-25.45812014276047, -49.60630877648734), sendo o fabricante de cimento como ponto inicial e Maringá/PR na latitude e longitude (-23.41984746707155, -51.92996782698877) como ponto final conforme Tabela 01.

Tabela 1: Transporte unimodal

Material	Bloco Cerâmico	Cimento Portland	Total
Percorrida (km)	123	391	514

No transporte multimodal, foi considerado Jataizinho/PR na latitude e longitude (-23.265730229027277, -50.97271022866872) para o fabricante de blocos cerâmicos como ponto inicial, todavia para a transferência de carga entre os meios de transporte foi adotado como destino seguinte o terminal de Jataizinho/PR na latitude e longitude (-23.252692045317918, -50.98116902836518) e, por conseguinte o terminal de Maringá/PR na latitude e longitude (-23.45131723095598, -51.99363937984762) seguindo para o centro de Maringá/PR na latitude e longitude (-23.41984746707155, -51.92996782698877) como ponto final. Para cimento Portland foi considerando o fabricante no município Balsa Nova/PR na latitude e longitude (-25.45812014276047, -49.60630877648734) como ponto inicial, para a transferência de carga foi adotado terminal Balsa Nova/PR na latitude e longitude (-25.584304882800037, -49.63583174746839) até o terminal de Maringá/PR na latitude e longitude (–23.45131723095598, -51.99363937984762) e como para o transporte do bloco cerâmico, adota-se o centro de Maringá/PR na latitude e longitude (-23.41984746707155, -51.92996782698877) como ponto final, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Transporte multimodal

Material	Bloco Cerâmico	Cimento Portland
Distância percorrida Rodovias (km)	12,3	31,5
Distância percorrida Ferrovia (km)	129	528

2.1. Consumo e emissões dos meios de transporte

Ressalta-se que as fontes de energia no transporte mais encontradas em território brasileiro, são derivadas de combustíveis fosseis (Pereira, 2014). Para estabelecer uma média de consumo dos caminhões foi utilizado dados levantados do trabalho de Nabut Neto (2011) que concluiu o consumo médio de diesel de 0,5815 l/km através de uma pesquisa de coleta de dados de uma variedade de caminhões mais encontrados em território nacional. A média de consumo adotado considera uma média do caminhão a capacidade total de carga do caminhão e com caminhão vazio.

Para estimar o consumo de combustível no transporte ferroviário, foram utilizados dados da ficha técnica da locomotiva modelo ES44ACi (locomotiva diesel-elétrica ES44ACi tem 4.500 HP de potência), locomotiva mais utilizada pela RUMO, principal operadora logística ferroviária do Brasil (Agência Infra, 2023). Considerou-se o consumo médio de combustível de uma locomotiva diesel-elétrica de 0,002 gal/GTM ou 0,00757 litros/min (Yi, 2018; Hay, 2003). Para cálculo final atendeu a velocidade média das ferrovias brasileiras, que, segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), foi de 20,48 km/h em 2018 e a necessidade do uso de duas locomotivas posicionadas em cada extremidade para a movimentação da composição férrea (ANTT, 2023). A partir da análise dos consumos médios, verifica-se que cada locomotiva apresenta um consumo específico de aproximadamente 0,022 litros por quilometro percorrido pelas locomotivas. Para a análise das emissões de CO_2, referente ao transporte rodoviário e ferroviário dos materiais foi calculado através do consumo de diesel de cada transporte. Para o cálculo adota-se 1 litro de diesel consumido é igual 3,15 kg de CO_2, conforme apresentado na Tabela 3 e 4. (Bermann, 2003).

Tabela 3: Emissões do transporte rodoviário

Transporte	Distância percorrida (Km)	Consumo (Litros)	Emissões de CO_2 (Kg)
Rodoviário	514	298,831	941,31

Tabela 4: Emissão do transporte multimodal rodoviário e ferroviário

Transporte	Distância percorrida (Km)	Consumo (Litros)	Emissões de CO_2 (Kg)
Rodoviário	43,8	(25,47x4 viagens) = 101,88	320,92
Ferroviário	627	(13,9x2 locomotivas) 27,8	87,57
		Total	408,49

Para a análise da capacidade de carga dos meios de transporte de carga, adotou-se para o transporte rodoviário o limite de 22 toneladas estipulado pela ANTT para caminhões de carga, desconsiderando o peso do veículo. No transporte ferroviário, foi considerado o uso de vagões fechados, adequados à proteção contra intempéries no transporte de materiais como cimento e blocos cerâmicos. Com base em dados da operadora Rumo,

considerou-se uma composição ferroviária com 80 vagões, totalizando 7.600 toneladas de capacidade de carga. Quanto à carga transportada, segundo Nabut Neto (2011), a construção de 1 m² de alvenaria convencional demanda aproximadamente 1,79 kg de chapisco, 2,91 kg de emboço, 2,91 kg de reboco e 144 kg de blocos cerâmicos, totalizando 151,61 kg ou 0,15161 toneladas por metro quadrado. Ressalta-se que a carga de um vagão equivale à de quatro caminhões, exigindo, portanto, quatro viagens entre a fábrica e o terminal ferroviário, além do deslocamento final até o centro de Maringá/PR.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As emissões de CO_2 do transporte dos materiais foram obtidas através dos cálculos da relação das distâncias e consumo dos meios de transporte adotados nesta análise. Através da Tabela 04 e 05, nota-se a emissão de CO_2 do transporte multimodal é inferior a comparação ao transporte unimodal e a capacidade de carga do transporte ferroviário apresenta um resultado mais eficiente quanto ao transporte de 1m² de alvenaria convencional, conforme apresentado na Tabela 05.

Tabela 5: Emissão por m² de alvenaria

Tipo de Transporte	Capacidade de Carga (TON)	Emissão CO_2 (Kg)	Quantidade de m² uma alvenaria convencional	Emissão CO_2 por m²de alvenaria
Multimodal	7.600 toneladas	408,49	50.128,61m²	0,0081
Unimodal	22 toneladas	941,31	145,10m²	6,487

Em uma análise preliminar, constata-se que a modalidade de transporte exclusivamente rodoviária apresenta maiores níveis de emissão de gases poluentes, ainda que implique no percurso de distâncias inferiores. Conforme os dados expostos na Tabela 5, observa-se que a emissão associada ao transporte rodoviário atinge 6,487 kg CO_2/m², ao passo que no transporte composto pela modalidade rodoviário e ferroviário a emissão correspondente é de apenas 0,0081 kg CO_2/m². Isso implica em uma redução relativa de aproximadamente 99,88% das emissões em relação modo exclusivo rodoviário. Em termos proporcionais, o transporte rodoviário emite cerca de 801 vezes mais CO_2 por metro quadrado de alvenaria convencional do que a alternativa multimodal. No Brasil a bibliografia ressalta a falta de infraestrutura das linhas férreas e uma malha muito pequena em relação ao tamanho do país, entretanto contesta-se que mesmo com a malha férrea existente foi possível reduzir as emissões de CO_2 no transporte de matérias da construção civil.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou analisar o transporte multimodal, rodoviário e ferroviário, de materiais de construção como agente mitigador das emissões de GEE em relação ao transporte convencional, o unimodal rodoviário. A escolha por esse modelo logístico demonstrou-se pertinente especialmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, onde já existe infraestrutura consolidada de ferrovias, rodovias e terminais logísticos, possibilitando a comparação entre os meios de transporte em termos de eficiência energética e impacto ambiental. Destaca-se a necessidade de estudos em outras regiões do país, incluindo distintos insumos da construção, para avaliar a aplicabilidade e efeitos do transporte multimodal.

Adicionalmente, o transporte multimodal exige planejamento logístico integrado e a atuação de profissionais qualificados, como o Operador de Transporte Multimodal (OTM), regulamentado pela ANTT, evidenciando também seu potencial de fomentar ocupações técnicas especializadas. Embora este trabalho não tenha se aprofundado nas implicações socioeconômicas desse modelo, observou-se que, na simulação proposta, o transporte multimodal resultou em uma redução de 99,88% nas emissões de GEE em comparação ao modelo rodoviário convencional. Assim, conclui-se que repensar a utilização das infraestruturas existentes sob uma perspectiva integrada e sustentável é fundamental para a transição a modelos logísticos de menor impacto ambiental, contribuindo para um futuro urbano e industrial mais resiliente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR (2017) Norma 9910/2017 - Asfaltos modificados para impermeabilização sem adição de polímeros - Características de desempenho.

Agência Infra (2023). Disponível em: https://agenciainfra.com/blog/tag/locomotivas/ Acesso em 31 mai. 2025.

Agência Nacional de Transporte Terrestres (2022). Relatório anuário do setor ferroviário. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario. Acesso em: 31 mai. 2025.

Asa R. A.; Nautwima, J. P. (2025). Intermodalism: Integrating Transportation Modes for Enhanced Efficiency. *Eco-*

Logistics and Sustainable Supply Chain Innovations, Hershey. v. 17. DOI: 10.4018/979-8-3693-6175-7.ch017

Associação Nacional da Indústria Cerâmica (2023). Resumo executivo. Programa Setorial da Qualidade PSQ blocos cerâmicos. Disponível em: https://pbqp-h.mdr.gov.br/psq/blocos-ceramicos/. Acesso em 31 mai. 2025.

Associação Brasileira de Cimento Portland (2023). Resumo executivo. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. Programa Setorial da Qualidade PSQ de Cimento Portland. Disponível em: https://pbqp-h.mdr.gov.br/psq/cimento-portland/. Acesso em 31 mai. 2025.

Associação Nacional de Transportadores Ferroviário (2023). Informações do setor ferroviário. Disponível em: https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/. Acesso em: 11 mai. 2025.

Barat, J. (Org.) (2007). Logística e transporte no processo de globalização: oportunidades para o Brasil. São Paulo: UNESP: IEEI.

Bermann, C. (2003). Energia no Brasil: para quê e para quem. Crise e alternativas para um país sustentável. 2.ed. São Paulo: Livraria da Física.

Confederação Nacional Do Transporte (2022). Relatório Gerencial. Pesquisa CNT de rodovias. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo. Acesso em: 11 mai. 2025.

Keedi, S. (2004). *Logística de transporte internacional: Veículo prático de competitividade*. 2. ed. São Paulo: Aduaneiras.

Han, S., Na, S., Lim, N. (2020). Evaluation of transport polluant emissions from transporting building materials to the construction site by replacing old vehicles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9316.

Hay, W. W. Railway Engineering. In: MEYERS, Robert A. (ed.). Encyclopedia of Physical Science and Technology. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2003. p. 807-844.

Li, T.; Shilling, F.; Thorne, J.; Li, F.; Schott, H.; Boynton, Berry (2010). A. Fragmentation of China's landscape by roads and urban areas. *Landscape Ecology. Springer Science Business Media,* v. 25, p. 839-853. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-010-9461-6. Acesso em: 13 mai. 2023.

Nabut Neto, A. C. (2011). *Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas: estudo de caso do steel frame para utilização em Brasília*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

Organização Das Nações Unidas (2022). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf. Acesso em: 17 mai. 2025.

Palmer, A., Greening, P., Piecyk, M., Dadhich, P. (2018). A cost and CO2 comparison of using trains and higher capacity trucks UK companies collaborate. *Transportation Research Part D Transport and Environment,* 58(1), 94-107.

Pereira, M. F. (2014). *Conteúdo energético e emissões de CO2 em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso.* Dissertação (Mestrado) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Rumo (2023). Sala de imprensa. Disponível em: https://rumolog.com/sala-de-imprensa/rumo-registra-volume-historico-com-trens-de-120-vagoes-no-primeiro-ano-do-projeto/ Acesso em: 31 mai. 2025.

Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (2022). Relatório da frota Circulante. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2022/RelatorioFrotaCirculante_2022.pdf. Acesso em 31 mai. 2023.

Suksri, D.; Tunasive, P. (2025). Assessment of Greenhouse Gas Emission Reduction Potential in the Road Transport Sector in Thailand. *Clean Technologies*, v. 7, e. 60.

Sposto R.S.; Caldas, L.R.; Neto, A. C. N. (2016). Energia Incorporada e Emissões de CO2 de fachadas de Light Steel Framing no Brasil. *Oculum Ensaios.* Campinas. v. 13 p.163-182.

World Bank Group, (2023). Working for a World Free of Poverty. Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?view=chart. Acesso em: 13 mai. 2025.

World Economic Forum (2019). The Global Competitiveness Report 2019. Genebra. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf. Acesso em: 17 mai. 2025.

Yi, Sirong. *Principles of Railway Location and Design*. Cambridge, MA: Academic Press, 2018.

Me. Oliver de Oliveira Barros Lucena de Aquino (oliverbarros@outlook.com.br)
Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, Zona 7, Maringá, Paraná, Brasil.
Natalíe Francisca Figueiredo Hashimoto (nat_hashimoto@hotmail.com)
Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, Zona 7, Maringá, Paraná, Brasil.
Professor Dr. Generoso De Angelis Neto (ganeto@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Av. Colombo, 5790, Zona 7, Maringá, Paraná, Brasil.
Professora Dra. Rafaela De Angelis Barros (rafaangelis@gmail.com)
Amity University Dubai, Amity University Dubai Campus, P.O. Box 345019, Dubai International Academic City, UAE.

UMA AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DOS IMPACTOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS, AUTÔNOMOS OU COMPARTILHADOS NA MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL

Anna Luíza Nobre Bezerra, Antônio Nélson Rodrigues da Silva
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO
Esta pesquisa aprofunda a avaliação dos impactos percebidos das tecnologias da Mobilidade 4.0 (veículos elétricos, veículos autônomos e mobilidade compartilhada) na mobilidade urbana sustentável, utilizando o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) para hierarquização das alternativas estudadas. A pesquisa integrou revisão sistemática, aplicação de questionário *online* a especialistas da área e análise multicritério fundamentada no Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS). Os resultados indicaram que a mobilidade compartilhada apresentou maior alinhamento com a solução ideal, seguida pelos veículos elétricos e, por último, pelos veículos autônomos. Essa classificação se manteve relativamente consistente, mesmo em diferentes cenários de ponderação em relação aos domínios da mobilidade e aos perfis de conhecimento. O estudo destaca a relevância de decisões baseadas em evidências para o planejamento urbano e formulação de políticas públicas, considerando as múltiplas dimensões da sustentabilidade e os desafios locais.

1. INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias associadas à Mobilidade 4.0, incluindo veículos elétricos, autônomos e mobilidade compartilhada, tem fomentado discussões sobre seus impactos na mobilidade urbana sustentável. Embora se apresentem como alternativas para mitigar congestionamentos, emissões e desigualdades de acesso, existem incertezas quanto à extensão real de seus efeitos nos diferentes domínios da sustentabilidade. Estudos prévios indicam benefícios potenciais, como redução de emissões em veículos elétricos, ganhos de segurança em veículos autônomos e maior eficiência no uso do espaço urbano com soluções compartilhadas (Nanaki e Koroneos, 2016; Fagnant e Kockelman, 2014; Martin e Shaheen, 2011). Entretanto, esses estudos também apontam desafios regulatórios, operacionais e sociais, e as evidências empíricas sobre os impactos percebidos permanecem limitadas, especialmente em contextos locais.

A mobilidade urbana sustentável busca garantir acessibilidade, eficiência e qualidade de vida, minimizando impactos ambientais e sociais (Costa, 2008). Convém diferenciar este conceito do de sustentabilidade urbana, que é mais abrangente e pode envolver habitação, energia, saneamento, meio ambiente e inclusão social. Já a mobilidade urbana sustentável constitui um de seus pilares, concentrando-se nos sistemas de transporte e deslocamento, assegurando que as soluções de mobilidade estejam alinhadas às dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade (McKinsey & Company e Bloomberg, 2016). Nesse contexto, a Mobilidade 4.0 surge como estratégia tecnológica integrada, reunindo veículos elétricos, autônomos e soluções compartilhadas, apoiada em sistemas digitais e conectividade (McKinsey & Company e Bloomberg, 2016; Nikitas *et al.*, 2021). A eletrificação veicular é apontada como alternativa para reduzir emissões, mas enfrenta desafios relacionados ao ciclo de vida de baterias e à extração de minerais críticos (Nanaki e Koroneos, 2016; Peng *et al.*, 2022). Os veículos autônomos prometem ganhos em segurança e eficiência, mas geram questionamentos sobre regulação e possíveis aumentos no volume de viagens (Fagnant e Kockelman, 2014; Bösch *et al.*, 2018). Já a mobilidade compartilhada destaca-se por potencializar uma redução da posse de veículos e otimizar o uso do espaço urbano (Martin e Shaheen, 2011; Machado *et al.*, 2018).

Apesar dos avanços teóricos, ainda são escassos os estudos empíricos integrados que analisem sistematicamente os impactos percebidos. Visando preencher essa lacuna, este estudo aprofunda uma análise preliminar, propondo hierarquizar as tecnologias da Mobilidade 4.0 com o método multicritério TOPSIS, considerando diferentes cenários de ponderação e perfis de conhecimento. Essa abordagem integrada permite análises comparativas mais robustas, apoiando políticas públicas e estratégias locais mais sustentáveis e alinhadas à mobilidade urbana sustentável.

2. METODOLOGIA

Este estudo é um desdobramento do trabalho desenvolvido por Nobre Bezerra e Rodrigues da Silva (2023), no qual foram avaliadas as percepções de especialistas sobre os potenciais impactos das tecnologias associadas à Mobilidade 4.0 (veículos elétricos, veículos autônomos e mobilidade compartilhada) na mobilidade urbana sustentável. A abordagem geral foi estruturada em quatro etapas principais: (i) revisão sistemática da literatura,

(ii) elaboração e aplicação de questionário estruturado, (iii) análise estatística preliminar, e (iv) análise multicritério, conforme exemplificado na Figura 1 e detalhado em Nobre Bezerra (2025).

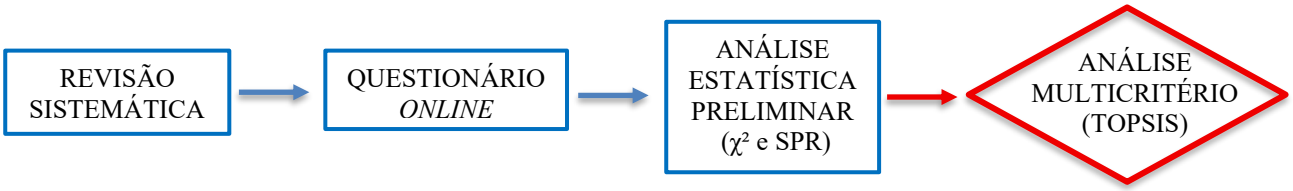


Figura 1 - Sequência de etapas metodológicas adotadas no estudo, destacando a integração entre revisão sistemática, questionário, análise estatística e avaliação multicritério.
Nota: As 3 primeiras etapas, destacadas em azul, referem-se ao estudo realizado por Nobre Bezerra e Rodrigues da Silva (2023), enquanto a quarta etapa (em vermelho) corresponde ao aprofundamento proposto neste estudo.

Na primeira etapa, realizou-se uma revisão sistemática em bases como *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*, que permitiu identificar 18 temas prioritários relacionados aos nove domínios do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), proposto por Costa (2008). Esses temas foram definidos como base para avaliar as percepções dos especialistas sobre os impactos das tecnologias emergentes.

Na segunda etapa, foi elaborado um questionário *online*, aplicado a profissionais, técnicos e especialistas das áreas de planejamento urbano, transportes e mobilidade. O instrumento contemplou 18 sentenças representativas dos temas selecionados, avaliadas em escala (Likert, 1932) de cinco pontos (muito positivo, positivo, neutro/indefinido, negativo e muito negativo). Foram coletadas 320 respostas válidas, considerando perfis com diferentes níveis de conhecimento (somente teórico, prático avançado, prático moderado e nenhum conhecimento).

Na terceira etapa, foram aplicados testes estatísticos de Qui-quadrado (χ^2) e Resíduos Padronizados de Pearson (SPR) para identificar associações entre as tecnologias analisadas, os 18 temas definidos para caracterizar a mobilidade sustentável e o perfil dos respondentes. Esta análise preliminar indicou variações significativas nas percepções, permitindo uma primeira classificação dos impactos como positivos, negativos ou neutros/indefinidos (Nobre Bezerra e Rodrigues da Silva, 2023).

2.1 Aprofundamento com método multicritério

Neste estudo propõe-se a aplicação do método multicritério TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), com o objetivo de hierarquizar as tecnologias da Mobilidade 4.0 a partir das percepções coletadas no estudo de Nobre Bezerra e Rodrigues da Silva (2023). O método TOPSIS, originalmente desenvolvido por Hwang e Yoon (1981), permite ordenar alternativas considerando simultaneamente à distância em relação à solução ideal (ótima) e à solução não ideal (pior), possibilitando uma análise comparativa (Page *et al.*, 2021). Esse tipo de análise é amplamente empregado em pesquisas que buscam entender a influência de diferentes variáveis na priorização de alternativas, permitindo validar a robustez dos resultados obtidos (Nara *et al.*, 2021; Lima e Carpinetti, 2015).

Foram definidos nove cenários de ponderação (Tabela 1), todos com base nos pesos originalmente atribuídos por Costa (2008) para caracterizar a mobilidade urbana sustentável, simulando perspectivas distintas quanto à relevância dos temas e domínios para cada tendência tecnológica. Também foi considerada a estratificação por perfil de conhecimento dos respondentes, a fim de identificar possíveis diferenças nas ordens de preferência de acordo com a experiência prática (moderada ou avançada) ou teórica, sendo considerados mais três cenários posteriores, em uma nova fase, dentro desta última etapa.

Os dados do questionário foram normalizados e convertidos em uma matriz de decisão ponderada, seguindo as etapas clássicas do TOPSIS, porém adaptando a condição do estudo em questão: (i) construção da matriz de decisão normalizada; (ii) aplicação dos pesos aos critérios (domínios); (iii) identificação da solução ideal positiva e negativa; (iv) cálculo das distâncias euclidianas para cada alternativa; e (v) cálculo do índice de similaridade (Ci*), que permite classificar as tecnologias. Essa abordagem possibilitou não apenas avaliar a percepção geral de impacto, mas também quantificar a proximidade de cada tecnologia à solução ideal de mobilidade sustentável, considerando múltiplas dimensões de forma integrada.

Tabela 1 - Distribuição dos cenários e seus respectivos pesos para os níveis de conhecimento.

Cenários	Prático Avançado	Prático Moderado	Somente Teórico	Nenhum Conhecimento	Total
1	1	0	0	0	1
2	0	1	0	0	1
3	0	0	1	0	1
4	0,5	0,5	0	0	1
5	0	0,5	0,5	0	1
6	0,5	0	0,5	0	1
7	0,25	0,25	0,25	0,25	1
8	0,33	0,33	0,33	0	1
9	0,5	0,3	0,2	0	1

3. RESULTADOS

Na etapa de análise multicritério, foram feitas simulações utilizando o método TOPSIS, considerando os pesos atribuídos aos 9 domínios usados para caracterizar a mobilidade sustentável e a estratificação dos respondentes conforme o nível de conhecimento. Inicialmente, foi aplicada uma ponderação igualitária entre os domínios, como forma de estabelecer uma referência para os cenários seguintes. Com base na aplicação do método, foram obtidos os índices de proximidade relativa (C_i^+) para as três tecnologias, nos nove cenários de ponderação dos níveis de conhecimento da Tabela 1. Os resultados obtidos (Tabela 2) revelaram padrões consistentes e variações significativas. Em seguida, foram criados mais 3 situações simulando variações nos pesos, de modo a refletir diferentes percepções de importância entre os domínios considerando respondentes com conhecimento prático avançado, conhecimento prático moderado e somente conhecimento teórico (Tabela 3).

Na primeira simulação, com pesos iguais para todos os domínios, a mobilidade compartilhada apresentou o melhor e mais consistente desempenho entre as tecnologias avaliadas. Estes resultados indicam uma preferência geral dos especialistas pela tecnologia como a mais alinhada aos objetivos de sustentabilidade urbana. Os veículos autônomos apresentaram um desempenho intermediário, caracterizado por consistência moderada no ranking de posições, e valores absolutos de C_i^+ relativamente baixos. Ao longo dos nove cenários simulados, mantiveram-se na segunda posição em oito cenários, com exceção do Cenário 5 (peso concentrado em Conhecimento Teórico e Prático Moderado), única condição em que foram superados pelos veículos elétricos.

Além disso, ao estratificar os resultados segundo o nível de conhecimento dos respondentes (teórico, prático moderado ou prático avançado), os valores obtidos evidenciaram que a mobilidade compartilhada apresentou um desempenho consistentemente superior em todas as situações, independentemente da priorização de domínios ou do perfil de conhecimento considerado. Por sua vez, os veículos autônomos foram a tecnologia que apresentou maior sensibilidade à variação de pesos dos domínios e ao perfil de conhecimento dos especialistas.

Tabela 2 - Índices de proximidade relativa (C_i^+) para as três tecnologias, nos nove cenários de ponderação dos níveis de conhecimento, realizadas durante processo do TOPSIS.

Nota: O *ranking* está simbolizado pela letra R, E = veículos elétricos, A = veículos autônomos e C = mobilidade compartilhada.

TENDÊNCIAS	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2		CENÁRIO 3		CENÁRIO 4		CENÁRIO 5		CENÁRIO 6		CENÁRIO 7		CENÁRIO 8		CENÁRIO 9	
	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R
E	0,132	3	0,219	3	0,170	3	0,154	3	**0,229**	**2**	0,173	3	0,193	3	0,180	3	0,160	3
A	0,350	2	0,231	2	0,304	2	0,283	2	**0,195**	**3**	0,270	2	0,296	2	0,246	2	0,274	2
C	0,892	1	0,984	1	0,951	1	0,939	1	**0,968**	**1**	0,926	1	0,909	1	0,945	1	0,933	1

Tabela 3 - Resultado das situações para identificar a sensibilidade dos domínios da mobilidade através da variação do peso, em três situações, conforme o nível de conhecimento dos especialistas.
Nota: Situação 1: 100% Conhecimento Prático Avançado (CPA). Situação 2: 100% Conhecimento Prático Moderado. Situação 3: 100% Somente Conhecimento Teórico.

SITUAÇÃO	TENDÊNCIAS	DOMÍNIO 1		DOMÍNIO 2		DOMÍNIO 3		DOMÍNIO 4		DOMÍNIO 5		DOMÍNIO 6		DOMÍNIO 7		DOMÍNIO 8		DOMÍNIO 9	
		(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R	(C_i^+)	R
1	E	0,132	3	0,132	3	0,102	3	0,109	3	0,106	3	0,120	3	0,145	3	0,144	3	0,179	3
	A	0,350	2	0,350	2	0,482	2	0,312	2	0,325	2	0,320	2	0,344	2	0,322	2	0,328	2
	C	0,892	1	0,892	1	0,836	1	0,907	1	0,910	1	0,901	1	0,895	1	0,907	1	0,897	1
2	E	0,219	3	**0,232**	**2**	0,195	3	**0,251**	**2**	0,182	3	0,195	3	0,208	3	**0,214**	**2**	**0,278**	**2**
	A	0,248	2	**0,219**	**3**	0,271	2	**0,198**	**3**	0,204	2	0,283	2	0,223	2	**0,203**	**3**	**0,199**	**3**
	C	0,969	1	**0,984**	**1**	0,985	1	**0,987**	**1**	0,988	1	0,985	1	0,985	1	**0,985**	**1**	**0,986**	**1**
3	E	0,253	3	**0,263**	**2**	0,224	3	**0,267**	**2**	**0,207**	**2**	**0,244**	**2**	**0,245**	**2**	**0,256**	**2**	**0,316**	**2**
	A	0,254	2	**0,194**	**3**	0,306	2	**0,173**	**3**	**0,160**	**3**	**0,175**	**3**	**0,196**	**3**	**0,183**	**3**	**0,187**	**3**
	C	0,923	1	**0,956**	**1**	0,942	1	**0,963**	**1**	**0,964**	**1**	**0,960**	**1**	**0,955**	**1**	**0,958**	**1**	**0,957**	**1**

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método multicritério TOPSIS complementam as análises realizadas por Nobre Bezerra e Rodrigues da Silva (2023), permitindo uma hierarquização das tecnologias emergentes da Mobilidade 4.0 em relação à mobilidade urbana sustentável. De maneira geral, a mobilidade compartilhada consolidou-se como a alternativa mais alinhada aos objetivos de sustentabilidade urbana, seguida pelos veículos elétricos e, por fim, pelos veículos autônomos. A aplicação do TOPSIS permitiu explorar diferentes cenários de ponderação dos domínios do IMUS e considerar o nível de conhecimento dos especialistas, fornecendo uma avaliação mais detalhada e robusta. Essa abordagem evidenciou que as percepções sobre os impactos das tecnologias analisadas não são homogêneas, variando em função do perfil técnico dos respondentes e das prioridades atribuídas a cada domínio da sustentabilidade.

Além de contribuir para o avanço do conhecimento sobre a Mobilidade 4.0, os resultados apresentados reforçam a necessidade de políticas públicas segmentadas e fundamentadas em evidências, considerando as especificidades locais, os desafios operacionais e as diferentes dimensões que compõem a mobilidade urbana sustentável. A utilização de métodos multicritério, como o TOPSIS, mostrou-se uma alternativa promissora para apoiar a tomada de decisão no planejamento urbano e na formulação de estratégias para implementação de tecnologias emergentes. Como sugestões para pesquisas futuras, destaca-se a importância de investigações qualitativas complementares, estudos longitudinais em contextos urbanos específicos e análises comparativas entre diferentes regiões, de modo a aprofundar a compreensão dos impactos percebidos e monitorar a evolução das tecnologias da Mobilidade 4.0 ao longo do tempo.

Dentro do panorama da mobilidade urbana global observa-se uma indicação de transição gradual em direção à denominada Mobilidade 5.0. Essa abordagem amplia os princípios da Mobilidade 4.0 ao incorporar tecnologias avançadas, como inteligência artificial, computação em nuvem, Internet das Coisas (IoT), veículos autônomos conectados, fontes de energia renovável e sistemas ciberfísicos, com o objetivo de desenvolver redes de transporte mais inteligentes, responsivas e sustentáveis. A Mobilidade 5.0, portanto, reforça a necessidade de um planejamento urbano dinâmico e participativo, no qual a equidade social e o uso racional de recursos naturais estejam no centro das decisões estratégicas.

As percepções coletadas e analisadas com rigor metodológico contribuem para o fortalecimento de um campo inovador de investigação, que precisa considerar, desde já, os desdobramentos da Mobilidade 5.0 na formulação de políticas públicas, desenvolvimento de soluções tecnológicas e estruturação de sistemas urbanos mais inteligentes e inclusivos.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bösch, P. M.; F. Becker; H. Becker e K. W. Axhausen (2018). Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy*, v. 64, p. 76-91. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.09.005.

Costa, M. S. (2008) *Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável.* Tese (Doutorado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. DOI: 10.11606/T.18.2008.tde-01112008-200521

Fagnant, D. J. e K. M. Kockelman (2014) The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 40, p. 1-13. DOI: 10.1016/j.trc.2013.12.001.

Hwang, C. L. e K. Yoon, (1981) *Multiple attribute decision making: Methods and applications - A State-of-the-Art Survey.* New York: Springer-Verlag. DOI:10.1007/978-3-642-48318-9.

Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, v. 22, n. 140, p. 1-55.

Lima, F. R. e L. C. R., Carpinetti (2015). Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. *Gestão & Produção*, v. 22, n. 1, p. 17-34. DOI: 10.1590/0104-530X1190

Machado, C. A.; N. P. de Salles Hue; F. T. Berssaneti e J. A. Quintanilha (2018) An overview of shared mobility. *Sustainability*, v. 22, p. 4342. DOI: 10.3390/su10124342.

Martin, E. W. e S. A. Shaheen (2011) Greenhouse gas emission impacts of carsharing in North America. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 4, p. 1074-86. DOI: 10.1109/TITS.2011.2158539.

McKinsey & Company e Bloomberg (2016) *An integrated perspective on the future of mobility.* Disponível em: https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2016/10/BNEF_McKinsey_The-Future-of-Mobility_11-10-16.pdf.

Nanaki, E. A. e C. J. Koroneos (2016) Climate change mitigation and deployment of electric vehicles in urban areas. *Renewable Energy*, v. 99, p. 1153-60. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.006.

Nara, E. O. B.; M. B. da Costa; I. C. Baierle; J. L. Schaefer; G. B. Benitez; L. M. A. dos Santos; L. B. Benitez (2021) Expected impact of Industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry. *Sustainable Production and Consumption*, v. 25, p. 102–122. DOI: 10.1016/j.spc.2020.07.018.

Nikitas, A.; N. Thomopoulos e D. Milakis (2021) The environmental and resource dimensions of automated transport: A nexus for enabling vehicle automation to support sustainable urban mobility. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 46, p. 1, p. 167-192. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-024657.

Nobre Bezerra, A. L. (2025). *Mobilidade 4.0: Potenciais impactos de veículos elétricos, autônomos ou compartilhados na mobilidade urbana sustentável.* Dissertação (Mestrado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Nobre Bezerra, A. L. e A. N. Rodrigues da Silva (2023) *Mobilidade 4.0: Potenciais impactos de veículos elétricos, autônomos ou mobilidade compartilhada na mobilidade urbana sustentável.* In: Anais do XXXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Santos, SP). Galoá, 2023. Disponível em: https://proceedings.science/anpet-2023/trabalhos/mobilidade-40-potenciais-impactos-de-veiculos-eletricos-autonomos-ou-mobilidade?lang=pt-br. Acesso em: 03 jul. 2025.

Page, M. J.; J. E. McKenzie; P. M. Bossuyt; I. Boutron; T. C. Hoffmann; C. D. Mulrow, ... e D. Moher (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71. DOI: 10.1136/bmj.n71.

Peng, Z.; Y. Yang; R. Wu, X. Tan e H. Xu (2022) Accessibility analysis of battery electric vehicles: A case study of Beijing Tianjin Hebei. In: *E3S Web of Conferences - (Vol. 360, 2022 8th International Symposium on Vehicle Emission Supervision and Environment Protection - VESEP2022)*. DOI: 10.1051/e3sconf/202236001029.

Silva, A. C. A. C. da e N. D. Pizzolato (2022). Using electric vehicles for freight transport purposes and challenges to do an implementation in Brazil. *Ambiente & Sociedade*, v. 25, e01832. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20210183r2vu2022L3OA.

Anna Luiza Nobre Bezerra (annaluizanb@usp.br)
Antônio Nélson Rodrigues da Silva (anelson@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - São Carlos, SP, Brasil

Transporte e Meio Ambiente

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

RESILIÊNCIA DE INFRAESTRUTURA E REDES DE TRANSPORTE A EVENTOS CLIMÁTICOS DISRUPTIVOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Giovana Denardi Parcianello, Alexandre Grings, Vanessa Teresinha Alves, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Este estudo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre a resiliência das infraestruturas e redes de transportes terrestres diante de eventos disruptivos, por meio da metodologia ProKnow-C e da ferramenta Bibliometrix. A análise dos 93 artigos selecionados evidenciou três núcleos temáticos: infraestrutura de transportes, aspectos de resiliência e transporte ferroviário, com destaque para os dois primeiros, amplamente interconectados. Termos como redes de transporte, avaliação de risco e eventos disruptivos apareceram com frequência, revelando a centralidade dessas temáticas na discussão científica atual. Ademais, observou-se que infraestrutura e rede são conceitos distintos, porém complementares na construção de sistemas de transporte resilientes. A organização dos temas por centralidade e densidade mostrou que, embora bem desenvolvidos, ainda existem lacunas importantes, especialmente quanto à ausência de metodologias e de ferramentas robustas para avaliar a resiliência frente às mudanças climáticas. Diante disso, reforça-se a necessidade de abordagens integradas que combinem esses aspectos em futuras pesquisas.

1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas de transportes, destacam-se dois conceitos fundamentais para sua funcionalidade que, apesar de serem fortemente conectados, são distintos: as infraestruturas e as redes de transporte (Martín *et al*., 2021). As infraestruturas fazem referência aos ativos físicos indispensáveis para a mobilidade como rodovias, pontes, túneis e ferrovias (Argyroudis *et al*., 2019). Já as redes de transportes dizem respeito à forma como esses elementos estão organizados e interconectados, incluindo os fluxos de pessoas e mercadorias que circulam por meio deles (Whitman *et al*., 2017).

Nesse contexto, cabe destacar que, nas últimas décadas, eventos climáticos e meteorológicos extremos têm se tornado mais frequentes e intensos em diferentes regiões do mundo, impactando diretamente as infraestruturas e as redes de transporte terrestre, especialmente rodovias e ferrovias. Esses episódios, como terremotos, tempestades e inundações, são comumente classificados como eventos disruptivos (Dong et al., 2020) e provocam atrasos e interrupções no funcionamento do sistema, instabilidade de taludes e sobrecarga nos sistemas de drenagem (Argyroudis *et al*., 2019). Assim, impactam o deslocamento de pessoas, o fluxo de mercadorias e o acesso a serviços essenciais. As consequências incluem, ainda, prejuízos econômicos significativos oriundos dos danos materiais, dos custos de reparo e das perdas de produtividade associadas à paralisação de vias e ao tempo de recuperação (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019).

Dessa forma, a crescente vulnerabilidade das infraestruturas e das redes de transporte destaca a urgência de aumentar sua resiliência, ou seja, sua capacidade de manter e restaurar os níveis de serviço durante e após situações de crise, considerando inclusive os custos de mitigação (Wang *et al*., 2019). Assim, estudos voltados à mensuração da resiliência, incorporando múltiplas dimensões como criticidade dos riscos, importância estratégica das infraestruturas e magnitude dos impactos se tornam cada vez mais relevantes (Martín *et al*., 2021). Ademais, a literatura aponta diversos aspectos das infraestruturas e das redes como essenciais para garantir a funcionalidade e a resiliência dos sistemas de transporte terrestre. Portanto, ambos os componentes devem ser considerados na formulação de métricas a fim de aprimorar a resiliência diante dos desafios atuais e futuros (Bi *et al*., 2023).

Diante disso, esta revisão sistemática da literatura tem como objetivo analisar as principais áreas temáticas associadas à resiliência das infraestruturas e das redes de transporte terrestre e suas inter-relações, além de identificar o grau de relevância e desenvolvimento desses campos do conhecimento. O trabalho busca também mapear lacunas existentes na literatura, orientando pesquisas futuras. Para tanto, a revisão selecionou as publicações mais relevantes sobre o tema, garantindo rigor científico e atualidade na abordagem.

2. METODOLOGIA

Para a formação de um portfólio bibliográfico completo e abrangente, a revisão sistemática foi conduzida com base na metodologia ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), reconhecida por sua

capacidade de combinar critérios de relevância científica e originalidade. A referida metodologia promove uma sistematização rigorosa da pesquisa e permite a identificação eficiente dos estudos mais pertinentes (Oestreich *et al*., 2024). Para isso, o ProKnow-C se estrutura em múltiplas etapas, começando pela definição das palavras-chave e a *string* de busca, a escolha das bases de dados (*Scopus* e *Web of Science*, as mais relevantes na área da engenharia) e os filtros iniciais: período de publicação (últimos 10 anos: 2014–2024), área temática (Engenharia) e tipo de documento (artigos científicos). Após a construção final do portfólio bibliográfico, procedeu-se às análises dos artigos selecionados, incluindo tanto aspectos bibliométricos quanto o conteúdo dos estudos.

As etapas do processo, bem como seus respectivos resultados, estão representadas na Figura 1. A análise bibliométrica foi realizada com o auxílio da extensão Bibliometrix, desenvolvida em linguagem Python e integrada ao software RStudio (Aria e Cuccurullo, 2017). Para identificar as áreas temáticas e suas inter-relações, investigaram-se as palavras-chave com base na frequência e co-ocorrência entre elas. Em seguida, o mapa temático é construído pela análise das palavras chave, que identifica padrões de coocorrência entre termos em documentos científicos e os organiza em clusters representativos de temas de pesquisa. Em seguida, técnicas de normalização e visualização estruturam esses temas em mapas que evidenciam o grau de relevância e de desenvolvimento ao longo do tempo (Cobo *et. al*., 2011).

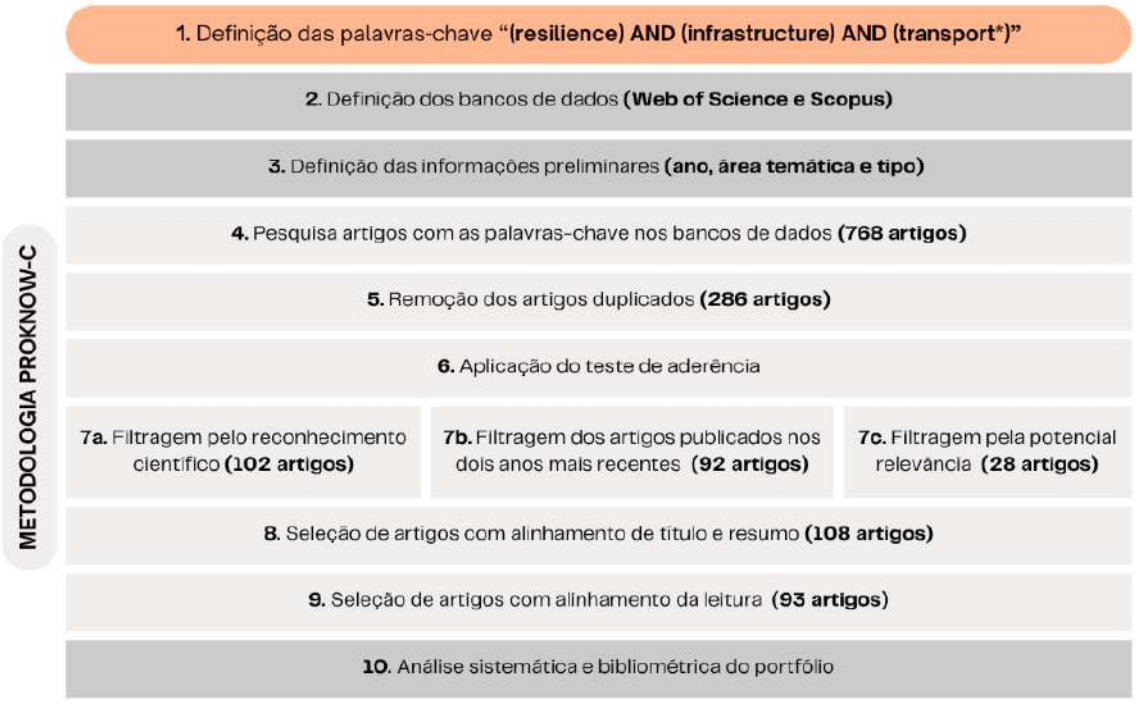


Figura 1: Metodologia da Revisão Sistemática de Literatura

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos 93 artigos incluídos no portfólio bibliográfico (Figura 2) revelou três agrupamentos principais de palavras-chave (*clusters*). Dois deles, mais amplos e interconectados, estão centrados nos conceitos de infraestrutura de transporte (Cordero *et al*., 2024) e resiliência (Bi *et al*., 2023), enquanto o terceiro, de menor dimensão e mais isolado, refere-se ao transporte ferroviário (Chan e Schofer, 2016). No cluster de resiliência, destacam-se termos associados à tomada de decisão (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019), eventos disruptivos (Martín et al., 2021) e análise de risco (Wang et al., 2020). Já no *cluster* de infraestrutura, prevalecem palavras-chave relacionadas às redes de transporte (Faturechi e Miller-Hooks, 2015) e aos elementos dos sistemas de transporte (Twumasi-Boakye e Sobanjo, 2019), refletindo a forte interdependência entre esses conceitos. A presença limitada de estudos sobre o modo ferroviário evidencia a predominância das pesquisas voltadas às redes rodoviárias e a abordagem fragmentada do tema.

Esses resultados revelam uma forte convergência temática entre avaliação de risco, resiliência, redes e sistemas

de transporte, mudanças climáticas e infraestrutura de transportes (Argyroudis *et al*., 2019; Cordero et al., 2024). Essa interconexão reforça a importância de uma abordagem integrada, que contemple tanto os aspectos físicos das infraestruturas quanto a organização e a interdependência das redes. A expressiva relevância do tema, no cenário científico internacional, evidencia a necessidade de expandir essas investigações para distintos contextos geográficos, promovendo o desenvolvimento de sistemas de transporte mais resilientes e adaptáveis.

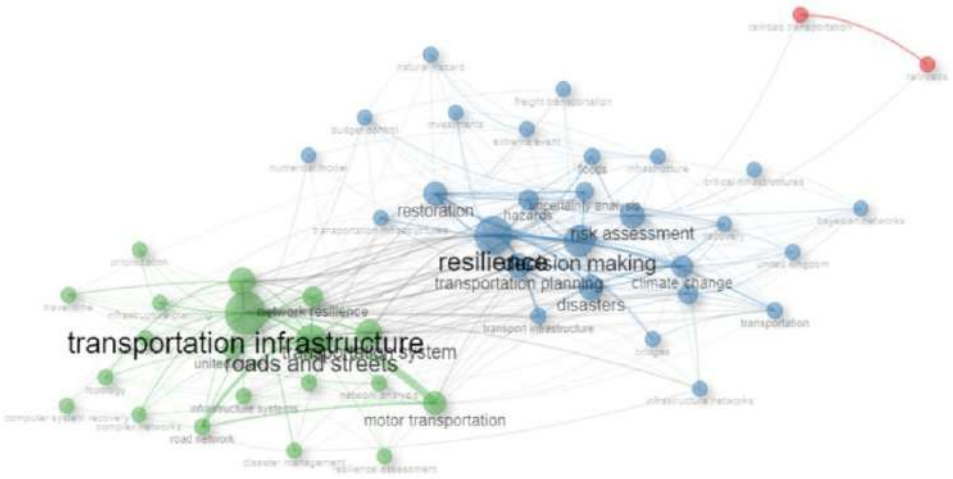


Figura 2: Rede de co-ocorrência de palavras-chave de estudos sobre resiliência em infraestruturas e redes de transportes

Complementando essa análise, a Figura 3 apresenta as principais palavras-chave organizadas em quatro quadrantes temáticos: temas motores, temas de nicho, temas básicos e temas emergentes ou em declínio. Cada quadrante contém *clusters* de correlação dispostos com base em dois eixos: centralidade (eixo X), que indica o grau de interação com outros grupos, e densidade (eixo Y), que reflete o nível de coesão interna entre os termos. Assim, quanto mais à direita o cluster se posiciona, maior é sua conexão temática com os demais; quanto mais acima, maior a consistência interna do grupamento. O tamanho de cada *cluster* também é relevante, representando a quantidade de termos agrupados, sendo identificado pelas três palavras mais frequentes em seu interior.

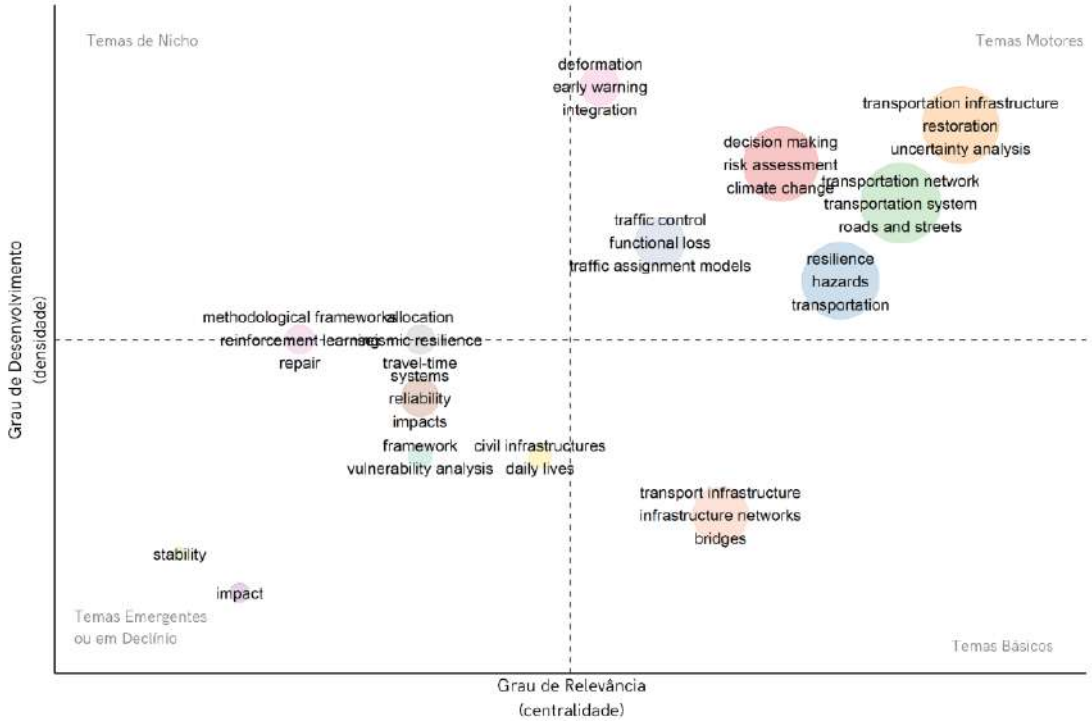


Figura 3: Quadrantes Temáticos de estudos sobre resiliência em infraestruturas e redes de transportes

A análise da Figura 3 evidencia que o quadrante dos temas motores, caracterizado por alta centralidade e densidade, reúne tópicos altamente relevantes e bem estruturados, considerados os pilares conceituais deste estudo. Nesse grupo, destacam-se temas associados à infraestrutura de transportes (Faturechi e Miller-Hooks, 2015; Argyroudis *et al*., 2019; Cordero *et al*., 2024), destacados na cor salmão, a redes de transporte (Martín *et al*., 2021), em verde, à resiliência, em azul, e à avaliação de risco voltada à tomada de decisão frente às mudanças climáticas (Wang *et al*., 2020), em rosa. Esses temas demonstram forte coesão interna e elevada interconectividade, reforçando sua centralidade no campo da pesquisa sobre o assunto.

No quadrante dos temas básicos, que apresenta alta centralidade e baixa densidade, sobressaem-se tópicos relacionados à infraestrutura e a redes de transporte (Martín *et al*., 2021; Cordero *et al*., 2024), com ênfase em estruturas como pontes. Isso sugere que, embora amplamente explorado no passado, esse campo tem recebido menos atenção em pesquisas recentes, sendo relativamente marginalizado em termos de desenvolvimento atual (Dong *et al*., 2020). Por sua vez, o quadrante dos temas de nicho inclui tópicos com alta densidade e baixa centralidade, indicando áreas bem desenvolvidas internamente, porém com pouca articulação com outros campos do conhecimento. Enquanto os temas emergentes ou em declínio, com baixa densidade e centralidade, representam tópicos em fase inicial de exploração, ainda pouco conectados ao corpo teórico consolidado. Apesar disso, possuem potencial para se tornarem centrais à medida que ganhem maturidade e integração com outras áreas de pesquisa.

Observa-se, portanto, uma lacuna de metodologias (Faturechi e Miller-Hooks, 2015), em rosa claro, e de ferramentas, em azul claro, capazes de avaliar a resiliência frente a eventos climáticos disruptivos de forma a integrar os conceitos de infraestrutura e rede, que, embora distintos, são complementares (Argyroudis et al., 2019). Isso porque a maioria dos estudos analisa esses conceitos de maneira isolada, como os de Wang *et al*. (2020) e de Whitman *et al.* (2017), que avaliam as redes de transportes através, respectivamente, do raciocínio bayesiano difuso e da análise multicritério, enquanto Bi *et al* (2023) e Cordero *et al* (2024) investigam apenas aspectos associados às infraestruturas por meio da entropia e da avaliação de desempenho. Com isso, é demandado um redirecionamento de esforços de pesquisa para essa área.

Esses resultados demonstram que infraestruturas e redes de transporte, embora conceitos distintos, são complementares e fundamentais para garantir a funcionalidade e a resiliência dos sistemas de mobilidade. Sua inter-relação, especialmente no contexto de adaptação a eventos disruptivos, reforça a necessidade de se compreender suas diferenças como base para o planejamento eficaz e resiliente do setor de transportes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado deste estudo, que teve como objetivo analisar as principais áreas temáticas das pesquisas científicas recentes sobre resiliência em infraestruturas e redes de transportes, e suas inter-relações, bem como determinar o grau de relevância e desenvolvimento desses campos do conhecimento, constatou-se uma forte articulação entre as características dos sistemas de transporte, os indicadores de resiliência e as estratégias de avaliação de risco aplicadas à tomada de decisão diante das mudanças climáticas. Embora infraestrutura e rede sejam conceitos distintos, demonstram-se complementares no contexto do planejamento e da gestão de sistemas de transporte. Compreender essas diferenças se torna, portanto, essencial para avaliar seus impactos e potencialidades.

Além disso, a revisão identificou uma lacuna relevante na literatura quanto à disponibilidade de metodologias e ferramentas que avaliem, de forma integrada, a resiliência frente a eventos disruptivos. Diante desse cenário, recomenda-se que futuras pesquisas adotem abordagens metodológicas combinadas, capazes de contemplar tanto a vulnerabilidade estrutural quanto os impactos funcionais causados por eventos disruptivos, a fim de subsidiar intervenções mais eficazes no fortalecimento da resiliência dos sistemas de transporte terrestre.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processo 305384/2025-2), da CAPES (Processo 23081031933/2024-77) e da FAPERGS (Processo 24/25510001005-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argyroudis, S. A.; S. A. Mitoulis; M. G. Winter e A. M. Kaynia (2019) Fragility of transport assets exposed to multiple

hazards: State-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 191.
Aria, M. e C. Cuccurullo (2017) Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975.
Bi, W.; K. MacAskill e J. Schooling (2023) Old wine in new bottles? Understanding infrastructure resilience: Foundations, assessment, and limitations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 120, 103793.
Chan, R. e J. L. Schofer (2016). Measuring Transportation System Resilience: Response of Rail Transit to Weather Disruptions. *Natural Hazards Review*, 17(1).
Cobo, M. J.; A. G, López-Herrera; E. Herrera-Viedma e F. Herrera (2011) An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: a practical application to the fuzzy sets theory field. *Journal of Informetrics*, 5(1), 146–166.
Cordero, F.; J. J. Lamondia e B. F. Bowers (2024) Performance Measure-Based Framework for Evaluating Transportation Infrastructure Resilience. *Transportation Research Record*, 2678(5), 601–616.
Dong, S.; A. Mostafizi; H. Wang; J. Gao e X. Li (2020) Measuring the Topological Robustness of Transportation Networks to Disaster-Induced Failures: A Percolation Approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(2).
Faturechi, R. e E. Miller-Hooks (2015) Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(1).
Martín, B.; E. Ortega; R. Cuevas-Wizner; A. Ledda e A. de Montis (2021) Assessing road network resilience: An accessibility comparative analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102851.
Oestreich, L.; Á. Neuenfeldt Júnior e A. Ruiz-Padillo (2024) Guidelines to promote sustainable transport in higher education universities: A bibliometric and systematic review. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 25(8), 1912–1928.
Twumasi-Boakye, R. e J. Sobanjo (2019) Civil infrastructure resilience: state-of-the-art on transportation network systems. *Transportmetrica A: Transport Science*, v. 15, n. 2, p. 455–484, 2019.
Wang, T.; Z. Qu; Z. Yang; T. Nichol; D. Dimitriu; G. Clarke e D. Bowden (2019) How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? By creating a climate adaptation framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 403–424.
Whitman, M. G.; K. Barker; J. Johansson e M. Darayi (2017) Component importance for multi-commodity networks: Application in the Swedish railway. *Computers and Industrial Engineering*, 112, 274–288.

Giovana Denardi Parcianello (giovana.denardi@acad.ufsm.br)
Alexandre Grings (grings.alexandre@acad.ufsm.br)
Vanessa Teresinha Alves (vanessa.alves@ufsm.br)
Alejandro Ruiz-Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria,
Av. Roraima, n° 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

Transporte e Meio Ambiente

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

LOGÍSTICA DA SOJA NA AMAZÔNIA: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS ALINHADAS AOS ODS

Ellyedson Azevedo Cavalheiro[1], Daniel Oliveira Rodrigues[1], Guilherme Santos Lucca[2] Harlenn dos Santos Lopes[1,2] Renato da Silva Lima[2],
[1]Universidade Federal do Pará, [2]Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de soja. Sua produção se expande na região Amazônica e suas exportações já utilizam consideravelmente os portos do Arco Norte, com rotas que percorrem longas distâncias em toda a região. Esta pesquisa busca alinhar a expansão agrícola ao desenvolvimento sustentável. A partir da estruturação do sistema e suas rotas de transporte, foram relacionados 15 impactos nas três dimensões de sustentabilidade (Ambiental, Social e Econômica), propondo soluções mitigadoras alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Posteriormente, foi implementado um modelo de otimização das emissões de CO_2 para rotas na Amazônia, buscando as melhores alternativas e configurações para o escoamento da soja brasileira pela Amazônia. Os resultados deste modelo indicam o uso da multimodalidade e a transição energética para redução de Gases de Efeito Estufa (GEE), tornando o transporte de soja mais sustentável na região.

1. OBJETIVO

Propor soluções de alinhamento do transporte de soja na Amazônia brasileira aos ODS, identificando impactos, propondo soluções e implementando métodos para tornar o transporte de grãos mais sustentável na região.

2. METODOLOGIA

Após um período de revisão bibliográfica para entendimento do sistema, identificou-se os impactos ambientais, sociais e econômicos, relacionando com os ONU (ONUBRASIL, 2025). Assim, foram propostas soluções para os impactos. A delimitação da pesquisa durante a iniciação científica está apresentado na Figura 1.



Figura 1: Delimitação do ambiente da pesquisa realizada. Fonte: autores.

Após o entendimento sistêmico do ambiente de pesquisa, foi desenvolvido um modelo de otimização baseado em programação linear para minimização das emissões de CO_2, estruturando rotas atuais e projetadas, uni e multimodais, para os portos da região Amazônica. A agregação geográfica das origens se deu no nível de microrregiões e abrangeu todos os estados pertencentes à Amazônia brasileira (IBGE, 2025).

3. RESULTADOS OBTIDOS

A estruturação e solucionamento da problemática está contida na Tabela 1. Esta estruturação também permitiu a implementação de um modelo quantitativo de otimização para minimização de emissões, com 14 cenários comparativos com e sem restrições nos portos, com projeções atuais e para o ano 2034, incorporando o uso biodiesel, permitindo uma análise comparativa de possibilidades, visando a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). A Figura 1 apresenta os resultados gerais comparativos entre os cenários.

Tabela 1: Análise sustentável do transporte de soja na Amazônia. Fonte: Autores, baseados em ONUBRASIL (2025).

Dimensão	Impacto identificado	Cód.	ODS	Solução proposta
Ambiental	Poluição de água - rodovias	IA1	6	Sistemas de drenagem e contenção; monitoramento da qualidade da água; controle de emissões
	Emissão de CO_2	IA2	13	Intermodalidade com ênfase em ferrovias e hidrovias
	Matriz energética e combustíveis fósseis	IA3	13	Biocombustíveis e tecnologias de baixo carbono

	Alteração dos leitos dos rios - ecossistemas aquáticos	IA4	14	Realizar Avaliações ambientais estratégicas; empregar técnicas menos invasivas de dragagem
	Redução da pesca e perda de biodiversidade fluvial	IA5	14	Incentivar manejo pesqueiro sustentável e medidas de conservação da biodiversidade
	Desmatamento e degradação de habitas por obras	IA6	15	Planejamento territorial com corredores ecológicos e fiscalização no licenciamento ambiental
	Acesso facilitado à grilagem e extração ilegal	IA7	12	Ampliar fiscalização fundiária e ambiental com uso de geotecnologias e bases de dados integradas
Social	Conflitos fundiários e violação direito - povos tradicionais	IS1	10	Garantir consulta livre, prévia e informada; acelerar titulação de áreas tradicionais
	Exclusão social e econômica	IS2	10	Capacitação e inserção da população na cadeia logística
	influência no modo de vida da população tradicional	IS3	10	Políticas de salvaguarda cultural e territorial com participação comunitária
	Exposição de povos isolados a doenças e poluentes	IS4	3	Ampliar vigilância epidemiológica e acesso à saúde básica.
Econômica	Minimização de distância a mercados consumidores	IE1	9	Planejamento integrados das rotas
	Custos e competitividade de combustíveis	IE2	9	Renovação e manutenção de frota rodoviária. Uso de energias renováveis.
	Perdas de soja no transporte	IE3	9, 12	Projetos de infraestrutura com integração modal

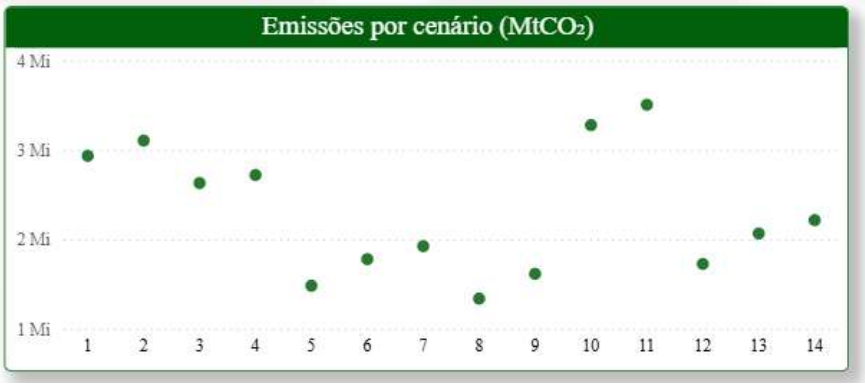


Figura 1: Resultados das emissões, em Milhões de $MtCO_2$, por cenário implementado. Fonte: Autores.

4. CONCLUSÕES

A logística da soja na Amazônia apresenta desafios de sustentabilidade. Nesta pesquisa, seus impactos ambientais, sociais e econômicos foram correlacionados aos ODS da ONU para proposição de soluções mitigadoras. A pesquisa demonstrou a viabilidade de sistemas de transporte mais sustentáveis na região, priorizando decisões que vão além da competitividade de custos para minimizar os impactos locais. Medidas como a intermodalidade, uso de energias limpas e o fortalecimento do planejamento socioambiental são essenciais para equilibrar o desenvolvimento econômico com a conservação do bioma amazônico e o bem-estar das comunidades, contribuindo para a agenda global de sustentabilidade da ONU.

Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq, FAPEMIG e FAPESPA pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IBGE. (2025) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>. (Acesso em: 30/06/2025).

ONU BRASIL (2025) Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. (Acesso em: 30/06/2025).

Ellyedson Azevedo Cavalheiro (ellyedson.cavalheiro@abaetetuba.ufpa.br), *Daniel Oliveira Rodrigues* (daniel.rodrigues@abaetetuba.ufpa.br), *Harlenn dos Santos Lopes* (harlenn@ufpa.br) UFPA, Campus de Abaetetuba, Faculdade de Engenharia Industrial, Trav. Manoel de Abreu s/n, Mutirão, Abaetetuba-PA, Brasil.

Guilherme Santos Lucca (delucca1717@gmail.com), *Renato da Silva Lima* (rslima@unifei.edu.br), UNIFEI, IEPG, Rua BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá- MG, Brasil.

REVISÃO DE LITERATURA SOBRE EMISSÕES E TRANSPORTE: APLICAÇÕES ESTATÍSTICAS NA PREVISÃO E AVALIAÇÃO DE POLUENTES

Alberto Maurício Souza Corrêa[1], **Carlos Eduardo Sanches de Andrade**[2], **Cintia Campos**[3]
[1,2,3]Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciência e Tecnologia

RESUMO
Este relatório retrata o desenvolvimento de uma revisão de literatura, realizada durante o ciclo de iniciação científica em 2025, com o objetivo de identificar métodos estatísticos para a previsão de emissões dos gases do efeito estufa emitidos no setor dos transportes ao redor do mundo. Para tal, foram selecionadas cinco plataformas distintas com o uso de dois idiomas. Assim foram selecionados os trabalhos que compuseram a revisão de literatura. Os resultados apontam como essas ferramentas são empregadas para identificar padrões e antecipar cenários futuros, contribuindo para soluções ambientais mais eficientes. Ao considerar o impacto de diversos fatores dos veículos nas emissões, este trabalho destaca que a aplicação de metodologias estatísticas possibilita não apenas uma compreensão aprofundada dos desafios, mas também a concepção de estratégias que promovam uma mobilidade urbana mais sustentável.

1. OBJETIVO

A preocupação recente e crescente com os impactos das mudanças climáticas levou a uma ampliação de estudos voltados a quantificação e previsão das emissões de GEE. A aplicação de modelos matemáticos e estatísticos, tais como séries temporais e modelos econométricos de regressão, tem se revelado um instrumento útil para entender o consumo de combustíveis e as estimativas de emissões relacionadas aos transportes (Araújo e Lobato, 2020; Oliveira *et al.,* 2015). Portanto, o estudo teve por objetivo identificar na literatura disponível contribuições sobre o uso de modelos matemáticos e estatísticos na avaliação de dados operacionais de sistemas de transporte, concentrando-se nas emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes em geral buscando compreender como essas ferramentas analíticas são empregadas para quantificar, prever e analisar os impactos ambientais decorrentes da mobilidade.

2. METODOLOGIA

Este estudo obteve os textos através do uso das seguintes palavras-chave: "emissões", "Estatística", "biocombustíveis", "transportes" e "previsão". Além de ter sido pesquisadas também na língua inglesa. Posteriormente, foram realizadas pesquisas sobre esses tópicos através de pesquisas no Google Acadêmico, Periódicos Capes, *Springer Link*, sistema BASE e *Refseek*. Com base nessas pesquisas, foram escolhidos artigos científicos, teses e outras produções acadêmicas que abordaram a utilização de estatísticas técnicas na avaliação e análise das emissões produzidas pelos meios de transporte. Esta estratégia possibilitou a elaboração de uma visão mais completa e moderna da literatura, reforçando a base teórica do estudo.

3. PRINCIPAIS RESULTADOS

Um estudo de Solaymani (2023) na Malásia, usando modelos dinâmicos ARDL e KRLS, indicou que aumentar em 1% o uso de biodiesel de palma pode reduzir as emissões de CO_2 do transporte rodoviário em 0,004% a longo prazo. A pesquisa destaca a necessidade de políticas públicas para impulsionar o biodiesel, apesar de sua baixa participação atual.

Um estudo de Djordjević e Krmac (2019) na Europa utilizou DEA não radial e TOPSIS para analisar a eficiência do transporte, considerando insumos e outputs desejáveis/indesejáveis, como emissões de GEE. Os resultados apontaram aumento da eficiência rodoviária e declínio ferroviário, destacando a importância da integração de métodos estatísticos para políticas de redução de emissões.

No estudo de Araújo e Lobato (2020), uma investigação sobre as emissões de CO_2 no transporte rodoviário brasileiro, o modelo estatístico ARIMA apontou para o aumento das emissões de diesel, diminuição das de gasolina e estabilidade nas de etanol. O trabalho destacou o potencial do etanol como alternativa vantajosa devido à geração de créditos de carbono.

4. CONCLUSÃO

Este estudo ressalta a importância da estatística na análise dos impactos ambientais do transporte, oferecendo ferramentas para prever emissões de GEE e avaliar a eficácia de políticas de mobilidade. A aplicação de modelos estatísticos e matemáticos (como econométricos, dinâmicos e de séries temporais) é crucial para transformar dados operacionais em conhecimento aplicável ao planejamento urbano sustentável. Ao considerar fatores como renda e tecnologia, essas metodologias não apenas quantificam os desafios, mas também subsidiam estratégias para promover uma mobilidade urbana mais equitativa e menos poluente.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e a Universidade Federal de Goiás - UFG pelo suporte técnico e operacional concedido. O primeiro autor agradece o apoio financeiro recebido para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, A. R. M., e Lobato, T. C. (2020) Análise e previsão das emissões de CO_2 provenientes dos combustíveis do setor de transporte rodoviário no Brasil: 1990–2020. ANP.

Djordjević, B; e Krmac, E. (2019) Evaluation of energy-environment efficiency of European transport sectors. Energies, v. 12, n. 15, p. 2907.

Solaymani, S. (2023) Biodiesel and its potential to mitigate transport-related CO_2 emissions. Carbon Research, v. 2, n. 38. DOI: 10.1007/s44246-023-00067-z.

Oliveira, A. V. M., Pamplona, D. A., e Paulo Filho, D. P. (2015). Estudo e previsão de demanda do transporte urbano coletivo na Região Metropolitana de São Paulo. Revista dos Transportes Públicos - ANTP, 37(1).

Alberto Maurício Souza Corrêa (albertomauricio@discente.ufg.br)
Carlos Eduardo Sanches de Andrade (carlos.sanches@ufg.br)
Cintia Isabel de Campos Roque Guerrero (cintiacampos@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás.
Faculdade de Ciência e Tecnologia
Estrada Municipal, quadra e área lote 04, Bairro Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia-GO, Brasil.

Transporte e Meio Ambiente

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO DRENANTE EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL

Marco Antonio dos Santos, Raviel Eurico Basso, Lilian Ribeiro de Rezende
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
A urbanização acelerada no Brasil, aliada ao aumento de eventos extremos de precipitação, intensifica o escoamento superficial e o risco de inundações e erosão. Em resposta, políticas públicas têm promovido soluções de infraestrutura sustentáveis, como pavimentos asfálticos drenantes (PAD), que contribuem para a infiltração da água, controle da poluição e redução do ruído. Assim, esta pesquisa avalia o comportamento hidrológico de PAD, com base composta por Resíduo de Construção e Demolição (RCD-R) e revestimento asfáltico composto por micaxisto e ligante asfáltico modificado com borracha de pneus triturados. Serão construídas duas seções experimentais de 55 x 55 cm, com revestimento asfáltico com uma espessura de 5,5 cm e base de 20 cm e 30 cm de espessura, respectivamente. O desempenho hidrológico das estruturas será avaliado a partir de dados de precipitação incidente sobre os módulos, além da mensuração da quantidade de água infiltrada nas estruturas e coletada pelos drenos.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

A presente pesquisa propõe a avaliação do desempenho hidrológico de uma estrutura de Pavimento Asfáltico Drenante (PAD), utilizando uma base permeável de Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (RCD-R) e revestimento asfáltico drenante com ligante modificado por borracha de pneus inservíveis. Os PADs representam uma solução promissora para mitigar os frequentes alagamentos em áreas urbanas de transporte, otimizando o manejo de águas pluviais e promovendo maior resiliência das infraestruturas. Dessa forma, objetiva-se promover a sustentabilidade ambiental por meio do uso de materiais reciclados e contribuir para o manejo de águas pluviais em ambientes urbanos de transporte, reduzindo impactos ambientais (poluição difusa) e sociais (alagamentos e interrupção do tráfego).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

Com o avanço da urbanização, cresce também a impermeabilização do solo, dificultando a infiltração da água e elevando o risco de inundações (Mendes; Santos, 2023). Em resposta a esse cenário, a legislação brasileira tem incentivado o uso de soluções baseadas na natureza, que buscam reestabelecer processos hidrológicos naturais, especialmente a infiltração. Nesse contexto, os Pavimentos Asfálticos Drenantes (PADs) vêm ganhando relevância como uma estratégia inovadora para a gestão sustentável da drenagem urbana, ao possibilitarem a percolação da água para as camadas inferiores do solo (Fei *et al.*, 2012; Gu *et al.*, 2018).

Os PADs são sistemas multicamadas desenvolvidos para maximizar a infiltração e/ou armazenamento temporário da água da chuva. Geralmente, o revestimento asfáltico é composto por agregados com granulometria aberta, revestidos por ligante asfáltico, resultando num índice de vazios superior a 18%, o que permite a passagem da água da chuva por meio de vazios interconectados (Cheng; Wang, 2002). Uma alternativa sustentável é a incorporação de borracha moída de pneus inservíveis na modificação de ligantes, originando o Asfalto Modificado com Borracha (AMB). O uso de AMB confere, ainda, maior resistência à deformação, aumento do módulo de módulo de resiliência e melhora do desempenho à fadiga (Ansari *et al.*, 2023), podendo contribuir para a durabilidade e a manutenção da permeabilidade dos PAD ao longo do tempo.

As camadas inferiores dos PADs, como as bases permeáveis, também utilizam agregados com granulometria aberta, permitindo tanto a infiltração e o armazenamento temporário de água em seus vazios. Dentre os materiais alternativos para essa aplicação, destaca-se o Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (RCD-R). Seu uso representa uma solução ambiental e economicamente viável, reduzindo a extração de agregados naturais e contribuindo para a gestão de resíduos, especialmente em um cenário em que o Brasil gerou, em 2023, cerca de 44 milhões de toneladas de RCD-R (ABREMA, 2024).

3. METODOLOGIA

Inicialmente, foi conduzida uma metanálise para verificar a abrangência dos estudos sobre PAD. Essa síntese de diversas pesquisas, com foco no desempenho hidrológico dos pavimentos, buscou identificar materiais utilizados, ensaios realizados e resultados, além da distribuição geográfica dos estudos. A busca foi realizada nas bases de dados Scopus, *Science Direct*, *Engineering Village* e *Web of Science*, e a análise forneceu uma base para a compreensão do estado atual do conhecimento na área para o dimensionamento da etapa experimental.

Na sequência, se desenvolverá a pesquisa experimental para avaliar o desempenho hidrológico de módulos de PAD utilizando materiais alternativos. Foram dimensionadas e serão construídas duas seções de pavimento com área superficial de 0,30 m² (55 x 55 cm), visando simular condições reais de aplicação. A camada de revestimento asfáltico foi previamente dosada por Queiroz (2023), composta por micaxisto com granulometria aberta (faixa da brita zero) e ligante asfáltico modificado com borracha (AMB), em um teor de 8,5%. A espessura do revestimento dimensionada foi definida em 5,5 cm, considerando tanto as necessidades de um alto índice de vazio para garantir permeabilidade e eficácia, quanto a capacidade física do Laboratório de Asfalto da Universidade Federal de Goiás (UFG), onde será produzida a mistura.

A base do pavimento será composta por RCD-R, também na faixa da brita zero, com espessuras de 20 cm no primeiro módulo e 30 cm no segundo. A caracterização do material foi realizada por Borges (2024). O dimensionamento dessas camadas seguiu os critérios mínimos estabelecidos pelo Manual de Pavimentação do DNIT (DNIT, 2006) e a variação na espessura da base visa explorar o impacto hidrológico do pavimento. A Figura 1 apresenta um esquema dos módulos dimensionados. A Figura 2(a) apresenta um corpo de prova feito com a mistura asfáltica drenante, enquanto a Figura 2(b) apresenta o RCD-R, materiais utilizados na composição do PAD. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de desempenho da mistura asfáltica e a Tabela 2 apresenta o resumo dos parâmetros geotécnicos obtidos para os materiais selecionados para o estudo.

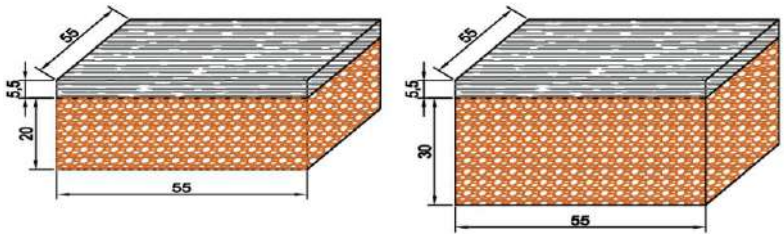


Figura 1: Módulos de PAD dimensionados, em centímetros



(a) (b)

Figura 2: (a) Corpo de prova para mistura asfáltica drenante; (b) Resíduo de Construção e Demolição (RCD-R)

Tabela 1: Resultados dos Ensaios de Desempenho da mistura asfáltica

Ensaios	Resultados
Resistência à tração indireta	260 KPa
DUI – Dano por umidade induzida	210 KPa
Módulo de resiliência	2116 MPa

Fonte: Queiroz (2023).

Tabela 2: Caracterização do RCD-R

Ensaios	Resultados
Massa específica real	2,324 g/cm³
Massa específica aparente	2,081 g/cm³
Absorção	5,0%
Abrasão *Los Angeles*	51,5%

Fonte: Borges (2024).

Com o intuito de simular as condições reais do pavimento em um ambiente controlado, o coeficiente de permeabilidade (k) será determinado em laboratório. A metodologia incluirá ensaios à carga variável para a

mistura asfáltica, conforme proposto por Lyons e Putman (2013). Já para o RCD-R, a determinação do valor de k seguirá a NBR 13292 (ABNT, 2021), com ensaios à carga constante.

Em campo, os módulos serão executados na Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG, em Goiânia sendo inseridos diretamente no solo e expostos às condições naturais de intempéries. A compactação da base será realizada com sapo mecânico, enquanto o revestimento asfáltico será compactado com um rolo liso vibratório. Para o monitoramento da precipitação incidente sobre os módulos, será instalado um pluviógrafo automático, possibilitando a aquisição de dados quantitativos de precipitação.

Os PADs experimentais foram dimensionados para funcionarem de forma estanque, permitindo que parte da água infiltrada pelo pavimento fosse direcionada para um reservatório de coleta. Para isso, será utilizada uma estrutura metálica em perfis de metalon, revestida com lona impermeável. Ao fundo da estrutura, será instalada uma manta geotêxtil permeável sobre um dreno perfurado, com o objetivo de garantir a drenagem eficiente da água e impedir a migração de partículas sólidas. Conectado ao dreno, um reservatório individual para cada módulo será adaptado para coletar e quantificar o volume drenado, fornecendo dados para a análise do desempenho do sistema de pavimentação sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, RJ, 2021.

ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2024). São Paulo, SP, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/

ANSARI, A. H.; JAKARNI, F. M.; MUNIANDY, R.; HASSIM, S.; ELAHI, Z.; ZAIR, M. M. B. (2023). Mechanical performance of cup lump rubber modified asphalt mixtures incorporating polyphosphoric acid. *Construction and Building Materials*, v. 408, p. 133625. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133625.

BORGES, V. L. C. Estudo dos parâmetros de materiais sustentáveis para pavimentos drenantes (2024). *Relatório de Iniciação Científica*. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CHENG, S.; WANG, R. (2002). An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes*, v. 16, n. 7, p. 1403–1418. https://doi.org/10.1002/hyp.350.

DNIT. (2006). IPR – 719 *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/719_manual_de_pavimentacao.pdf. (acesso em 05/07/2024)

FEI, C.; YAZHOU, Z.; JUN, Y.; GANG, X. (2012) Field performance assessment of porous asphalt pavement under heavy traffic on Yan-Tong expressway in China. Journal of Testing and Evaluation, v. 40, n. 7. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1520/JTE20120123.

GU, F.; WATSON, D.; MOORE, J.; TRAN, N. (2018). Evaluation of the benefits of open graded friction course: Case study. *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 131–143. Disponível em : https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.185

LYONS, K. R.; PUTMAN, B. J. (2013). Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. v. 49, p. 772–780. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. dos. (2023). Planejamento e gestão da drenagem e manejo sustentável de águas de chuva no Brasil: lacunas e situação dos municípios. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental (BRUA*): n. 29, v. 29, p. 99–109. https://doi.org/10.38116/brua29art8.

QUEIROZ, A. C. G. (2023). Desenvolvimento de Pavimento Asfáltico Drenante Sustentável para o Contexto do Estado de Goiás. *Relatório de Estágio Pós-Doutoral.* Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

Marco Antonio dos Santos (marco.antonio@discente.ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Ambiental e Sanitária, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Avenida Universitária, Qd. 86, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO, Brasil.
Raviel Eurico Basso (ravielbasso@ufg,br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Ambiental e Sanitária, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Avenida Universitária, Qd. 86, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO, Brasil.
Lilian Ribeiro de Rezende (lrezende@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Ambiental e Sanitária, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil Avenida Universitária, Qd. 86, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO, Brasil.

RELATÓRIO DE DISSERTAÇÃO EM ANDAMENTO: COMO TRANSFORMAR CAMPINAS EM UMA CIDADE VERDE–ENFATIZANDO A MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL

Letícia Aparecida De Paiva[1], **Pedro José Perez Mertinez**[1]
[1]Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

RESUMO
O crescimento das emissões antrópicas, especialmente dos gases de efeito estufa provenientes do transporte motorizado, gerou significativos impactos socioambientais nas cidades. Esses processos intensificaram os efeitos das mudanças climáticas, contribuindo para a formação de ilhas de calor e aumento da poluição atmosférica. Diante desse contexto, este trabalho visa investigar a interação entre a mobilidade ativa e as soluções baseadas na natureza em ciclovias/ciclofaixas da cidade de Campinas, e suas contribuições para a promoção da sustentabilidade urbana. Para isto, são realizadas análises em trechos cicloviários, com diferentes características verdes, através do índice de ciclabilidade, buscando compreender a influência dessas infraestruturas no aquecimento urbano. Posteriormente, será realizada uma análise comparativa com a cidade de Toulouse, na França, modelo de cidade verde, a fim de identificar estratégias replicáveis que respondam às ilhas de calor enquanto fomentam a mobilidade ativa. Espera-se, com isso, propor diretrizes replicáveis que contribuam para a adaptação climática das cidades brasileiras.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização brasileiro foi impulsionado pela industrialização e por profundas transformações sociais. Além disso, este ocorreu de forma acelerada e desordenada, pois o rápido crescimento populacional e a elevada demanda por moradia avançaram sem planejamento e gestão adequados, promovendo a ocupação de áreas inadequadas e a formação de periferias com infraestrutura precária (Lefebvre, 2008; Diniz e Vieira, 2016). Essas fragilidades estruturais, aliadas aos impactos do aquecimento global, resultam na formação de ilhas de calor e no agravamento da poluição do ar (Morawska *et al*., 2021). Ademais, a expansão territorial das áreas urbanas aumentou as distâncias diárias percorridas pela população e, consequentemente, os efeitos das alterações climáticas decorrentes da poluição atmosférica gerada pelos automóveis. Nesse cenário, a redução da mobilidade ativa no Brasil apresentou queda consistente e desigualdades acentuadas, evidenciando uma crescente dependência do transporte individual motorizado, resultando no aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Tiznado-Aitken *et al*., 2023) e contrapondo-se a "Cidade de 15 Minutos" de Calos Moreno. Essa abordagem enfatiza a redução das distâncias entre a habitação e atividades essenciais, promovendo deslocamentos por mobilidade ativa e, assim, a redução da necessidade de uso do automóvel (Moreno *et al*., 2021). Nesse sentido, as emissões antropogênicas comprometem as cidades e contribuem para a intensificação do aquecimento global. Ainda, as emissões de GEE apresentam variações entre 2% a 4% ao ano, provocando o aumento das temperaturas, especialmente no Brasil com valores acima da média global (Artaxo, 2022). Essas alterações no clima afetam diretamente a concentração de poluentes atmosféricos, impactando a saúde da população e agravando os desafios ambientais (Doherty *et al*., 2017; IPCC, 2019). A redução das emissões humanas, especialmente através das emissões de GEE, é essencial para reverter os eventos recorrentes de poluição atmosférica e da adaptação climática (Arneth *et al*., 2019; Morawska *et al*., 2021).

Diante disso, torna-se fundamental romper com essa lógica e adotar um modelo de desenvolvimento urbano que priorize o bem-estar da população e incentive alternativas de transporte sustentável. A mobilidade ativa é uma estratégia sustentável que incentiva deslocamentos por bicicleta, meio que não gera emissões de poluentes (Woodcock *et al*., 2022). A mobilidade ativa não se limita ao uso da bicicleta, porém é destacada nesse estudo. Paralelamente, estratégias verdes resilientes são respostas essenciais às ilhas de calor urbana, visto que desempenham papel fundamental na adaptação e redução dos impactos ambientais (IPCC, 2019). Considerando o crescente esforço na promoção de comunidades sustentáveis, a convergência entre abordagens que integram as soluções baseadas na natureza e a mobilidade ativa, especialmente o uso de bicicletas, consolida-se como estratégias sustentáveis para responder eventos recorrentes da poluição atmosférica e impactos negativos das alterações climáticas (Arneth *et al*., 2019; Morawska *et al*., 2021). A partir disso, este trabalho tem o objetivo de investigar a interação entre a mobilidade ativa e as soluções baseadas na natureza, em ciclovias urbanas de Campinas, visando responder a três questões: 1. Como as soluções baseadas na natureza impactam o ambiente urbano, especialmente na mitigação das ilhas de calor; 2. Qual o efeito desse sistema em ciclovias urbanas; 3. Quais são as diretrizes e estratégias fundamentais para orientar o desenvolvimento de cidades resilientes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mobilidade Urbana Sustentável

A mobilidade urbana é definida, pela Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei N° 12.587/ 2012), como às condições em que ocorrem os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano, com o objetivo de promover acesso amplo e democrático a esses espaços. Para alcançar seus objetivos da mobilidade, são elaboradas políticas públicas que visam facilitar o acesso à cidade de maneira acessível, priorizando modos de transporte coletivo, ativo e não motorizados. A promoção da mobilidade urbana sustentável constitui-se um direito fundamental de fomento a distribuição equitativa aos transportes e a ampliação do acesso às oportunidades urbanas. No entanto, a persistência das desigualdades evidencia a necessidade de superar as abordagens tradicionais de planejamento voltado ao automóvel (Alvim *et al*., 2024). Além dos desafios socioespaciais, a mobilidade urbana enfrenta desafios ambientais significativos relacionados à poluição do ar e ao agravamento do aquecimento global decorrentes das emissões de GEE do transporte motorizado. Nesse cenário, os modos de deslocamento ativo são considerados alternativas eficazes para mitigar os impactos causados pelo uso excessivo de automóveis ao incentivar a redução das viagens motorizadas, substituindo-as por deslocamentos a pé ou por bicicleta. Essa mudança no modo de deslocamento contribui para a redução do volume de emissão de GEE e de seus efeitos sobre o clima (Woodcock *et al*., 2022). A mobilidade cicloviária proporciona benefícios à saúde pública ao promover estilos de vida mais saudáveis, portanto, promover o uso das bicicletas nos deslocamentos é reconhecido como uma estratégia de mitigação das emissões de carbono e poluição do ar (Silva *et al*., 2022). Ademais, a integração entre estratégias verdes e a mobilidade cicloviária é fundamental, pois as infraestruturas verdes promovem benefícios socioambientais e atratividade ao sistema, contribuindo significativamente para uma mobilidade urbana sustentável (Liu *et al*., 2024).

2.2. Soluções Baseadas na Natureza

As Soluções Baseadas na Natureza (NBS) são inspiradas e fundamentadas em processos naturais para enfrentar desafios socioambientais, enquanto proporcionam benefícios econômicos, sociais e ambientais (Frantzeskaki, 2019). Dentre os benefícios, incluem a criação microclimas mais agradáveis e saudáveis, melhoria da qualidade do ar e da água, além do aumento da biodiversidade (Debele *et al.*, 2023; Nelo *et al.*, 2024). Desse modo, essa abordagem se destaca como uma estratégia sustentável e resiliente de mitigação e adaptação climática ao transformar as cidades em paisagens promotoras de serviços ecossistêmicos, essenciais para orientar processos de planejamento estratégico e tomada de decisões (Kaam e Gallardo, 2023; Nelo *et al.*, 2024). Além disso, essas iniciativas desempenham funções ecológicas fundamentais ao reconectar os sistemas urbanos à paisagem natural, visando preservar, restaurar e replicar os sistemas naturais existentes (Hagerman, 2011). Martins *et al.* (2016) destacam a relevância do uso de vegetação e recursos hídricos na mitigação das ilhas de calor urbanas, ressaltando que a ausência de áreas sombreadas e de resfriamento por evapotranspiração compromete a regulação térmica dos ambientes urbanos. Estudos realizados em Toulouse, na França, evidenciam que a integração das NBS promove melhorias significativas no conforto térmico, como uma redução expressiva na temperatura equivalente fisiológica em áreas vegetadas e de até 2°C em regiões próximas a corpos d'água (Martins *et al*., 2016). Assim, a adoção associada GBI potencializa melhorias eficazes na adaptação climática.

3. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem metodológica exploratória e comparativa, predominantemente quantitativa, estruturada em etapas. Inicialmente foi realizado um mapeamento sistemático da literatura com o objetivo de elaborar uma rede bibliográfica, contribuindo para a análise da ocorrência de estudos sobre GBI e ciclabilidade, assim como sua interrelação com as ilhas de calor. A partir da rede elaborada, observou-se uma significativa associação entre os termos selecionados ("*Prescriptions"*, "*Nature-based solutions*", *"Green blue infrastructures", "Urban mobility"* e *"bicycle"*) e os debates sobre o aquecimento urbano e a resiliência urbana. Essa relação evidencia o diálogo entre as temáticas, adotadas como estratégias essenciais para discussão dos desafios ambientais e urbanos. Na segunda etapa, são realizados levantamentos de dados estruturado em duas etapas. Inicialmente, será realizada a coleta de dados in loco através de uma análise qualiquantitativa na cidade de Campinas utilizando um índice de ciclabilidade, adaptado pela autora, em dois trechos cicloviários com cobertura vegetação e um trecho sem essa característica. O índice de ciclabilidade prevê a análise da ciclovia com base nos critérios de infraestrutura, mobilidade, atratividade, segurança e ambiente. Paralelamente, será realizada a coleta de dados em fonte de dados em bases de dados de periódicos, livros, legislações, imagens de satélite e recursos de geoprocessamento. Os resultados viabilizam o mapeamento e análise das infraestruturas de mobilidade, vegetação e outros elementos que contribuem para a

mitigação das ilhas de calor e a sustentabilidade urbana. Por fim, será conduzido um estudo da cidade de Toulouse, na França, com o objetivo de mapear as infraestruturas de mobilidade ciclável e NBS implementadas na cidade, voltadas à sustentabilidade urbana. A escolha da cidade francesa se justifica na implementação de políticas e estratégias ambientais, como o Plano Metropolitano de Clima, Ar e Energia de Toulouse (2018) e o Guia do Projeto Urbano de Toulouse (2023), voltadas à mitigação dos impactos ambientais. Posteriormente, será desenvolvida uma análise comparativa com a cidade de Campinas/BR visando identificar estratégias implementadas por Toulouse que possam ser replicadas na realidade brasileira para a adaptação climática.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados preliminares de uma ciclovia indicam a carência de infraestrutura cicloviária segura, assim como apontam que a cobertura vegetal densa, que formam "tuneis", influenciam na retenção de poluentes atmosféricos. Além disso, a adoção de NBS, com espaçamento entre os elementos vegetais, contribui para reduzir a concentração de poluentes. A continuidade dos levantamentos em outras ciclovias contribuirá para a discussão dos efeitos da vegetação sobre a infraestrutura cicloviária e o clima.

Agradecimentos

Este trabalho é financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvim, A. T. B.; *et al*. Mobilidade urbana em perspectiva: novos olhares sobre as dinâmicas da cidade contemporânea. Cadernos Metrópole, v. 26, n. 60, p. 413–421, 2024. DOI: 10.1590/2236-9996.2024-6000.

Arneth, A; *et al*. Framing and Context. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Cambridge University Press, 2019. DOI: 10.1017/9781009157988.003.

Artaxo, P. Oportunidades e vulnerabilidades do Brasil nas questões do clima e da sustentabilidade. Revista USP, São Paulo, Brasil, n. 135, p. 119–136, 2022. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.i135p119-136.

Debele, S. E.; *et al*. Nature-based solutions can help reduce the impact of natural hazards: A global analysis of NBS case studies. *Science of the Total Environment*, v. 902, p. 1-15, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165824.

Diniz, C. *et al*. Brazil: accelerated metropolization and urban crisis. *Area Development and Policy* 1, 155 - 177, 2016.

Doherty, R.M.; Heal, M.R.; O'Connor, F.M. Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality. *Environ Health,* 16, 118, 2017. DOI: 10.1186/s12940-017-0325-2.

Frantzeskaki, N. Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science & Policy*, v. 92, p. 101-111, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.12.033.

Hagerman, C. Green Infrastructure. In: Cohen, N.; Robbins, P. (eds.). Green Cities: an a-to-z guide. USA: Sage Publications, 2011. p. 223 – 229

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas. Brasil: MCTIC, 2019.

Kaam, E. N.; Gallardo, A. L. C. F. Soluções baseadas na Natureza em projetos de revitalização de brownfields urbanos: novos paradigmas para problemas urbanos. Estudos Avançados, São Paulo, v. 37, n. 109, p. 303-326, 2023.

Lefebvre, H. O direito a cidade. 5. ed. São Paulo: Centauro, 2008. 143 p.

Liu, Y *et al*. An integrated approach for urban green travel environments: Planning factors, benefits and barriers as perceived by users and planners. *Journal of Transport Geography*, v. 117, 2024.

Martins, T. A. L.; *et al*. Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, v. 26, p. 9–26, 2016.

Morawska, L; *et al*. The state of science on severe air pollution episodes: Quantitative and qualitative analysis. *Environment International*, v. 156, p. 106732, 1 nov. 2021. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106732.

Moreno, C.; *et al*. Introducing the "15-Minute City": Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities. Smart Cities. 2021, 4, 93–111. DOI: 10.3390/smartcities4010006.

Nelo, L. M. de A.; Silva, L. F. da; Ribeiro, A. P. Soluções Baseadas na Natureza para Mitigar o Calor Urbano: a Eficácia dos Corredores Verdes em Medellín, Colômbia. Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, v. 12, n. 36, 2024.

Silva, C. M. da; *et al*. Mobilidade ativa e satisfação com o bairro: um estudo no distrito federal. In: Jeronymo, C. M. C. (org.). Acessibilidade, Mobilidade Urbana e Transporte: Avanços, Retrocessos e Novas Perspectivas. vol 2. Guarujá - SP: Científica Digital Ltda, 2022. Cap. 10. p. 143-154. DOI: 10.37885/978-65-5360-205-2.

Tiznado-Aitken, I.; *et al*. Unequal periurban mobility: Travel patterns, modal choices and urban core dependence in Latin America. Habitat International, v. 133, n. 3, Art. 102752, mar. 2023. DOI: 10.1016/j.habitatint.2023.102752.

Woodcock, J.; *et al*. Transport and health on the path to a net zero carbon world. BMJ, p. e069688, 2022.

Letícia Aparecida de Paiva (l223579@dac.unicamp.br)

UNICAMP, Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Tecnologia e cidade, Rua Roxo Moreira, s/n – Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas – SP, Brasil.

IMPACTO DA REDUÇÃO DO LIMITE DE VELOCIDADE EM ÁREAS URBANAS NAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Eduardo Cesar Amancio[1], **Tatiana Maria Cecy Gadda**[1], **Jorge Tiago Bastos**[2]
[1]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [2]Universidade Federal do Paraná

RESUMO
A crescente preocupação mundial com a segurança viária em áreas urbanas tem impulsionado medidas de gestão de tráfego, entre elas, a redução dos limites de velocidade. Este projeto de pesquisa visa analisar o impacto da redução dos limites de velocidade nas emissões atmosféricas em áreas urbanas, utilizando a cidade de Curitiba/PR como estudo de caso. A pesquisa empregará uma abordagem multimétodo, combinando dados naturalísticos de direção e modelagem de emissões. Os resultados contribuirão para o debate técnico-científico sobre a efetividade dessa política pública em atingir metas mundiais de descarbonização e segurança pública.
Palavras-chave: limite de velocidade, emissões atmosféricas, estudo naturalístico, transporte urbano.

1. INTRODUÇÃO

A emissão de poluentes atmosféricos provenientes de veículos automotores representa um dos principais desafios ambientais nas áreas urbanas (Zhu et al., 2021). A redução da velocidade veicular tem sido implementada como estratégia de mitigação de emissões, com políticas adotadas em cidades como Londres, Paris e Bogotá (Tonne et al., 2021). No entanto, a relação entre redução de velocidade e emissões atmosféricas ainda é objeto de controvérsia, com resultados divergentes a depender da metodologia utilizada e do contexto urbano analisado (Yang et al., 2023).

Uma revisão sistemática recente conduzida por Saleh et al. (2023) identificou lacunas significativas na literatura quanto aos impactos ambientais diretos das reduções de limite de velocidade em áreas urbanas, sobretudo em países da América Latina. A maioria dos estudos concentra-se em análises teóricas ou modelagens simplificadas, com escassez de pesquisas baseadas em dados naturalísticos de direção, estudos em campo com medições de emissões reais e conduzidos em países de média e baixa renda.

Além disso, a Agenda 2030 da ONU, por meio dos ODS, reforça a importância de intervenções urbanas sustentáveis que promovam a melhoria da qualidade do ar e da saúde pública (ONU, 2015). A redução de velocidade, além de seus benefícios em segurança viária, pode ter impactos diretos para as metas de redução da poluição atmosférica.

Diante deste cenário, torna-se necessário um estudo que avalie de forma imparcial os reais efeitos dessa política sobre as emissões atmosféricas no contexto urbano brasileiro. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é analisar o impacto da redução do limite de velocidade nas emissões atmosféricas no contexto urbano de Curitiba/PR através da análise de dados naturalísticos de direção. Para tanto, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As emissões atmosféricas veiculares são sensíveis às variações de velocidade média em áreas urbanas. Estudos empíricos apontam que, à medida que a velocidade diminui, ocorrem reduções relevantes em poluentes primários como NO_x, CO_2 e material particulado (Barlow; Bolter, 2009), sendo essa associação confirmada por modelagens e medições em diversos contextos urbanos — especialmente na Europa. A análise de fatores de emissão da frota diesel Euro I em Coimbra, Portugal, mostrou que o aumento do tempo em marcha lenta e acelerações frequentes em baixa velocidade elevam os níveis de NO_x por quilômetro rodado (Barlow; Bolter, 2009).

Experimentos de simulação de tráfego realizado na Alemanha, utilizando fluxos sincronizados por semáforos combinados com redução de velocidade, demonstraram que tais estratégias reduzem as emissões de NO_x e material particulado, ainda que possam implicar em aumento do tempo de deslocamento (Göttlich et al., 2023)². De modo análogo, uma iniciativa de zonas de baixa emissão em Madrid estimou impacto positivo em concentrações médias diárias de NO_2, especialmente a longo prazo (Cárdenas-Montes, 2020).

Essas evidências internacionais são reforçadas por estudos brasileiros. O relatório técnico do Ipea (IPEA, 2014) abrangeu centros metropolitanos e destacou que políticas integradas — redução de velocidade urbana aliada à inspeção veicular e ao fortalecimento de transporte coletivo — são essenciais para obtenção de ganhos reais em qualidade do ar. Em Minas Gerais, Santos (2017) analisou como os fatores de emissão variam com temperatura e velocidade, demonstrando que emissões evaporativas e aceleradas em veículos urbanos aumentam significativamente em função desses parâmetros.

Ainda no Brasil, em áreas urbanas como Uberlândia, estimativas indicaram que a modernização da frota de ônibus reduz emissões de CO_2, material particulado e NO_x (Silva; Oliveira, 2018), evidenciando o impacto de estratégias que combinam redução de velocidade com renovação tecnológica. Do ponto de vista metodológico, o uso de modelos de emissão (como COPERT) e modelagem de dispersão atmosférica permite estimar com precisão os efeitos da redução de velocidade em cenários urbanos reais (Göttlich et al., 2023).

3. METODOLOGIA

Os métodos empregados se baseiam em quatro etapas: (i) coleta de dados naturalísticos; (ii) estimativa das emissões atmosféricas baseado nas velocidades praticadas; (iii) correção dos valores de velocidade praticada baseada em um novo limite de velocidade hipotético; e (iv) estimativa do impacto nas emissões baseadas no novo cenário de limite de velocidade reduzido.

3.1. Estudo naturalístico de direção brasileiro

O Estudo Naturalístico de Direção Brasileiro (NDS-BR) consiste no monitoramento de condutores habituais na tarefa real de condução. Os dados começaram a ser coletados no ano de 2019. O veículo de cada participante foi equipado com uma Plataforma de Coleta de Dados Naturalísticos (PCDN), um conjunto de equipamentos cuja instalação possui uma característica não intrusiva e de fácil fixação. A PCDN é composta por um computador notebook (armazenamento dos dados coletados), três câmeras USB e um GPS (Global Positioning System) USB (coleta de dados) e um inversor de voltagem (alimentação elétrica). Todo o processo de concepção da PCDN e coleta e análise de dados foram descritos por Bastos et al. (2023). A Figura 1 apresenta um esquema de fixação e orientação das câmeras da PCDN nos veículos.

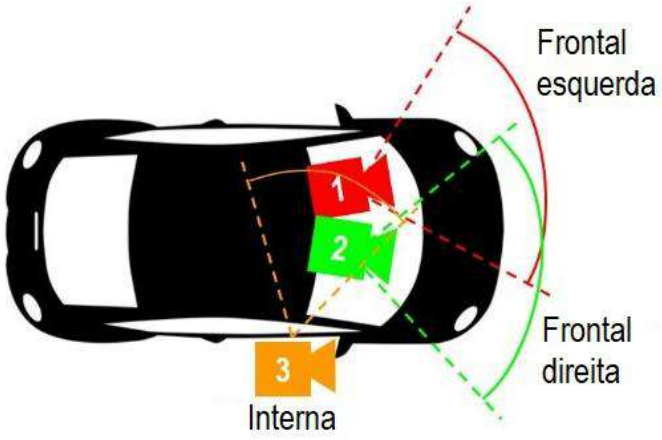


Figura 1: Disposição das câmeras no veículo

Desconsiderou-se a primeira viagem de todo condutor participante para permitir um tempo de adaptação do condutor com os equipamentos. Além disso, para manter a privacidade e conforto dos condutores não houve gravação de som. Devido ao carácter observacional e não experimental da pesquisa, não foi imposto nenhuma rota pré-fixada para nenhum dos condutores. Estes foram instruídos a realizarem viagens e percursos que estavam habituados, assim como a desempenhar comportamentos que estavam acostumados. Até o momento coletou-se dados de 32 condutores, 924 viagens ocorridas durante 299 horas de condução ao longo de 8.370 km percorridos.

3.2. Cálculo da redução da velocidade

O impacto nas emissões será feito baseado em dois cenários: (i) cenário atual, com o atual limite de velocidade e (ii) cenário hipotético com um limite de velocidade reduzido. Para ambos cenários será utilizado modelos de emissões atmosféricas baseado na velocidade praticada de cada modelo de veículo comercial utilizado no estudo naturalístico.

Para o primeiro cenário, serão utilizados os dados de velocidades praticadas pelos condutores. Essas velocidades resultarão na estimativa atual de emissões atmosféricas, uma vez que considera a velocidade atual das vias. Já para o segundo cenário será considerado uma redução de velocidade hipotética. Essa redução hipotética do limite de velocidade resultará em uma redução hipotética da velocidade praticada pelos condutores. Esse processo será realizado de acordo com o estudo australiano de Ellison e Greaves (2015). Se a velocidade praticada coletada for abaixo do limite hipotético de velocidade, nenhuma modificação será feita no valor coletado. No entanto, a velocidade coletada será substituída pelo limite de velocidade hipotético da via caso o condutor praticar uma velocidade superior a esse valor.

A diferença dos valores de velocidade em ambos cenários será utilizada para estimar a diferença nas emissões atmosféricas.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que o estudo contribua para a compreensão científica acerca da relação entre políticas de redução de velocidade e emissões atmosféricas urbanas, fornecendo subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas baseadas em evidências. Os resultados também poderão ajudar a orientar outras cidades brasileiras na implementação de medidas de controle de tráfego com foco ambiental, reforçando os compromissos com os ODS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barth, M.; Boriboonsomsin, K. Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. Transportation Research Record, n. 2058, p. 163–171, 2008.

Dingus, T. A. et al. The second Strategic Highway Research Program naturalistic driving study methods. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 54, p. 1-12, 2016.

Int Pan, L. et al. Emissions from driving behaviour and vehicle gear shifting: A real-world driving study using a portable emission measurement system (PEMS). Atmospheric Environment, v. 45, n. 35, p. 6081–6088, 2011.

Wang, Y. et al. Impacts of speed limits and traffic flow on vehicular emissions: A study using real-world driving data. Journal of Environmental Management, v. 264, 2020.

ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Brasília: ONU Brasil, 2015.

Fondzenyuy, S.K.; Turner, B.M.; Burlacu, A.F.; Jurewicz, C.; Usami, D.S.; Feudjio, S.L.T.; Persia, L. The Impact of Speed Limit Change on Emissions: A Systematic Review of Literature. Sustainability 2024, 16, 7712.ttps://doi.org/10.3390/su16177712

Cárdenas-Montes, M. *Evaluation of the Impact of Low-Emission Zone: Madrid Central as a Case Study*. 2020.[3]

Gôttlich, S.; Herty, M.; Ulke, A. *Speed limits in traffic emission models using multi-objective optimization*. 2023.[2]

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Transporte Urbano e Emissões Veiculares: relatório TD 1606*. Brasília: Ipea, 2014.[4]

Silva, R.; Oliveira, M. *Estimativa da poluição emitida pelos ônibus de linhas troncais da cidade de Uberlândia*. Uberlândia: UFU, 2018.[5]

Santos, F.S. *Diagnóstico das emissões atmosféricas em Minas Gerais: um estudo para as fontes fixas e veiculares*. Belo Horizonte: UFMG, 2017.[4]

Eduardo Cesar Amancio (eduardoamancio@alunos.utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ecoville, Programa de pós-graduação em engenharia civil (PPGEC), Rua Deputado Heitor de Alencar Furtado, 5000, Cidade Industrial de Curitiba, Curitiba/PR, 81280-340
Tatiana Maria Cecy Gadda (tatianagadda@utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ecoville, Programa de pós-graduação em engenharia civil (PPGEC), Rua Deputado Heitor de Alencar Furtado, 5000, Cidade Industrial de Curitiba, Curitiba/PR, 81280-340
Jorge Tiago Bastos (jtbastos@ufpr.edu.br)
Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Departamento de Transportes, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 81530-000

IMPACTOS DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NOS PORTOS BRASILEIROS: CAMINHOS PARA ADAPTAÇÃO FRENTE À MUDANÇA DO CLIMA

Rafael Ferraz dos Santos[1], Victor Hugo Souza de Abreu[2], Andrea Souza Santos[1]
[1]PET/COPPE/UFRJ, [2]POLI/UFRJ

RESUMO
A elevação do nível do mar impõe desafios crescentes às infraestruturas portuárias brasileiras, cuja relevância estratégica para o escoamento de commodities e a integração econômica global é incontestável. Este relatório apresenta os avanços da pesquisa de mestrado que investiga os impactos da mudança do clima sobre cinco portos nacionais classificados como de risco "muito alto" até 2050, conforme a plataforma AdaptaBrasil. A pesquisa articula revisão bibliográfica, análise bibliométrica e consulta a especialistas, com o objetivo de analisar criticamente as diretrizes adaptativas existentes, considerando as especificidades territoriais, as boas práticas internacionais e o papel das Soluções Baseadas na Natureza.

1. PROPOSTA

A pesquisa tem como foco a análise dos impactos da elevação do nível do mar sobre cinco portos brasileiros classificados como de risco climático “muito alto” até 2050, segundo a plataforma AdaptaBrasil: Santos (SP), Paranaguá (PR), Aratu-Candeias (BA), São Francisco do Sul (SC) e Rio Grande (RS). Com base na metodologia de análise de risco climático do AdaptaBrasil, o estudo examina os componentes de ameaça, exposição e vulnerabilidade, articulando dados físicos, dinâmicas operacionais e capacidades institucionais.

A proposta avança sobre diagnósticos anteriores ao adotar uma abordagem crítica voltada à identificação de lacunas nas estratégias atuais e à proposição de medidas de adaptação compatíveis com o contexto brasileiro. A partir da análise integrada de evidências científicas, experiências internacionais e características locais, o estudo busca examinar diretrizes adaptativas tecnicamente embasadas e operacionalmente viáveis, com ênfase na articulação entre infraestrutura resiliente, Soluções Baseadas na Natureza (SBN) e modelos de governança adequados à realidade institucional dos portos nacionais.

2. METODOLOGIA

A pesquisa adota abordagem metodológica híbrida, com base na triangulação entre: (i) revisão bibliográfica e sistemática com análise bibliométrica; (ii) análise documental técnica e normativa; e (iii) aplicação de questionário para consulta a especialistas. O procedimento foi estruturado em oito etapas, conforme demonstrado na figura 1 abaixo.



Figura 1: Fluxograma metodológico da pesquisa
Fonte: Elaborado pelo autor.

As etapas apresentadas na Figura 1 podem ser detalhadas da seguinte forma:

Atividades já realizadas

1. **Realizar levantamento bibliográfico inicial**
   Foi realizada uma busca sistemática na base de dados *Web of Science*, utilizando operadores booleanos, com o objetivo de mapear a produção científica relacionada aos impactos da elevação do nível do mar sobre portos e às estratégias de adaptação diante da mudança do clima. Essa etapa resultou na identificação de 302 documentos relevantes, que compuseram o repositório inicial de análise.
2. **Complementar o repositório de referências**
   A partir da análise crítica dos títulos e resumos do acervo inicial, identificou-se a necessidade de aprofundar a fundamentação teórica e ampliar os conceitos centrais. Foram, portanto, incorporadas referências complementares que tratam de temas correlatos, tais como Soluções Baseadas na Natureza (SBN), infraestrutura adaptativa e governança climática.
3. **Analisar documentos técnicos e institucionais**
   Com o objetivo de alinhar a pesquisa aos marcos regulatórios e às diretrizes nacionais e internacionais, foram examinados documentos relevantes, entre eles:
   – Relatório Final do Projeto AdaptaClima – Impactos e Riscos da Mudança do Clima nos Portos Públicos Costeiros Brasileiros (ANTAQ, 2021);
   – Plano Nacional sobre Mudança do Clima (MMA, 2020);
   – Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC AR6;
   – Guia da ANTAQ para a Condução de Levantamento de Risco Climático e Medidas de Adaptação para Infraestruturas Portuárias (ANTAQ, 2021).
   Esses documentos forneceram subsídios normativos e metodológicos para a aplicação da análise de risco climático e identificação de diretrizes adaptativas.
4. **Delimitar o escopo geográfico e temático**
   Com base nos dados disponibilizados pela plataforma AdaptaBrasil, foi estabelecido o recorte geográfico da pesquisa, concentrando-se nos portos classificados como de risco climático "muito alto" até 2050.
5. **Caracterizar os portos selecionados**
   Foi conduzido um levantamento documental aprofundado sobre cada um dos cinco portos selecionados: Santos (SP), Paranaguá (PR), Aratu-Candeias (BA), São Francisco do Sul (SC) e Rio Grande (RS). A caracterização abrangeu aspectos físicos, operacionais e climáticos, incluindo localização geográfica, tipologia de cargas movimentadas, infraestrutura instalada, histórico de eventos extremos e projeções de impacto associadas à subida do nível do mar.

Atividades em andamento

6. **Identificar estratégias adaptativas**
   Está em curso uma revisão sistemática da literatura científica internacional voltada à identificação das principais estratégias de adaptação aplicáveis a portos diante da mudança do clima. Serão considerados tanto métodos estruturais convencionais, como obras de contenção e elevação de cais, quanto abordagens inovadoras, como Soluções Baseadas na Natureza, sistemas de alerta precoce e planos de gestão de riscos.
7. **Consultar especialistas**
   Será elaborado um questionário semiestruturado direcionado a especialistas das áreas de engenharia portuária, planejamento costeiro e mudança do clima, com o objetivo de validar os achados da pesquisa, confrontar as propostas de adaptação com a experiência prática e identificar lacunas percebidas por profissionais atuantes no setor.
8. **Avaliar criticamente e consolidar diretrizes de adaptação**
   A partir da articulação entre as evidências levantadas nas diferentes etapas, revisão sistemática, análise documental dos portos, diretrizes técnicas e consulta a especialistas, será conduzida uma avaliação crítica das estratégias de adaptação identificadas. Pretende-se aferir a robustez, pertinência e aplicabilidade das medidas no contexto brasileiro, considerando as especificidades institucionais,

operacionais e climáticas de cada porto analisado.

3. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

A literatura científica contemporânea tem ressaltado os diversos impactos da elevação do nível do mar sobre áreas costeiras e infraestruturas críticas, com atenção especial aos portos. De acordo com o IPCC (2022), eventos extremos associados ao avanço do mar tendem a se intensificar, afetando de maneira mais severa regiões tropicais e subtropicais. Bamber *et al.* (2023) projetam uma elevação superior a 1 metro até o final do século, com consequências graves para a segurança operacional e a integridade estrutural dos terminais portuários. Por outro lado, Wallace-Wells (2019) destaca que esses riscos não se distribuem de forma uniforme entre os países, o que reforça a urgência de estratégias de adaptação que levem em conta as vulnerabilidades regionais.

Apesar do cenário, a produção científica sobre adaptação portuária apresenta forte assimetria geográfica. A análise de 302 artigos na base *Web of Science* revelou que cerca de 79% dos estudos concentram-se em países do Norte Global, sobretudo Estados Unidos e países europeus. Apenas 1% das publicações analisadas trata do contexto brasileiro, sendo raras as que abordam diretamente portos ou terminais específicos. Além disso, observa-se predominância de abordagens técnico-estruturais, com ênfase na elevação de cais, construção de diques e reforço de estruturas físicas. Estratégias de planejamento adaptativo, governança institucional, ou justiça climática permanecem subexploradas.

As Soluções Baseadas na Natureza (SBN), consideradas promissoras para atenuar impactos da elevação do mar e promover co-benefícios socioambientais, aparecem em menos de 2% da produção analisada. Essas soluções incluem, entre outras, a regeneração de manguezais, recifes artificiais, barreiras vivas e projetos de ruas verdes. Apesar de seu reconhecimento internacional, há baixa aplicação prática em contextos portuários brasileiros, revelando não apenas uma lacuna técnica, mas também institucional e normativa. O desafio de integrar tais soluções em planos diretores portuários e políticas públicas permanece um dos principais obstáculos à construção de portos resilientes no país.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

A análise dos cinco portos brasileiros selecionados revela um quadro de elevada exposição a riscos físicos decorrentes da elevação do nível do mar. O Porto de Santos, por exemplo, já apresenta registros recorrentes de alagamentos provocados pela combinação entre marés altas e chuvas intensas, impactando diretamente a operação logística. Paranaguá e Rio Grande enfrentam desafios semelhantes, especialmente em áreas críticas situadas junto a armazéns e pátios operacionais, cuja vulnerabilidade tende a se intensificar. No caso de Aratu-Candeias, observa-se uma menor densidade urbana no entorno imediato, mas persistem lacunas estruturais relacionadas à ausência de infraestrutura adaptativa. Já São Francisco do Sul dispõe de instalações mais robustas, embora não conte com planos de contingência atualizados que considerem cenários futuros de risco.

Esses resultados preliminares reforçam a importância da pesquisa como subsídio técnico para tomadores de decisão, gestores públicos e operadores logísticos. A ausência de diretrizes específicas voltadas à adaptação portuária, somada à limitada integração entre instrumentos de planejamento e respostas operacionais, configura um cenário de vulnerabilidade institucional e técnica. A próxima etapa da investigação buscará minimizar esses gaps por meio da análise crítica de diretrizes adaptativas, considerando as particularidades territoriais de cada porto, a viabilidade de adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), e a sistematização das contribuições de especialistas da área. Pretende-se, assim, consolidar recomendações que sejam contextualizadas, operacionalmente viáveis e alinhadas aos marcos regulatórios e ambientais em vigor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAPTABRASIL. Plataforma AdaptaBrasil MCTI – Dados de risco climático setorial. Brasília: MCTI, 2023.

BAMBER, J. *et al*. Ice sheet contributions to future sea-level rise. *Nature Climate Change*, 2023. https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116

WALLACE-WELLS, D. *A terra inabitável: uma história do futuro*. São Paulo: Companhia das Letras, 2019.

Avaliação e Reabilitação de Pavimentos

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS TRADICIONAL E AUTOMATIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO PCI EM PAVIMENTOS URBANOS

Amanda Jéssica Rodrigues da Silva, Juliana Dias da Silva Bezerra, Pedro Henrique dos Santos Pereira, Ricardo Almeida de Melo
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal da Paraíba

RESUMO
A avaliação de pavimentos urbanos é essencial para a sua manutenção e para a gestão eficiente dos recursos públicos. Tradicionalmente, essa avaliação é realizada por meio do levantamento visual contínuo, baseado na inspeção manual dos defeitos. Com o avanço do uso de tecnologias, modelos de inteligência artificial (IA) têm sido utilizados para automatizar a identificação desses defeitos a partir de imagens. Este estudo compara os valores do *pavement condition index* (PCI) obtidos tradicionalmente e por vídeo com YOLOv8 em 10 seções de vias urbanas de João Pessoa-PB. Foram realizados levantamentos de campo e cálculo do PCI com base nas duas abordagens. A análise dos resultados indica baixa sensibilidade do YOLOv8 na detecção de defeitos menores, causando em duas seções uma classificação mais alta para o método automatizado. Por fim, os resultados indicam que a IA pode ser uma ferramenta promissora para apoiar avaliações de pavimentos, com potencial para aumentar abrangência e reduzir o tempo de execução.

1. INTRODUÇÃO

A adequada manutenção e gestão da infraestrutura viária são fundamentais para garantir a vida útil dos pavimentos. Nesse contexto, a avaliação periódica da condição dos pavimentos desempenha um papel fundamental no processo de tomada de decisão para a destinação de recursos públicos e priorização de intervenções. Entre os métodos utilizados, destaca-se o levantamento visual contínuo (LVC), dito tradicional, que consiste na inspeção visual do pavimento em campo, com identificação e registro manual dos defeitos presentes na superfície do pavimento, e o LVC com vídeo, realizado com o avaliador dentro de um veículo em baixa velocidade, permitindo identificar tipos de defeitos, severidade e estimativas de extensão, para cálculo do *pavement condition index* (PCI), conforme a ASTM D6433 (2018).

Apesar da ampla aplicação, o levantamento tradicional apresenta limitações, como o elevado consumo de tempo, subjetividade e riscos ao avaliador. Diante dessas restrições, o avanço de tecnologias baseadas em aprendizagem de máquina e inteligência artificial (IA) tem despertado o interesse de pesquisadores, como exemplo, Sholevar, *et al.*, (2022) que analisaram estudos de várias ferramentas de aquisição de dados para avaliação das condições do pavimento, além disso, Tavares *et al.*, (2024) avaliaram a detecção de defeitos em pavimentos com *you only look once*, versão 3 (YOLOv3). Modelos como o YOLO têm se mostrado promissores para a detecção automática de defeitos em imagens e vídeos de pavimentos. Dessa forma, neste estudo utilizou-se o YOLOv8, por ser uma versão consolidada, estável e bastante difundida entre pesquisadores que trabalham com tarefas de detecção de objetos e classificação de imagens (Zeng e Zhong, 2024).

Neste cenário, o presente estudo tem como objetivo comparar os valores de PCI obtidos por meio do LVC identificados e calculados manualmente com aqueles gerados a partir da detecção automatizada de defeitos utilizando o YOLOv8, em seções urbanas da cidade de João Pessoa-PB. A pesquisa busca avaliar as vantagens e as limitações da aplicação de inteligência artificial como ferramenta de apoio no processo de avaliação da condição de pavimentos urbanos.

2. MÉTODO UTILIZADO

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em 10 seções de vias urbanas localizadas na cidade de João Pessoa-PB. As seções foram selecionadas com base em critérios de representatividade do tráfego e diversidade de defeitos presentes na superfície do pavimento. Definiu-se 10 seções de vias pavimentadas, com pavimento flexível, cada um com extensão de seção de 100 m. As seções escolhidas são avaliadas periodicamente em relação a serventia atual e consistem em vias significativas de ligação entre vários bairros da zona sul e a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e o centro da cidade. A localização das seções pode ser observada na Figura 1.



Figura 1: Localização das seções

2.2. Levantamento dos dados

O levantamento tradicional foi executado em campo, a partir da coleta de defeitos nos pavimentos realizada com base na norma técnica ASTM D6433 (2018) e manual do *Strategic Highway Research Program* (FHWA, 2014). Durante a inspeção, foram percorridas as 10 seções, nas quais se identificaram, classificaram e quantificaram os defeitos visíveis. Posteriormente, os dados foram organizados em planilhas específicas para cálculo do *pavement condition index* (PCI).

Para o levantamento automatizado, utilizou-se a metodologia do Levantamento Visual Contínuo (LVC) por vídeo, em que um *smartphone* com câmera de boa qualidade foi acoplado ao veículo para realizar a captura de vídeos, conforme os procedimentos descritos na norma DNIT 008/2003 PRO que consiste na inspeção visual do pavimento em campo, com identificação e registro dos defeitos visíveis na superfície do pavimento, realizada com o avaliador dentro de um veículo em baixa velocidade (40km/h).

2.3. Coleta de imagens para processamento

Paralelamente ao LVC, foram gravados vídeos das mesmas seções utilizando a câmera padrão de um *iPhone 14 Pro Max*, acoplado em um veículo em movimento com velocidade controlada de 40 km/h. As imagens foram extraídas em formato de quadros (*frames*) para posterior processamento. A gravação foi realizada com o *smartphone* posicionado na horizontal e fixado no para-brisa interno de um veículo leve, ajustado para capturar imagens panorâmicas da via. Foram gerados arquivos de vídeo registrados a 30 quadros por segundo, com aproximação 2x e resolução 4K (3840 x 2160 *pixels*). Os vídeos foram gravados durante o dia e em boas condições climáticas (Tavares *et al.*, 2024).

2.4. Detecção automatizada de defeitos

Para a detecção automatizada, foram obtidos *frames* dos vídeos e identificados os defeitos com a ferramenta gráfica *Labelimg*, conforme observado na Figura 2, trata-se de uma ferramenta utilizada para marcar itens de interesse em imagens com caixas delimitadoras ditas *bounding boxes*, tais imagens posteriormente foram processados e executadas em código Python para calcular a área dos defeitos em m², com base em *pixels*.



Figura 2: Processo de rotulação dos defeitos com a ferramenta *Labelimg*

A partir das anotações realizadas no *Labelimg*, cada detecção gerou, no Python, informações sobre o tipo de defeito e as dimensões da área afetada, conforme mostrado na Figura 3. Com essas informações, foi possível calcular o PCI seguindo a metodologia da ASTM D6433 (2018).

```
PROBLEMS  OUTPUT  DEBUG CONSOLE  TERMINAL  PORTS

PS C:\Users\amand\Área de Trabalho\DOUTORADO ATUAL\python\yolov8_env> & "c:/Users/amand/Área de Trabalho
c:/Users/amand/Área de Trabalho/DOUTORADO ATUAL/python/yolov8_env/10 trecho ler .txt e nome classes.py"
Imagem: frame_0022, Classe: Remendo, Área: 0.10 m²
Imagem: frame_0022, Classe: Buraco, Área: 0.03 m²
Imagem: frame_0024, Classe: Remendo, Área: 1.24 m²
Imagem: frame_0033, Classe: Desgaste, Área: 0.26 m²
Imagem: frame_0033, Classe: Buraco, Área: 0.08 m²
PS C:\Users\amand\Área de Trabalho\DOUTORADO ATUAL\python\yolov8_env>
```

Figura 3: Dimensões dos defeitos no Python obtidas a partir da rotulação no *Labelimg*

Para o estudo automatizado, o modelo YOLOv8 foi configurado e treinado para realizar a detecção e classificação automática de defeitos. Na Figura 4, observa-se um quadro (*frame*) extraído de uma das seções analisados com o modelo YOLOv8, o qual retornou a imagem com os defeitos identificados por meio de caixas delimitadoras. A caixa verde representa um defeito do tipo remendo, enquanto a caixa azul indica um defeito do tipo desgaste.

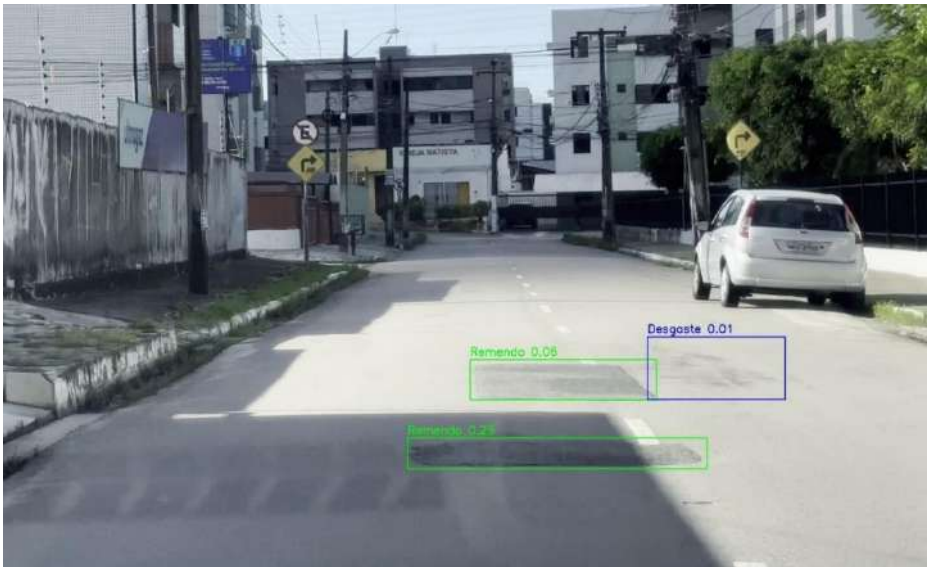


Figura 4: Defeitos detectados automaticamente com YOLOv8

3. RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados do PCI obtidos por meio do LVC e do modelo YOLOv8 para as seções avaliadas. Observa-se que a seção 8 foi dividida em 8A e 8B, em referência às suas faixas de tráfego, devido à considerável variação na conservação do pavimento.

Tabela 1: Comparação dos valores de PCI obtidos por LVC e YOLOv8 em 2025

Seção	PCI 2025 (LVC)	Classificação	PCI 2025 (YOLOv8)	Classificação	Diferença Absoluta (pontos)
1	82	Satisfatório	84	Satisfatório	2
2	70	Satisfatório	71	Satisfatório	1
3	97	Bom	98	Bom	1
4	75,5	Satisfatório	75	Satisfatório	0,5
5	84	Satisfatório	85	Bom	1
6	83,8	Satisfatório	87	Bom	3,2
7	63	Regular	69	Regular	6
8A	70	Satisfatório	76	Satisfatório	6
8B	85	Bom	90	Bom	5
9	70	Satisfatório	75	Satisfatório	5
10	87	Bom	90	Bom	3

A comparação entre os valores de PCI obtidos pela inspeção visual (LVC) e pela detecção automatizada via YOLOv8 foi realizada de forma direta, a partir da análise dos resultados. Para cada seção avaliada, foram confrontados os valores de PCI obtidos pelos dois métodos, identificando-se as diferenças absolutas. Observou-se que as classificações finais coincidiram em 8 das 10 seções avaliadas, evidenciando boa consistência geral. No entanto, verificou-se uma tendência do YOLOv8 em fornecer valores ligeiramente mais altos que o LVC, resultando em classificações mais otimistas em alguns casos. Essa diferença torna-se mais crítica em seções com valores próximos aos limites entre categorias, como nas seções 5 e 6, em que pequenas variações influenciaram diretamente a classificação. Esses resultados indicam o potencial do YOLOv8 como ferramenta de apoio, mas ressaltam a necessidade de calibração e validação contínua do método para assegurar maior confiabilidade.

A Tabela 2 foi elaborada com base nos trabalhos de Maryam *et al.*, (2023), Ibragimov *et al.*, (2024) e Lu *et al.*, (2025), e apresenta um resumo comparativo entre os diferentes métodos de avaliação.

Tabela 2: Comparativo entre método tradicional e automatizado para determinação do PCI

Item	Método Tradicional	Método Automatizado
Subjetividade	Alta subjetividade, por depender da experiência do avaliador	Padronização e reprodutibilidade dos resultados
Tempo	Demorado	Alta agilidade na coleta e processamento dos dados
Segurança	Risco à segurança do avaliador, devido à proximidade do tráfego	Maior segurança, pois dispensa presença física na via
Atualização de dados	Dificuldade na atualização frequente dos dados	Maior frequência de atualização, com novas imagens e reprocessamento automático
Especialização	Requer estudos e experiência	Requer treinamento e validação do modelo, o que exige tempo e dados rotulados
Confiança	Método normatizado, com ampla aceitação e uso consolidado	Possíveis falhas de detecção em situações não representadas no treinamento.

A comparação entre os métodos tradicional e automatizado para determinação do PCI evidencia vantagens e limitações distintas. O tradicional é de baixo custo, simples e amplamente aceito, mas apresenta subjetividade, baixa reprodutibilidade, maior tempo de execução e exposição ao tráfego. O automatizado, oferece agilidade na coleta e análise de dados, segurança, padronização dos resultados e possibilidade de atualização frequente, embora exija maior conhecimento técnico. Suas limitações, como variações nas imagens e possíveis erros de

superestimações do PCI, podem ser minimizadas por capacitação, calibração do modelo, aumento e diversificação da base de imagens e correções de perspectiva.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo analisar os métodos tradicional e automatizado utilizando o YOLOv8, para determinação do PCI em pavimentos urbanos. Neste estudo foi possível observar que houve uma pequena variação entre os resultados do PCI, apresentando bom consistência entre os métodos, evidenciando o potencial na aplicação de modelos com inteligência artificial como ferramenta de apoio no processo de avaliação da condição de pavimentos urbanos. Sendo elas, tempo de levantamento e processamento de dados, possibilidade de análise e reanálise dos arquivos sem voltar a campo, obtenção do cálculo de área e PCI de maneira automatizada, mais segurança para o avaliador.

Embora o método tradicional ainda seja amplamente utilizado por sua praticidade e tradição, os métodos automatizados vêm se consolidando como uma alternativa moderna e eficiente, especialmente em contextos que demandam rapidez, abrangência e precisão na gestão da malha viária.

Portanto, para estudos futuros, recomenda-se ampliar a base de dados, incluindo mais imagens e rótulos de defeitos, bem como analisar uma amostra maior de seções de pavimento, de modo a obter correlações mais representativas. Além disso, sugere-se aprofundar a comparação entre os métodos por meio de métricas estatísticas de desempenho e testes de hipótese, permitindo avaliar não apenas a magnitude das diferenças, mas também sua significância estatística, aumentando a robustez e a reprodutibilidade dos resultados.

Agradecimentos

Agradeço à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM (2018) Norma ASTM D6433-18 (2018). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. American Society for Testing and Materials. States United American. American Society for Testing and Materials International.

DNIT (2003) Norma DNIT 008/2003 – PRO. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos-Procedimento. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

FHWA (2014). Manual do Strategic Highway Research Program (SHRP). Washington, DC. Federal Highway Administration.

Ibragimov, E.; Kim, Y.; Lee, J. H.; Cho, J. e Lee, J. J. (2024). Automated pavement condition index assessment with deep learning and image analysis: an end-to-end approach. *Sensors*, 24(7), 2333. DOI: https://doi.org/10.3390/s24072333

JOÃO PESSOA (PB). Plano Diretor de Mobilidade Urbana. João Pessoa: Prefeitura Municipal, 2025.

Lu, S. H.; Lin, J. D. e Chiou, Y. S. (2025). Analysis and Verification Results of Manual Inspection of Pavement Condition Index. *Applied Sciences*, *15*(10), 5600. DOI: https://doi.org/10.3390/app15105600

Sholevar, N.; Golroo, A. e Esfahani, S.R. (2022) Machine learning techniques for pavement condition evaluation, *Automation in Construction*, v. 136, p. 104190. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104190

Maryam, H.; Bulgis, B. e Madami, R. (2023). Comparative Study of Performance between International Roughness Index (IRI), Pavement Condition Index (PCI), and Bina Marga Method on Roadways. *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, *8*(1), 97-116. DOI: https://doi.org/10.51557/pt_jiit.v8i1.2030

Tavares, M. F. G.; F. Nobre Júnior e Calheiros Espíndola, A. (2024) Avaliação da detecção automatizada de defeitos em pavimentos com YOLOv3: impacto das técnicas de coleta. *Transportes*, v. 32, n. 2, 2024. DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2796.

Zeng, J., J. e H. Zhong. YOLOv8-PD: an improved road damage detection algorithm based on YOLOv8n model. *Sci Rep* 14, 12052 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-62933-z

Amanda Jéssica Rodrigues da Silva (amanda.jessica@academico.ufpb.br)
Juliana Dias da Silva Bezerra (juliana.dias.raveo@gmail.com)
Pedro Henrique dos Santos Pereira (pedrohenrique.96ph@gmail.com)
Ricardo Almeida de Melo (ricardo@ct.ufpb.br)
Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campus I, Castelo Branco, João Pessoa-PB, Brasil.

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS COM FWD E TSD EM CONDIÇÕES CONTROLADAS DE REPETIBILIDADE

Rafael Vicente Mota, Caio Mascarenhas Raul, Felipe Filizzola Camargo, André Felipe Vale
RoadRunner Engenharia

RESUMO
Este estudo comparou os resultados de deflexão obtidos com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e o *Traffic Speed Deflectometer device* (TSDd) em três segmentos de uma rodovia concessionada no estado de São Paulo. Foram realizadas cinco passadas com cada equipamento em dois dias consecutivos, sob condições controladas. A metodologia consistiu em levantamentos de campo, no pré-processamento dos dados e de análises de variabilidade por meio da determinação do coeficiente de determinação (R^2), erro médio quadrático (RMSE), gráficos de Bland–Altman e perfis longitudinais. Os resultados mostraram uma elevada repetibilidade do TSDd ($R^2 > 0,96$) e maior variabilidade no FWD ($R^2 > 0,74$). Apesar das diferentes tendências entre os dois equipamentos, observou-se uma boa concordância global entre os métodos. Conclui-se que o TSDd apresenta valores consistentes com os resultados dos ensaios deflectométricos com o FWD, porém, com vantagens em termos de repetibilidade dos ensaios.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural de pavimentos tem como principal objetivo determinar sua capacidade de resistir às cargas aplicadas por meio das características de resistência e deformabilidade das camadas constituintes. Essas informações são utilizadas para a definição de estratégias adequadas de reabilitação em níveis de rede e/ou de projeto, de modo a garantir um bom desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil. Dentre as formas de se efetuar essa avaliação, os levantamentos deflectométricos por meio de ensaios não destrutivos (NDT) possuem papel central, podendo ou não ter interferência com usuário durante sua operação (Huang *et al.*, 2022).

O *Falling Weight Deflectometer* (FWD) é amplamente utilizado em avaliações estruturais de rodovias, sendo considerado o padrão internacional. Durante os ensaios, o FWD aplica um pulso de carga vertical por meio da liberação controlada de uma massa, e registra a carga e os deslocamentos verticais superficiais em diferentes distâncias do centro da carga (Madsen e Levenberg, 2017). No entanto, por ser um equipamento cuja operação exige a parada sobre o local de ensaio, o FWD apresenta baixa produtividade, alto custo por quilômetro ensaiado e necessidade de interdição de faixa, o que impacta a fluidez do tráfego e a segurança dos usuários. A busca por maior eficiência, segurança operacional e cobertura espacial nos levantamentos deflectométricos levou ao desenvolvimento de tecnologias móveis. Entre elas, destaca-se o *Traffic Speed Deflectometer device* (TSDd), que realiza medições contínuas de deflexão em velocidades compatíveis com o tráfego. O TSDd utiliza lasers Doppler para medir a velocidade de deslocamento da superfície do pavimento durante o trânsito do veículo. Após os ajustes necessários para a velocidade do caminhão, é possível calcular os gradientes de deflexão (Hildebrand e Rasmussen, 2002; Simonin *et al.*, 2005). Essa tecnologia já é aplicada em diversos países, como Reino Unido (Ferne *et al.*, 2015), Polônia (Sudyka *et al.*, 2021), Austrália (Muller, 2015) e Estados Unidos (Huang *et al.*, 2022). No Brasil, o ano de 2023 foi um marco para a difusão do TSDd, com três eventos significativos: (i) a realização de um experimento conduzido pelo DNIT que avaliou aproximadamente 12.000 km de rodovias; (ii) a publicação da norma DNIT 440/2023-PRO, que padroniza os procedimentos de execução desse tipo de ensaio; e (iii) a chegada e início da operação do Falkorr®, o primeiro TSDd pertencente a uma empresa latino-americana.

Considerando a ampla utilização do FWD e a introdução recente do TSDd no Brasil, é essencial investigar a compatibilidade entre os resultados fornecidos por esses dois equipamentos. Isso é especialmente importante para os gestores rodoviários, cujas decisões de manutenção e de projeto baseiam-se, em grande parte, em séries históricas obtidas com o FWD. Até que as novas tecnologias estejam plenamente consolidadas, torna-se necessário compará-las e correlacioná-las para garantir segurança e coerência nas decisões técnicas (Levenberg *et al.*, 2018). Diversos estudos buscaram realizar essa comparação por meio da medição de um mesmo trecho com ambos os equipamentos, extração de índices de desempenho e aplicação de métodos estatísticos para avaliar as diferenças nos resultados (Xiao *et al.*, 2021; Muller e Roberts, 2013; Flintsch *et al.*, 2013; Chai *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2024; Levenberg *et al.*, 2018). Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo comparar a reprodutibilidade entre os resultados de deflexão medidos com o TSDd e com o FWD, a partir de levantamentos sistemáticos realizados em uma rodovia concessionada no estado de São Paulo.

2. METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram selecionados três segmentos de uma rodovia concessionada no estado de São Paulo com 2 km de extensão cada. Os levantamentos foram realizados na faixa de tráfego mais pesado da rodovia. Em cada segmento, foram realizadas cinco passadas de medição com cada equipamento. Foram utilizados dois equipamentos FWD e um TSDd no experimento. As medições com o FWD seguiram um espaçamento regular de 40 metros entre pontos, resultando em uma série de valores discretos ao longo do segmento, e foram executadas com duas batidas por ponto, sendo a primeira de assentamento. Por sua vez, o equipamento TSDd operou em velocidade de tráfego, realizando medições contínuas ao longo de toda a extensão de cada trecho, mantendo-se uma velocidade constante entre as passadas para assegurar a uniformidade das condições operacionais. Os levantamentos foram executados em dois dias consecutivos, sendo o primeiro dia reservado para a realização de cinco passadas com o TSDd e cinco passadas com um dos equipamentos FWD em todos os trechos. No segundo dia, cinco novas passadas foram realizadas com um segundo equipamento FWD, operado pela mesma equipe técnica do dia anterior. O planejamento das medições buscou minimizar variações ambientais, especialmente de temperatura, por meio da realização dos ensaios em horários semelhantes nos dois dias, que resultaram na temperatura média do pavimento de 27,4°C.

Os dados coletados foram, inicialmente, submetidos a uma etapa de pré-processamento. Primeiramente, aplicou-se uma filtragem de qualidade para eliminar leituras consideradas inconsistentes, com valores anômalos ou com falhas de registro de carga. Em seguida, todos os valores de deflexão medidos com todos os equipamentos foram corrigidos para uma mesma condição de temperatura do pavimento (nesse caso, de 25°C), utilizando os modelos da *Federal Highway Administration* para esse ajuste (FHWA, 2000), e para a mesma carga de referência de 40 kN. Para permitir a comparação entre os equipamentos, os dados do TSDd, originalmente contínuos, foram compatibilizados com os pontos discretos medidos pelo FWD. Esse pareamento foi feito por meio da identificação, no traço do TSDd, das deflexões registradas em um intervalo de ±10 metros em torno de cada ponto de medição do FWD. A média dos valores dentro desse intervalo foi utilizada como a deflexão representativa do TSDd para cada ponto. Para as análises do presente estudo não foi aplicada correlação entre os equipamentos.

A comparação entre os dois equipamentos foi conduzida com base em diferentes abordagens estatísticas. A primeira consistiu no cálculo do coeficiente de determinação (R^2) entre os conjuntos de dados obtidos pelas cinco passadas de ambos os dispositivos em cada dia de levantamento para se verificar sua repetibilidade. Também foi calculado o erro médio quadrático (RMSE), como medida da magnitude média das discrepâncias entre os valores obtidos pelos dois equipamentos para cada trecho da rodovia. O RMSE foi calculado tanto em termos absolutos (0,01 mm) quanto relativos (%), permitindo avaliar a ordem de grandeza dos desvios entre os dois métodos em relação às deflexões medidas. Adicionalmente, foi realizada a análise de Bland–Altman, amplamente utilizada na comparação de métodos de medição. Essa técnica permite avaliar a existência de viés sistemático e verificar se as diferenças entre os dois equipamentos se mantêm dentro de limites de concordância aceitáveis. Para cada ponto pareado, calculou-se a média dos valores medidos pelos dois tipos de equipamentos e a diferença entre eles. Em seguida, estimou-se o viés (média das diferenças) e seu desvio padrão. Com esses valores, foram definidos os limites de concordância (LoA), superiores e inferiores para 95% de confiabilidade. Por fim, foi realizada uma análise gráfica dos perfis longitudinais de deflexão.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta as matrizes de correlação (R^2) entre as passadas realizadas por cada equipamento, organizadas por tipo e dia de medição. Os valores elevados de R^2 entre as passadas do TSDd indicam alta repetibilidade das medições realizadas por esse equipamento, com coeficientes variando de 0,962 a 0,988. Essa consistência sugere que o TSDd foi capaz de manter boas condições operacionais durante as cinco passadas de cada trecho, além de mostrar atendimento ao critério previsto na norma DNIT 440/2023-PRO que estabelece uma condição satisfatória de repetibilidade quando o $R^2 \geq 0,95$.

No caso do FWD, observou-se uma maior variabilidade entre as passadas, com R^2 variando de 0,796 a 0,876 no dia 1, e de 0,737 a 0,829 no dia 2. Embora esses valores ainda indiquem associação alta, a repetibilidade das medições com o FWD foi inferior à observada com o TSDd, podendo refletir sensibilidade a pequenas variações de operação, como o posicionamento na estação de ensaio quando se faz a avaliação com uma rodovia em serviço, calibração, ou até mudanças ambientais sutis entre as passadas.

Tabela 1: R^2 da deflexão máxima entre passadas de um mesmo equipamento

R^2	FWD - 1					FWD - 2					TSDd				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
P1	1,000					1,000					1,000				
P2	0,876	1,000				0,786	1,000				0,971	1,000			
P3	0,826	0,854	1,000			0,809	0,737	1,000			0,965	0,977	1,000		
P4	0,833	0,838	0,872	1,000		0,794	0,796	0,828	1,000		0,962	0,971	0,973	1,000	
P5	0,796	0,798	0,818	0,825	1,000	0,826	0,794	0,815	0,829	1,000	0,967	0,968	0,974	0,988	1,000

A Tabela 2 apresenta os valores de R^2 e RMSE entre os equipamentos TSDd e FWD para a deflexão sob a ação da carga (D_0) e para diferentes parâmetros de bacia (IC, SCI, BDI e LLI), considerando tanto os valores absolutos (0,01 mm) quanto os relativos (%). De modo geral, as medições próximas ao ponto de aplicação da carga exibem boa correlação, com D_0 apresentando o maior R^2 (0,836) e o menor RMSE relativo (13,1%). Importa enfatizar que leituras próximas (p.ex., D_0) não refletem apenas as camadas superficiais: elas integram a resposta de toda a estrutura, incluindo o subleito. Assim, embora índices mais próximos ao carregamento (IC, SCI) ponderem relativamente mais as camadas superiores, a influência do conjunto estrutural permanece presente. À medida que se considera a influência predominante de camadas mais profundas do pavimento, observa-se uma ligeira queda no R^2, que alcança valores próximos a 0,7 para o LLI (associado ao comportamento do subleito), enquanto o RMSE relativo aumenta, até em função dos menores valores das deflexões absolutas à medida que se distancia o ponto de leitura do ponto de carregamento.

Tabela 2: R^2 e RMSE entre os equipamentos TSDd e FWD

Local	Parâmetro	D0	IC (D0-D20)	SCI (D0-D30)	BDI (D30-D60)	LLI (D60-D90)
Geral	R^2	0,836	0,836	0,836	0,828	0,708
	RMSE (0,01 mm)	4,3	2,6	3,1	1,3	0,9
	RMSE (%)	13,1%	33,6%	25,6%	14,4%	36,7%
Trecho 1	R^2	0,821	0,868	0,874	0,842	0,545
	RMSE (0,01 mm)	2,0	1,9	2,1	0,6	0,7
	RMSE (%)	9,6%	35,9%	25,8%	9,9%	35,3%
Trecho 2	R^2	0,899	0,912	0,910	0,915	0,701
	RMSE (0,01 mm)	4,7	3,3	3,8	1,2	1,0
	RMSE (%)	13,0%	38,6%	28,1%	13,1%	40,1%
Trecho 3	R^2	0,675	0,667	0,658	0,660	0,638
	RMSE (0,01 mm)	6,1	2,5	3,4	2,1	1,0
	RMSE (%)	16,7%	26,4%	23,0%	20,0%	34,7%

A análise por trecho reforça essa interpretação: a compatibilidade entre os equipamentos é maior quando se considera os parâmetros de bacia associados às camadas superiores do pavimento (D0, IC, SCI e BDI). Ainda, o Trecho 2 apresentou os maiores coeficientes de determinação em todos os parâmetros, indicando maior consistência entre os equipamentos, enquanto o Trecho 3 mostrou os valores mais baixos, sugerindo condições de medição menos controladas. No geral, esses resultados confirmam uma boa compatibilidade global entre os equipamentos, principalmente para os geofones próximos à carga (D_0), onde a interpretação da deflexão é mais crítica para a avaliação estrutural.

A análise de Bland–Altman foi aplicada para os conjuntos de dados pareados, buscando avaliar a concordância entre os equipamentos e identificar a presença de viés sistemático ou variações não explicadas. Os resultados são apresentados na Figura 1. O viés geral entre os dois equipamentos foi de -1,9 x 0,01 mm, o que, em termos médios, implica em diferenças inferiores a 5% nas leituras dos equipamentos, quando comparados diretamente sem a aplicação de correlação entre as medidas (correlação esta que não foi objeto do presente estudo). O desvio padrão das diferenças foi de 6,3 x 0,01 mm, resultando em limites de concordância (LoA) de +8,4 x 0,01 mm e –12,2 x 0,01 mm, com 95% de confiabilidade. A análise do gráfico mostra que a maioria dos pontos está concentrada dentro desses limites, o que sugere uma concordância aceitável entre os métodos em condições operacionais normais. Entretanto, observou-se que alguns pontos, especialmente aqueles associados a médias de deflexão mais elevadas, ultrapassaram o limite inferior de concordância. Essa tendência indica a necessidade de emprego de correlação entre os registros dos dois equipamentos para se garantir a compatibilidade entre os ensaios especialmente em pavimentos com maiores níveis deflectométricos. Para

trabalhos futuros, sugere-se comparar esses resultados com valores correlacionados, de modo a verificar se essa tendência se mantém.

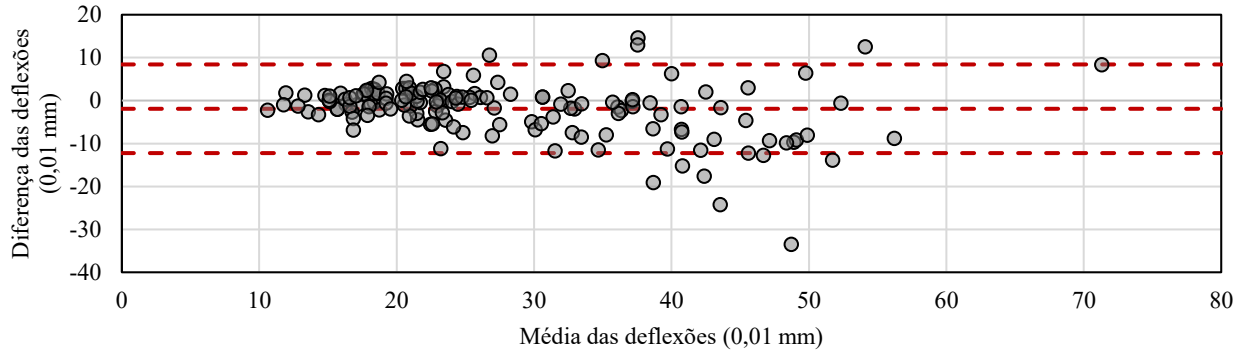


Figura 1: Resultados da análise de Bland–Altman para o comparativo dos resultados do TSDd com o FWD

Os perfis longitudinais de deflexão da Figura 2 reforçam os resultados numéricos obtidos nas comparações anteriores. De forma geral, as linhas médias dos equipamentos apresentaram tendências semelhantes ao longo dos segmentos, com o TSDd reproduzindo adequadamente os padrões espaciais de variação de rigidez.

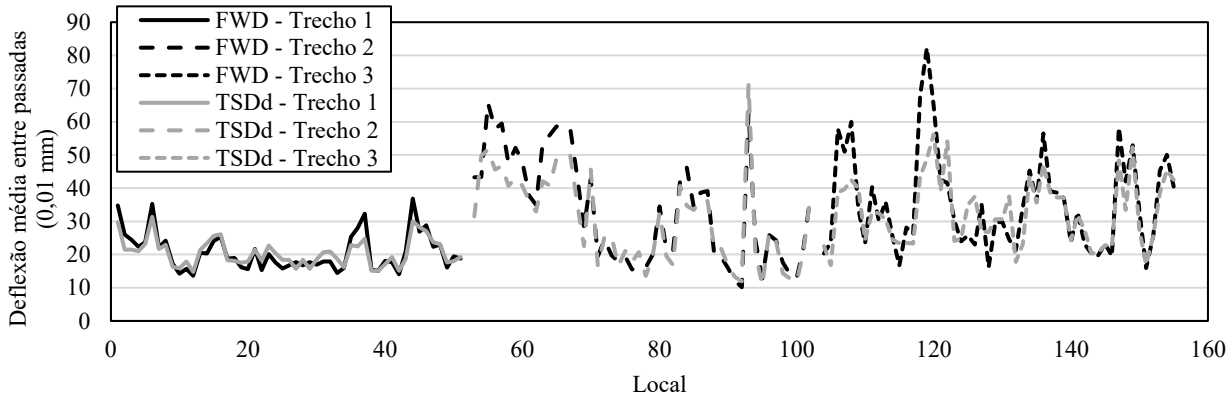


Figura 2: Perfis longitudinais médios dos três segmentos avaliados

A análise visual dos gráficos mostra uma boa correspondência entre as curvas de deflexão medidas por ambos os equipamentos. As regiões com picos e vales de maior deflexão foram identificadas por ambos os métodos, com pequenas variações locais. Esses resultados corroboram com a literatura técnica e indicam que, mesmo com diferenças nos princípios de funcionamento, o TSDd apresenta bons níveis de precisão, confiabilidade e reprodutibilidade, tornando-se uma alternativa promissora ao FWD para levantamentos em nível de projeto, especialmente em contextos onde a produtividade e a segurança operacional são fatores decisivos. Observa-se ainda que em alguns locais com pico de deflexão, os valores medidos pelo TSDd mostraram-se inferiores aos do FWD, corroborando a observação feita na análise de Bland–Altman quanto à necessidade de se correlacionar os registros dos equipamentos de forma a caracterizar adequadamente locais de deflexões mais elevadas.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo comparar as medições de deflexão realizadas com os equipamentos FWD e TSDd em segmentos de rodovia sob condições controladas de repetibilidade. As análises abrangeram a comparação entre passadas individuais de cada equipamento, bem como a comparação direta entre os dois métodos, utilizando métricas estatísticas clássicas e análise gráfica de perfis longitudinais. Com base nos resultados obtidos, pode-se destacar as seguintes conclusões:

- As correlações entre as passadas do TSDd foram consistentemente elevadas, com valores de R^2 variando de 0,962 a 0,988, indicando excelente estabilidade operacional do equipamento ao longo das medições e atendimento à norma nacional.
- As passadas dos dois equipamentos FWD apresentaram correlações internas mais baixas (R^2 entre

0,737 e 0,876), evidenciando maior sensibilidade a variações operacionais, especialmente no segundo dia de ensaios.

- A análise do RMSE por trecho indicou boa concordância entre os equipamentos.
- A análise de Bland–Altman revelou um viés negativo menor que 5%, indicando a necessidade de emprego de correlação entre os registros dos dois tipos de equipamentos para se garantir a compatibilidade entre os ensaios especialmente em pavimentos com maiores níveis deflectométricos.
- Apesar das discrepâncias pontuais, a maior parte das diferenças entre os equipamentos esteve dentro dos limites de concordância definidos em 95% de confiabilidade, o que apoia o uso do TSDd como ferramenta alternativa ao FWD em avaliações em níveis de projeto.
- A comparação gráfica dos perfis de deflexão ao longo dos segmentos evidenciou que ambos os equipamentos captam padrões espaciais semelhantes de rigidez estrutural.

Em suma, os resultados evidenciaram a alta repetibilidade das medições realizadas com ambos os equipamentos e demonstraram uma concordância global satisfatória entre os valores de deflexão obtidos pelo FWD e pelo TSDd. Conclui-se que o TSDd apresenta valores consistentes com os resultados dos ensaios deflectométricos com FWD com vantagens em termos de repetibilidade dos ensaios o que permite maior consistência nas informações referentes a condição estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ferne B. W.; S. Drusin; S. Baltzer; P. Langdale e B. Meitei (2015) UK Trial to compare 1st and 2nd Generation Traffic Speed Deflectometers. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha.

FHWA – Federal Highway Administration (2000) Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement. FHWA-RD-98-085, McLean, VA.

Flintsch, G.; S. Katicha; J. Bryce; B. Ferne; S. Nell e B. Diefenderfer (2013) Report S2-R06F-RW-1: Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Hildebrand, G. e S. Rasmussen (2002) Development of a High Speed Deflectograph. Danish Road Institute, Report 117, Road Directorate, Roskilde, Dinamarca.

Huang B.; M. Zhang; H. Gong e P. Polaczyk (2022) Evaluation of Traffic Speed Deflectometer for Collecting Network-Level Pavement Structural Data in Tennessee. Final Report. Department of Civil and Environmental Engineering. The University of Tennessee, Knoxville. No RES2020-08.

Levenberg, E.; M. Pettinari; S. Baltzer e B. M. L. Christensen (2018) Comparing Traffic Speed Deflectometer and Falling Weight Deflectometer Data. Transportation Research Record, 2672(40), p. 22-31. https://doi.org/10.1177/0361198118768524.

Madsen, S. S. e E. Levenberg (2017) Dynamic Backcalculation with Different Load-Time Histories. Road Materials and Pavement Design. DOI: 10.1080/14680629.2017.1307263.

Muller W. (2015) A comparison of TSD, FWD and GPR field measurements. International SymposiumNon-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlim, Alemanha.

Muller, W. B. e J. Roberts (2013) Revised Approach to Assessing Traffic Speed Deflectometer Data and Field Validation of Deflection Bowl Predictions. International Journal of Pavement Engineering, v. 14, n. 4, p. 388–402.

Simonin, J. M.; D. Lièvre; S. Rasmussen e G. Hildebrand (2005) Assessment of the Danish High Speed Deflectograph in France. Proc. 7th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, ISBN 8292506241.

Sudyka J.; P. Harasim; M. Kowalska-Sudyka e T. Mechowski (2021) Quality control of traffic speed deflectometer mesurements on road network. Roads and Bridges 20, p. 441 – 450.

Wu, C.; Y. Duan e H. Wang (2024) Signal Denoising of Traffic Speed Deflectometer Measurement Based on Partial Swarm Optimization– Variational Mode Decomposition Method. Sensors, 24, 3708. https://doi.org/10.3390/s24123708.

Xiao F.; X. X. H. Qian e N. A. Serji (2021) Utilization of traffic speed deflectometer for pavement structural evaluations, Measurement, v. 178, 109326, ISSN 0263-2241, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109326.

Rafael Vicente Mota (rafael.mota@rrunner.com.br)
Caio Mascarenhas Raul (caio.raul@rrunner.com.br)
Felipe Filizzola Camargo (felipe.camargo@rrunner.com.br)
André Felipe Vale (andre.vale@rrunner.com.br)
RoadRunner Engenharia | Rod. Geraldo Scavone, 2080, Galpão 37, Jardim Califórnia – Jacareí, SP, Brasil

AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM UMA AMOSTRA DE RODOVIAS NO DISTRITO FEDERAL COM O MERLIN

Luis Eduardo B. Komka[1], **Fábio Zanchetta**[1], **Gisandra Faria de Paula**[2]
[1]Universidade de Brasília – UnB, [2]Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal – DER/DF

RESUMO
O presente artigo apresenta uma avaliação da irregularidade longitudinal em trechos das vias L3 e L4 Norte, utilizando o dispositivo MERLIN (*Machine for Evaluating Roughness using Low-cost Instrumentation*). A irregularidade longitudinal do pavimento é quantificada pelo Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index* - IRI). Para cada segmento avaliado, foi determinado o valor de IRI por meio de medições diretas de perfil longitudinal com o MERLIN. As medições seguiram método padronizado, cujo parâmetro estatístico característico levou ao cálculo do IRI. Os resultados obtidos indicam valores de IRI médio de 2,92 m/km na L3 Norte e IRI médio de 3,32 m/km na L4 Norte. Pela classificação do DNIT, a maioria dos trechos apresentou condição boa para a L3 Norte e regular para a L4 Norte. Os resultados demonstram a viabilidade do MERLIN para avaliações de irregularidade em campo, fornecendo subsídios para classificar o estado funcional dos pavimentos e identificar necessidades de manutenção.

1. INTRODUÇÃO

A irregularidade longitudinal de um pavimento é amplamente reconhecida como um dos principais indicadores funcionais da via, influenciando diretamente a segurança, o conforto dos usuários e os custos operacionais dos veículos. Irregularidades longitudinais excessivas na superfície da rodovia tendem a aumentar esforços dinâmicos dos veículos sobre os pavimentos, elevando despesas de manutenção, desgaste de pneus e reduzindo a velocidade de tráfego segura.

Por definição, a irregularidade longitudinal de um pavimento corresponde às variações verticais da superfície ao longo do seu perfil, afetando diretamente a qualidade de rolamento proporcionada aos usuários (DNIT, 2006). O IRI, por sua vez, pode ser definido como a razão entre as variações verticais acumuladas pela distância percorrida, cujo valor é expresso em m/km (SAYERS *et al.*, 1986). Valores baixos de IRI indicam um pavimento íntegro, com poucas irregularidades, enquanto valores altos indicam um pavimento desconfortável. Além disso, o IRI está fortemente correlacionado à percepção do usuário sobre a condição da via (PATERSON, 1987).

Os equipamentos para aquisição de dados da irregularidade longitudinal podem ser agrupados, segundo o nível de automação e o princípio de operação, em quatro categorias: (1) medição direta, com métodos topográficos manuais, por exemplo, nível e mira; (2) medição indireta do perfil, usando dispositivos que registram mecanicamente o perfil longitudinal enquanto são deslocados ao longo da via, como o próprio MERLIN; (3) sistemas do tipo resposta, que medem a irregularidade pela resposta dinâmica de um veículo padrão; e (4) sistemas com sensores sem contato, que utilizam tecnologias como laser ou ultrassom em veículos em movimento, a exemplo dos perfilômetros a laser, capazes de obter o perfil em alta velocidade (DNIT, 2006).

Com a evolução das tecnologias, a medição de irregularidade passou a ser realizada preferencialmente por perfilômetros a laser de alta velocidade, fornecendo diretamente o perfil longitudinal e permitindo o cálculo preciso do IRI. Entretanto, tais equipamentos modernos possuem custo elevado e demandam equipe especializada, o que pode ser uma limitação em determinados contextos. Nesse cenário, métodos alternativos de menor custo, como o dispositivo MERLIN, ganham relevância por possibilitar medições de IRI de forma simples e com elevada acurácia e precisão em campo.

Desenvolvido pelo *Transport Research Laboratory* (TRL) no Reino Unido, o MERLIN consiste basicamente em uma estrutura metálica de aproximadamente 1,8 m de comprimento, dotada de uma roda frontal e um apoio fixo traseiro, além de uma sonda de medição posicionada em seu ponto médio (CUNDILL, 1986). A sonda liga-se a um braço móvel articulado; na extremidade superior desse braço há um ponteiro que se desloca sobre um quadro graduado conforme a sonda acompanha as variações da superfície do pavimento. A operação do equipamento é simples: ele é posicionado sucessivamente ao longo do trecho a ser medido e, a cada nova posição, registra-se no quadro a posição atingida pelo ponteiro. Repetindo-se essa leitura em intervalos regulares, constrói-se um histograma de frequências das posições do ponteiro, cuja largura característica está diretamente relacionada à irregularidade do perfil longitudinal. Pavimentos mais irregulares produzem maior

dispersão nas leituras (histograma mais largo), enquanto pavimentos menos irregulares resultam em leituras concentradas (histograma estreito). Cundill (1986) desenvolveu, por simulação computacional, uma calibração que correlaciona a largura do histograma, normalizada para conter 90 % das leituras (excluindo-se 5% superiores e 5% inferiores), com o valor de IRI correspondente. Dessa forma, o equipamento fornece estimativas de IRI de maneira indireta. Vale ressaltar que o MERLIN apresenta boa precisão para faixas de irregularidade típicas de pavimentos rodoviários, aproximadamente de 2,4 a 15,9 m/km, e, por seu baixo custo de fabricação e facilidade de operação, tem sido empregado em diversos países em desenvolvimento como alternativa para avaliações de irregularidade longitudinal ou para calibração de aparelhos do tipo resposta (CUNDILL, 1986).

Para fins gerenciais, órgãos rodoviários classificam os pavimentos em faixas de qualidade baseadas no IRI. Por exemplo, o DNIT adota categorias de Excelente a Péssimo conforme intervalos de IRI: pavimento Excelente apresenta valores de 1,0 a 1,9 m/km, enquanto Péssimo refere-se a IRI acima de 4,6 m/km; faixas intermediárias definem condição Boa, Regular e Ruim (DNIT, 2006). Essas classificações orientam a tomada de decisão quanto às necessidades de manutenção, onde pavimentos com IRI elevado geralmente requerem intervenções de restauração para restabelecer a condição de rolamento adequada (DNIT, 2006).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a irregularidade longitudinal de uma amostra de duas vias pavimentadas no Distrito Federal, empregando o MERLIN. Busca-se, assim, caracterizar o estado funcional desses pavimentos em termos de IRI e verificar a aplicabilidade do MERLIN como ferramenta de apoio para auxiliar na identificação de trechos que demandem manutenção.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo e Preparação

A pesquisa foi conduzida em duas vias pavimentadas do Distrito Federal, a via L3 norte e via L4 norte. Foram medidos 12 segmentos na via L3 norte, enquanto na via L4 norte mediu-se 3 segmentos. Cada segmento mede aproximadamente 400 metros de extensão, que equivalem a 200 giros da roda dianteira do MERLIN. As medições foram feitas nas trilhas de roda interna e externa, totalizando 30 levantamentos. Antes das medições, o aparelho MERLIN foi devidamente calibrado e montado conforme especificações do fabricante, garantindo que a escala de leitura estivesse corretamente posicionada e que o equipamento pudesse se apoiar verticalmente em seus três pontos de contato (roda dianteira, patim traseiro e sonda central) a cada posição. A Figura 1 indica os segmentos das vias levantadas.

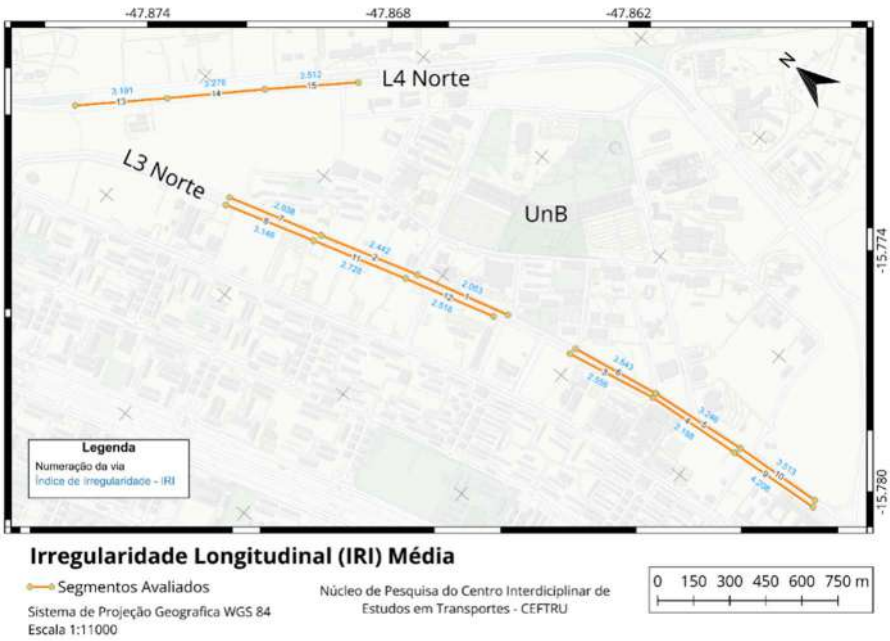


Figura 1: Segmentos estudados nas vias L3 e L4 Norte.

2.2. Procedimento de Medição em Campo

As medições de irregularidade longitudinal com o MERLIN seguiram o procedimento padronizado descrito por Cundill (1986) e por trabalhos prévios. Em cada segmento, escolheu-se um ponto inicial e, a partir dele, realizou-se a seguinte sequência: o equipamento era posicionado com todos os apoios sobre a superfície no ponto inicial e era feita a primeira leitura do ponteiro; em seguida, utilizando a roda frontal como guia, o operador deslocava manualmente o MERLIN até o próximo ponto de medição, correspondente a uma volta completa da roda. Nesta nova posição, o aparelho era novamente apoiado verticalmente, assegurando-se que os dois patins e a roda estivessem em pleno contato com o pavimento, e, então, registrava-se a leitura indicada pelo ponteiro na escala fixa do quadro de medições. O processo de avanço em intervalos regulares de 2 m e registro de leitura foi repetido sucessivamente até se completarem 200 leituras ao longo do trecho em questão. Esse número de observações foi definido com base em estudos que mostraram ser suficiente para captar a irregularidade longitudinal do segmento com confiança estatística, dadas as características de sensibilidade do MERLIN a comprimentos de onda em torno de 2 metros. Durante a coleta, assegurou-se condições adequadas de segurança e precisão: o trecho foi sinalizado para alertar os motoristas e eventuais detritos ou interferências sobre a pista foram removidos para não afetar as leituras.

2.3. Processamento dos Dados e Cálculo do IRI

Concluída a etapa de campo em um segmento, os 200 valores de leitura do MERLIN foram transcritos para uma planilha de cálculo. Em seguida, construiu-se o histograma de frequências dessas leituras, distribuindo-as em classes de amplitude adequada para representar a variabilidade observada. Conforme o procedimento do MERLIN, aplicou-se um filtro estatístico descartando-se os 10% de valores mais extremos em cada cauda da distribuição. Na prática, isso implicou excluir as 20 leituras mais afastadas do centro (as 10 maiores e as 10 menores dentre as 200), eliminando possíveis *outliers* ou erros de leitura que poderiam distorcer o resultado. Com base no histograma residual (com 180 leituras centralizadas), determinou-se a largura característica "D" correspondente a 90% das leituras em torno da mediana. Este valor "D", expresso em milímetros de deslocamento do ponteiro, considerando a escala utilizada, foi então empregado para calcular o IRI estimado do segmento através da equação de correlação própria do equipamento MERLIN. Essa equação, desenvolvida pelo TRL, relaciona linearmente "D", ajustado para a escala 1:1 do perfil real, com o índice de irregularidade em m/km. A partir dos resultados obtidos para a trilha de roda interna e externa de cada segmento, calculou-se a média das trilhas para obter o IRI médio do segmento. O resultado final obtido é o IRI do trecho, que representa quantitativamente a irregularidade longitudinal média daquele segmento de 400 m.

Para fins de análise, os valores de IRI de cada segmento foram comparados com os limites de referência estabelecidos pelo DNIT, conforme apresentados na Tabela 1, permitindo classificar objetivamente a condição de irregularidade de cada pavimento avaliado como Excelente, Boa, Regular, Ruim ou Péssima. Também foram calculados dados estatísticos descritivos da amostra de IRI (valor médio, mínimo, máximo e desvio padrão) visando caracterizar globalmente o nível de regularidade dos pavimentos analisados no presente estudo.

Tabela 1: Classificação da condição do pavimento segundo o IRI (adaptado de DNIT, 2006).

Classificação	Faixa de IRI (m/km)
Excelente	1,0 – 1,9
Boa	1,9 – 2,7
Regular	2,7 – 3,5
Ruim	3,5 – 4,6
Péssimo	Acima de 4,6

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados gerais da avaliação de irregularidade longitudinal obtidos com o MERLIN, em termos do IRI de cada segmento e sua classificação correspondente, conforme a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Resultados de IRI obtidos nos levantamentos por segmento.

Rodovia	Segmento	IRI Médio	Classificação (DNIT, 2006)
L3 Norte	1	2,053	Boa

	2	2,442	Boa
	3	2,556	Boa
	4	2,188	Boa
	5	3,246	Regular
	6	3,543	Ruim
	7	2,938	Regular
	8	3,146	Regular
	9	4,208	Ruim
	10	3,513	Ruim
	11	2,728	Regular
	12	2,518	Boa
	13	3,191	Regular
L4 Norte	14	3,278	Regular
	15	3,512	Ruim

O IRI médio obtido na L3 Norte foi de 2,92 m/km, enquanto na L4 Norte a média ficou em 3,32 m/km. Esses resultados indicam que, em média, os pavimentos estudados apresentam irregularidade regular tanto para a L3 Norte quanto para a L4 Norte, de acordo com a Tabela 1. Os valores máximos e mínimos obtidos na via L3 Norte foram de 4,208 e 2,053, respectivamente. Na via L4 Norte, o valor máximo atingido do IRI foi de 3,512 e o mínimo, de 3,191. O desvio-padrão calculado para a L3 Norte foi de 0,633 m/km, enquanto o da L4 Norte foi de 0,166 m/km.

De modo geral, os resultados confirmam que há variabilidade considerável na irregularidade longitudinal dos pavimentos analisados neste trabalho. Enquanto uma parcela substancial da malha avaliada proporciona conforto aceitável aos usuários, com IRI dentro do limite de bom desempenho (33% dos segmentos), existe um percentual não negligenciável (27% dos segmentos) de trechos com irregularidade classificada como Ruim, potencialmente prejudicando a segurança, conforto e os custos de operação dos veículos. Ressalta-se, no entanto, que os valores aqui discutidos servirão de base para análises mais aprofundadas: por exemplo, comparar a irregularidade medida com indicadores de condição do pavimento, como o Índice de Condição do Pavimento (ICP).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da avaliação conduzida, conclui-se que o MERLIN mostrou-se uma ferramenta de fácil aplicação para medir a irregularidade longitudinal de pavimentos *in situ*, fornecendo estimativas confiáveis do IRI em trechos de rodovias do Distrito Federal. Os resultados obtidos permitiram classificar objetivamente a condição de regularidade dos segmentos levantados, evidenciando tanto pavimentos em bom estado quanto trechos com irregularidade acentuada. Essa variação reforça a importância de um monitoramento sistemático da irregularidade longitudinal na malha viária.

Do ponto de vista metodológico, o uso do MERLIN mostrou vantagens na relação custo-benefício, sobretudo em cenários onde equipamentos automatizados de alto custo não estão disponíveis. Com um investimento mínimo e treinamento básico de equipe, foi possível levantar o perfil longitudinal de forma indireta e calcular o IRI de cada trecho, atendendo ao objetivo do estudo. É importante salientar, entretanto, as limitações inerentes: o processo manual de medição é relativamente lento (cada trilha de roda de cada segmento leva em média 25 minutos) e adequado apenas para extensões limitadas, o que pode restringir sua aplicação em levantamentos de rede de grande porte. Adicionalmente, cuidados operacionais, como o correto alinhamento vertical do equipamento a cada leitura e a eliminação de valores extremos, mostraram-se necessários para assegurar a precisão dos resultados, conforme indicado por Cundill (1996).

Em conclusão, a pesquisa evidencia que a avaliação da irregularidade longitudinal por meio do IRI e com apoio de instrumentos simples como o MERLIN é uma alternativa viável e útil para gestores de pavimentos. Os dados de IRI fornecem uma métrica objetiva para priorização de manutenções: por exemplo, trechos

classificados como Ruim ou Péssimo podem ser imediatamente incluídos em programas de restauração, enquanto segmentos Bons/Excelentes requerem apenas manutenção rotineira preventiva. Recomenda-se a continuidade dos trabalhos, incluindo a incorporação de novas métricas complementares, como o ICP, e a análise da evolução temporal da irregularidade nos trechos monitorados. Essas ações contribuirão para um eventual Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) mais robusto no Distrito Federal, integrando diferentes indicadores de desempenho e assegurando intervenções oportunas que prolonguem a vida útil dos pavimentos e elevem o conforto e a segurança para os usuários.

Agradecimentos
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAPDF pelo suporte financeiro e ao Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal - DER/DF pela participação ativa no projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arhin, S.A. et al. (2015). Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area. *American Journal of Civil Engineering*, v3, 88-93.

Cundill, M.A. (1986) MERLIN – A low-cost machine for measuring road roughness in developing countries. *Transport Research Laboratory* (TRL), UK. (Também publicado em: *Transportation Research Record*, n.1291, p.106-111)

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2006). Normas e Manual de Pavimentação: Critérios de avaliação de irregularidade longitudinal. DNIT, Brasil.

Maryam, S.; Bulgis e Madami, R. (2023) Comparative Study of Performance between International Roughness Index (IRI), Pavement Condition Index (PCI), and Bina Marga Method on Roadways. *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, v. 8, n. 2, p. 98–116. DOI: http://dx.doi.org/10.51557/pt_jiit.v8i1.2030.

Paterson, W. D. O. (1987) Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management. Washington, DC: World Bank.

Sayers, M. W.; T. D. Gillespie e W.D.O. Paterson (1986). Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements (*World Bank Technical Paper* No. 46). Washington, DC: World Bank.

Silva, J. (2019). *Análise dos Parâmetros de Irregularidade Longitudinal de Ciclofaixas com o Uso do Equipamento MERLIN na Cidade de Jõao Pessoa - PB*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal da Paraíba.

Zanchetta, F. (2017). *Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos: Avaliação de Campo, Modelo de Desempenho e Análise Econômica*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Luis Eduardo Blamires Komka (luis.komka@aluno.unb.br), Fábio Zanchetta (fabio.zanchetta@unb.br)
Universidade de Brasília – UnB, Programa de Pós-graduação em Transportes)
Gisandra Faria de Paula (gisandrafp@gmail.com)
Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal – DER/DF
Brasília/DF

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ENSAIOS DEFLECTOMÉTRICOS ESTÁTICO (FWD) E DINÂMICO (TSD)

Êmine L. N. S. Pighini[1], Giordana F. Camilo[1], Lilian R. de Rezende[1], Melina F. R. de Paula[2], Ernesto S. Preussler[2], Victor E. dos Reis[3]
[1] Universidade Federal de Goiás, [2] Dynatest Engenharia LTDA, [3] Agência Goiana de Infraestrutura e Transporte

RESUMO
O presente estudo teve como finalidade comparar os resultados obtidos por métodos de avaliação estrutural de pavimentos por meio dos equipamentos *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e *Traffic Speed Deflectometer* (TSD). A metodologia adotada centrou-se na análise de dados deflectométricos obtidos em um trecho de uma rodovia estadual localizada em Goiás. A comparação dos parâmetros mostrou que o TSD registrou valores menores de deflexão máxima (D_0) e maiores de raio de curvatura (RC) em relação ao FWD, com ambos os métodos apresentando comportamento semelhante. Conclui-se que os dois métodos são confiáveis para a avaliação estrutural de pavimentos, desde que sejam devidamente calibrados para garantir a consistência dos resultados.

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária de um país é fundamental para o desenvolvimento econômico e social, uma vez que é por meio dela que circulam pessoas e mercadorias, capazes de promover integração em níveis regionais e nacionais (CNT, 2022). Nesse sentido, é necessário garantir a segurança, conforto dos usuários e conservação das rodovias. Nesse contexto, a avaliação estrutural e funcional dos pavimentos torna-se uma atividade essencial (DNIT, 2006). Devido à crescente demanda por uma infraestrutura rodoviária de qualidade, alguns métodos de avaliação do desempenho e da integridade do pavimento se fazem necessários. A durabilidade e a segurança das vias podem ser garantidas por meio de manutenções preventivas e corretivas, prolongando sua vida útil e reduzindo custos de reparos. Uma técnica amplamente utilizada é o estudo das deflexões ou deslocamentos verticais dos pavimentos para diagnosticar o comportamento estrutural e prever sua condição futura. Conforme DNIT (2006, p. 83), "quando uma carga é aplicada em um ponto (ou uma área) da superfície do pavimento, todas as camadas fletem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento".

Avaliações de deflexões por ensaios não destrutivos já fazem parte da rotina das empresas e órgão que operam na manutenção da infraestrutura rodoviária, em termos de avaliação da capacidade estrutural de pavimentos. Este tipo de ensaio teve início na década de 1950, com o emprego da viga Benkelman, evoluindo na década de 1980 com o advento dos equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD), amplamente utilizados em todo mundo, sendo consolidado seu emprego no Brasil. Este equipamento mede a deflexão por meio da aplicação de uma carga no pavimento que simula o impacto de veículos pesados, para isso, o FWD deve estar estático e o fluxo de carros parcialmente interrompido, mensurando a bacia de deflexão resultante (AASHTO, 1993; Bernucci *et al*., 2022; DNIT, 2006). Verifica-se, no entanto, que essa sistemática de levantamento possui baixa produtividade, demandando mais tempo para sua execução em malhas mais extensas, exigindo interdição de faixa para a caracterização analisada, com interferência direta aos usuários da via, ocasionando retenções, congestionamentos, e por conseguinte impacto na segurança da mesma. A mudança deste paradigma ocorre a partir dos anos de 2020, quando o *Traffic Speed Deflectometer* começou a ser usado em vários países. O TSD é um equipamento dinâmico que permite caracterizar a resposta estrutural de um pavimento de forma contínua (sem interrupções), em velocidade de tráfego, evitando-se os impactos adversos incluindo a segurança de tráfego, verificados com o emprego do FWD. No entanto, a análise dos dados oriundos do TSD é mais complexa do que a do FWD (Zhang, 2022).

Enquanto o FWD mede o comportamento estrutural por meio da medida da deflexão gerada pelo impacto, o TSD obtém a deflexão a partir do efeito Doppler, onde são medidas a velocidade de deflexão e a velocidade do veículo. De acordo com a Grenwood Engineering (2025), "o Traffic Speed Deflectometer mede a velocidade de deflexão em vez do deslocamento. Para medir o movimento do pavimento, o TSD usa o princípio do efeito Doppler, onde o movimento de uma fonte de sinal está criando uma mudança no comprimento de onda criado pela fonte". No Brasil, embora esta tecnologia ainda seja relativamente recente, a mesma já foi incorporada à normatização técnica por meio da publicação de uma norma específica voltada à sua aplicação, a PRO-440 (DNIT, 2023). Além disso, dois estudos pioneiros no país com resultados já publicados, DNIT (2023) e Mota *et al* (2024), utilizaram equipamentos baseados na mesma tecnologia para avaliar a coerência entre os dados obtidos, quando comparados. Esses estudos demonstram o crescente interesse nacional pela

ampliação da aplicação dessa metodologia. Em países europeus como Dinamarca, o uso do TSD vem sendo explorado desde 2004 (GRENWOOD ENGINEERING, 2025), com resultados expressivos em termos de eficiência na coleta de dados e qualidade na avaliação estrutural. Diante desse cenário, torna-se relevante aprofundar o conhecimento sobre a aplicação do TSD em território brasileiro, comparando seus resultados com métodos consagrados, como o FWD, com o objetivo de promover avanços na gestão e conservação da infraestrutura rodoviária nacional.

2. METODOLOGIA

O trecho em estudo está localizado na GO-118, com início no km 308,58 (entroncamento com a GO-112) e fim no km 324,64 (entroncamento com a GO-549). Esse trecho, classificado como homogêneo pelo Sistema Rodoviário Estadual (SRE), é identificado pelo código 118EGO0135. A rodovia tem pista simples, com uma faixa no sentido crescente e outra no sentido decrescente. No levantamento de FWD, realizado nos dias 5 e 6 de setembro de 2024, foi levado em conta apenas o sentido crescente da rodovia, enquanto para o TSD, realizado no dia 6 de setembro de 2024, foram levantados tanto o lado crescente como o decrescente. Para padronizar a análise neste estudo, foi adotada apenas a faixa no sentido crescente com os dois equipamentos. O trecho avaliado também foi caracterizado com o auxílio do *Ground Penetration Radar* (GPR), permitindo uma avaliação detalhada da estrutura do pavimento com a determinação da quantidade de camadas e respectivas espessuras. Essa análise é importante para tratar os dados de FWD e TSD de forma adequada.

A metodologia de análise de dados foi estruturada em três etapas principais. A primeira consistiu na análise preliminar dos dados recebidos, os quais foram disponibilizados em formato de planilha eletrônica. Em seguida, procedeu-se à compatibilização desses dados, visando garantir que os dados utilizados estivessem na mesma escala de força e com referência geográfica equivalente, possibilitando comparações válidas. Por fim, foi realizada a análise estatística, com base nos dados previamente tratados e padronizados. A análise tabular dos ensaios de FWD e TSD foi realizada por meio de software de planilha eletrônica, Excel, onde parâmetros como distância entre pontos do levantamento, a carga aplicada em ensaio, a coerência das bacias de deformação, raio de curvatura e temperatura coincidem com valores esperados de acordo com o padrão estabelecido pela DNER (1996). A fim de não desprezar os dados que excederam a variação permitida para a carga aplicada, foi realizada a padronização dos valores de deflexão obtidos, permitindo sua inclusão nas análises de forma consistente e comparável, Moraes (2015) indica que as deflexões obtidas no ensaio FWD podem ser ajustadas para a carga de referência (40 kN) por meio de interpolação linear. Como o trecho possui revestimento em Tratamento Superficial Duplo, não foi aplicada a correção em função da temperatura.

A análise geográfica, foi feita por meio do software de Geoprocessamento QGIS (2024) a partir das coordenadas geográficas geradas durante o levantamento da deflexão. Nessa análise são aferidas a extensão real do levantamento em metros e a localização em relação a quais faixas foram levantadas. Os dados obtidos por meio do equipamento FWD apresentam espaçamento de 40 m, enquanto os dados do TSD foram coletados a cada 10 m. Visando garantir a coerência da análise comparativa entre os dois conjuntos de dados, foi realizada a compatibilização dos pontos por meio do software QGIS. Foram identificados os pontos de FWD e TSD que coincidiam, ou que apresentavam a menor distância em relação aos marcos estabelecidos. Esses pontos compatibilizados foram, então, selecionados para compor a base de dados utilizada na análise.

Foi realizada uma análise estatística dos dados, apontando valores extremos, com suas respectivas médias, desvios padrões e coeficiente de variação com os dados das camadas do pavimento e os dados de D_0 para FWD e TSD a cada 40 m. A partir dos dados obtidos para ambos os métodos, foram definidos parâmetros importantes para a determinação das condições estruturais do pavimento. Destacam-se entre eles, a deflexão máxima (D_0) e o raio de curvatura (RC). Para pavimentos constituídos por base de solos granulares, Horak (2008) apresenta os limites relacionados à bacia de deflexão apresentados na Tabela 1

Tabela 1: Limites dos parâmetros de bacias de deflexão para bases granulares (Horak, 2008).

Condição Estrutural	D_0 (10^{-2} mm)	RC (m)
Seguro	< 50	> 100
Em Alarme	50 - 75	50 - 100
Severo	> 75	< 50

A fim de comparar os dados levantados pelos diferentes equipamentos utilizados, foram elaborados gráficos de acordo com cada levantamento realizado: deflexões máximas e raio de curvatura conforme apesentado por DNIT (2023). Assim, com essas análises comparativas pode-se verificar se os dois equipamentos utilizados são capazes de apresentar comportamentos equivalentes e captarem as mudanças nas condições dos pavimentos avaliados.

3. RESULTADOS

Os resultados do GPR revelaram que a espessura da camada de revestimento variou entre 1 e 4 cm, com média igual a 2,51 cm e desvio padrão de 0,54. O coeficiente de variação (CV) entre os dados de espessura de revestimento foi da ordem de 21,38%. Isso indica que os dados têm uma dispersão moderada em torno da média. Em termos práticos, a maioria das espessuras é, aproximadamente, de 2,0 e 3,0 cm. O CV acima de 20% pode indicar uma variabilidade significativa nas espessuras do revestimento, apontando que ao longo dos 16 km de extensão estudados, a camada de revestimento não é uniforme. Nesse caso, revestimentos como os Tratamentos Superficiais e Microrresvestimento são considerados como camada de impermeabilização e que oferecerem adequada aderência para o rolamento, mas não atuam como camada de absorção e distribuição das tensões geradas pelo tráfego. Assim, na estrutura avaliada a primeira camada responsável por distribuir as tensões é a base do pavimento. A espessura da camada de base variou de 16 a 20 cm, sendo a média igual a 18,07 cm, o desvio padrão de 0,88 e o CV igual a 4,88%. O baixo valor de CV sugere que a camada de base é homogênea. Após o estaqueamento virtual realizado a cada 40 m, o CV ainda permaneceu baixo, da ordem de 4,92%.

A Tabela 2 apresenta a dispersão dos dados estatísticos referentes à deflexão máxima obtida por meio dos equipamentos TSD e FWD. O coeficiente de variação do TSD, de 29,82%, indica uma variabilidade moderada em relação à sua média. Valor semelhante foi observado para o FWD, cujo coeficiente foi de 28,33%. Além disso, os desvios padrão de ambas também foram próximos.

Tabela 2: Comparativo de D_0 de TSD e FWD (10^{-2} mm)

	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	CV
$D_{0\ TSD}$	85,0	40,9	12,7	12,2	29,82%
$D_{0\ FWD}$	102,8	44,6	17,7	12,7	28,33%

A Tabela 3 apresenta a comparação dos valores de D_0 obtidos com os diferentes equipamentos em relação aos parâmetros definidos por Horak (2008). Embora o FWD seja o equipamento mais tradicional e amplamente utilizado em avaliações estruturais, os dados indicam que 87,4% das medições de D_0 realizadas com o TSD são consideradas seguras, frente a 71,4% das medições com o FWD.

Tabela 3: Comparação de D_0 de TSD e FWD pelos critérios de Horak (2008)

Limites (Horak)		TSD	TSD (%)	FWD	FWD (%)	Classificação
50 x 10^{-2} mm		348	87,4	284	71,4	Seguro
50 x 10^{-2} mm	75 x 10^{-2} mm	49	12,3	107	26,9	Em Alarme
75 x 10^{-2} mm		1	0,3	7	1,8	Severo

Os gráficos de médias móveis de D_0 (Figura 1a) e dos RC (Figura 1b) revelam que ambos os métodos apontaram comportamentos estruturais semelhantes ao longo do trecho analisado, com variações coincidentes nos padrões de deflexão, como elevações e reduções nos valores registrados. Essa correspondência sugere que as duas tecnologias são compatíveis para a avaliação do desempenho estrutural do pavimento. No entanto, verificou-se que, em média, o FWD apresentou valores de D_0 superiores aos do TSD e inferiores no caso do RC. Essas diferenças podem estar relacionadas às distintas metodologias de medição de cada equipamento.

Com o objetivo de estabelecer uma relação algébrica entre os dados obtidos, elaborou-se um gráfico de dispersão relacionando os valores das médias móveis extraídas dos gráficos anteriores para ambos os ensaios (Figuras 2a e 2b). Sobre esse gráfico, foi ajustada uma linha de tendência a fim de determinar a equação da regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2). A opção pelo uso das médias móveis, em vez dos valores absolutos, justifica-se pela necessidade de atenuar oscilações pontuais presentes nos dados brutos, promovendo uma suavização da variabilidade e evidenciando o comportamento estrutural predominante ao longo do trecho

analisado. Os resultados obtidos evidenciam uma forte correlação linear entre os valores das médias móveis, como demonstram os elevados coeficientes de determinação: $R^2 = 0,948$ para as Deflexões máximas e $R^2 = 0,9027$ para os raios de curvatura. Esses valores, muito próximos de 1, indicam que aproximadamente 94,8% da variabilidade nos dados médios do FWD pode ser explicada pelos valores médios correspondentes do TSD no caso das deflexões, e 90,27% no caso dos raios de curvatura. Esses índices reforçam a compatibilidade entre os resultados obtidos por ambos os métodos, confirmando a consistência e a confiabilidade das duas técnicas a análise estrutural de pavimentos.

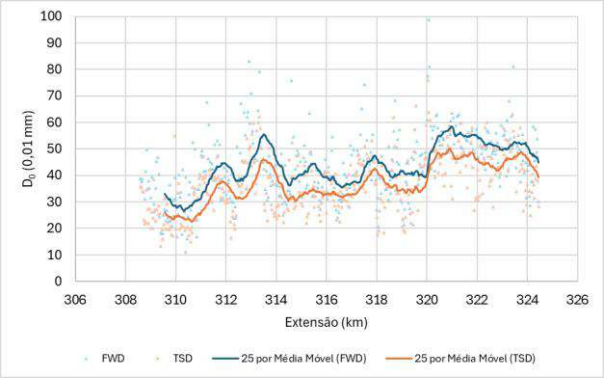


Figura 1 (a): Comparativo entre as médias móveis das D_0 para o TSD e o FWD

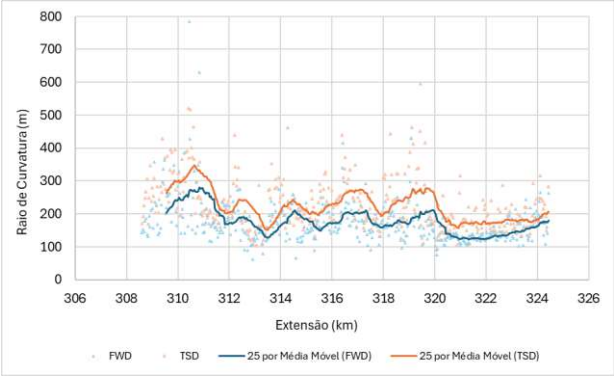


Figura 1 (b): Comparativo entre as médias móveis dos RC para o TSD e o FWD

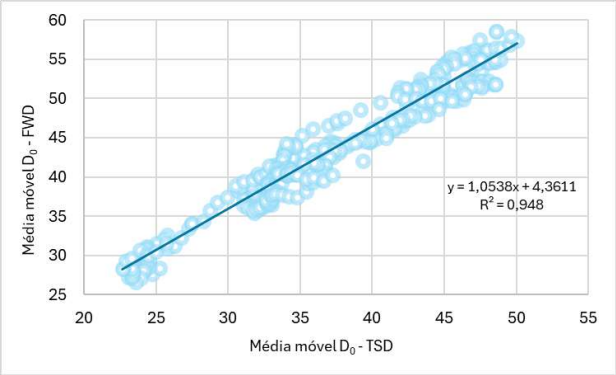


Figura 2 (a): Regressão linear entre médias móveis das D_0 do FWD e do TSD

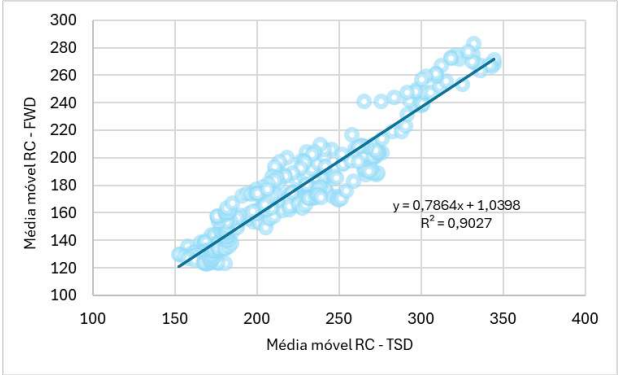


Figura 2 (b): Regressão linear entre médias móveis dos RC do FWD e do TSD

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal comparar os resultados obtidos nos ensaios com TSD e FWD em um trecho da rodovia GO-118. A análise realizada buscou estabelecer como os resultados obtidos pelos dois métodos podem ser integrados ou comparados de forma eficaz. A relevância deste estudo reside em reforçar a confiabilidade dos dados da avaliação estrutural realizada por meio do TSD comparando-o com os dados obtidos pelo FWD, considerado referência em análise de pavimentos. Tal comparação é fundamental para ampliar a aplicação de tecnologias mais ágeis e seguras para monitoramento e conservação da malha rodoviária.

Nesse sentido, a análise das deflexões máximas (D_0) evidenciou que, apesar das diferenças pontuais nas magnitudes absolutas das deflexões, ambos os métodos apresentaram tendências de comportamentos estruturais semelhantes ao longo do trecho, quando analisado segundo à média móvel. A relação entre as médias móveis dos dois ensaios demonstrou forte correlação linear (R^2=0,95) indicando que os métodos produzem resultados de magnitude comparável quando analisado por trechos. Em relação ao raio de curvatura (RC) foi observado que houve convergência na identificação dos padrões estruturais ao longo do trecho, o que indica a coerência entre os dois métodos na capacidade de detecção de variações de rigidez do pavimento.

Por fim, os resultados alcançados até o momento indicam que ambos os métodos de avaliação estrutural do pavimento são ferramentas confiáveis, podendo ser utilizados de maneira comparável no diagnóstico de

pavimentos rodoviários. Sendo assim, a consistência entre os métodos sugere que o TSD pode ser uma alternativa viável para levantamentos deflectométricos, com resultados comparáveis aos do FWD, com as vantagens próprias já delineadas.

Agradecimentos

Agradecemos a GOINFRA (Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes), por ceder dados da rodovia em estudo, derivados do Contrato n. 022/2024/GOINFRA referente aos levantamentos com os equipamentos *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e *Traffic Speed Deflectometer* (TSD), executados pelo Consórcio DYNA/INFRA, ao qual também agradecemos também pelo apoio dispensado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State and Transportation Officials, Washington, 1993

Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti; J.B. Soares. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022. 750 p

CNT – *Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de Rodovias 2022: Desempenho da malha rodoviária pavimentada.* Brasília: CNT, 2022. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/. Acesso em: 29 jun. 2025.

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *DNER-PRO 273/96: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer – FWD"* – Procedimento. Rio de Janeiro: DNER, 1996

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2ª Edição. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *NORMA DNIT 440/2023 – PRO: Pavimentação – Levantamento funcional e estrutural contínuo de pavimentos utilizando um equipamento móvel* – Procedimento. Brasília: IPR, 2023

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. *Análise preliminar do uso do iPAVe (Intelligent Pavement Assessment Vehicle) na gestão de rodovias*. Brasília: DNIT, 2023. 45 p. (Relatório de Pesquisa IPR RP-001)

GIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Version 3.34 LTR. Open Source Geospatial Foundation Project, 2023. Disponível em: <https://qgis.org/>. Acesso em: 29 out. 2024.

GREENWOOD ENGINEERING A/S. *Greenwood Engineering.* Disponível em: https://greenwood.dk/. Acesso em: 3 jun. 2025.

Horak, E. *Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters*. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 50(2), pp.2-9, 2008.

Mota, R. V.; Raul, C. M.; Camargo, F. F.; Das, C. R. C, Vale, A. F. Estudo comparativo da variabilidade do *Traffic speed deflectometer* (TSD) e do *Falling weight deflectometer* (FWD). Artigo científico, v. 3, 2024.

Zhang, M.; J. Zhang; H. Gong; X. Jia; R. Xiao; H. Huang. *Numerical investigation of pavement responses under TSD and FWD loading.* Construction and Building Materials, v. 318, 2022.

*Êmine Luara Neres Santos Pighini (*emineneres@discente.ufg.br)
*Giordana Fiorini Camilo (*giordanafiorini@discente.ufg.br)
*Lilian Ribeiro de Rezende (*lrezende@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Av Universitária, Quadra 86, Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário, Goiânia – GO, Brasil.
*Melina Freitas Rocha de Paula (*melina.rocha@dynatest.com.br)
Ernesto Simões Preussler (ernesto@dynatest.com.br)
Dynatest Engenharia LTDA, Rua Peixoto Gomide, 996, Conj 810, Jardim Paulista, São Paulo-SP, Brasil.
*Victor Emmanuel dos Reis (*victoremmanueldosreis@gmail.com)
Av. Governador José Ludovico de Almeida nº 20 (BR-153, km 493,5), Conjunto Caiçara, Goiânia - Goiás - Brasil

FATOR DE CORREÇÃO DE TEMPERATURA PARA MÓDULOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONSIDERANDO VISCOELASTICIDADE LINEAR E DADOS BRASILEIROS

Samuel de Almeida Torquato e Silva[1], Juceline Batista dos Santos Bastos[2], Iuri Sidnei Bessa[1], Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos[1], Evandro Parente Junior[1], Lia Beatriz Gomes Furtado[1]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará

RESUMO
Este artigo apresenta formulação de equação para Fator de Correção (FC) relacionado à temperatura, a ser aplicado a módulos obtidos por retroanálise de bacias deflectométricas considerando-se termo-sensibilidade de misturas asfálticas e propriedades viscoelásticas lineares. O desenvolvimento desta equação considerou o sinal do carregamento de equipamento Falling Weight Deflectometer (FWD) e viscoelasticidade linear. A calibração da equação baseou-se em misturas asfálticas brasileiras, o que a torna especialmente apropriada para uso em contexto nacional. Além disso, ajustou-se função de erro para verificar a variabilidade do FC estimado. Finalmente, aplicou-se a equação em trecho monitorado para verificar sua consistência. Os resultados obtidos com a equação proposta neste trabalho aproximaram-se mais do resultado verificado experimentalmente do que outras equações da literatura, o que corrobora com a pertinência da metodologia utilizada e a usabilidade da equação desenvolvida.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A rigidez dos materiais asfálticos é função da temperatura e da frequência de carregamento, devido ao caráter viscoelásticos destes materiais. Assim, avaliações de pavimentos ao longo do tempo devem considerar essas variáveis, a fim de permitir comparações adequadas entre dados obtidos em diferentes condições, incluindo a informação da temperatura. Comparar, por exemplo, dois módulos elásticos obtidos por retroanálise com temperaturas registradas na superfície do pavimento de 20ºC e 40ºC pode comprometer a interpretação dos resultados. Nesses casos, torna-se necessária a aplicação de fatores de correção para uma temperatura de referência, tanto em monitoramentos periódicos quanto em verificações frente a limites de conformidade.

Diversas equações são apresentadas na literatura (Kim et al., 1995; Park & Kim, 1997; Chen et al., 2000; Lai et al., 2019; Le et al., 2023), em sua maioria empíricas. No entanto, essas equações são limitadas ao escopo de materiais e condições em que foram desenvolvidas, o que levanta dúvidas quanto à sua validade para misturas asfálticas utilizadas no Brasil. Além disso, alguns métodos exigem variáveis de entrada com baixa disponibilidade em avaliações estruturais, como a umidade relativa e a radiação solar no momento da medição (Yang et al., 2024). Outros métodos podem se basear no fato de que, para muitas misturas asfálticas, o comportamento material pode ser considerado como termorreologicamente simples: uma relação única, descrita por uma equação, existe entre os efeitos no módulo relativos a variações de temperatura e a variações de frequência (Princípio de Superposição Tempo-Temperatura, PSTT). Nesses casos, parâmetros mecânicos específicos (Lai et al., 2019) são necessários, dificultando sua aplicação, particularmente em escala nacional.

Este artigo propõe uma formulação de equação de correção para módulos elásticos de misturas asfálticas baseada em fundamentos mecanicistas e voltada à interpretação de resultados obtidos por retroanálise. A metodologia utiliza dados provenientes de ensaios de deflectometria em campo com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD), podendo ser adaptada a outros equipamentos deflectométricos, como o *Light Weight Deflectometer* (LWD), *Heavy Weight Deflectometer* (HWD) e *Traffic Speed Deflectometer* (TSD).

2. MODELAGEM DA CORREÇÃO DO EFEITO DA TEMPERATURA

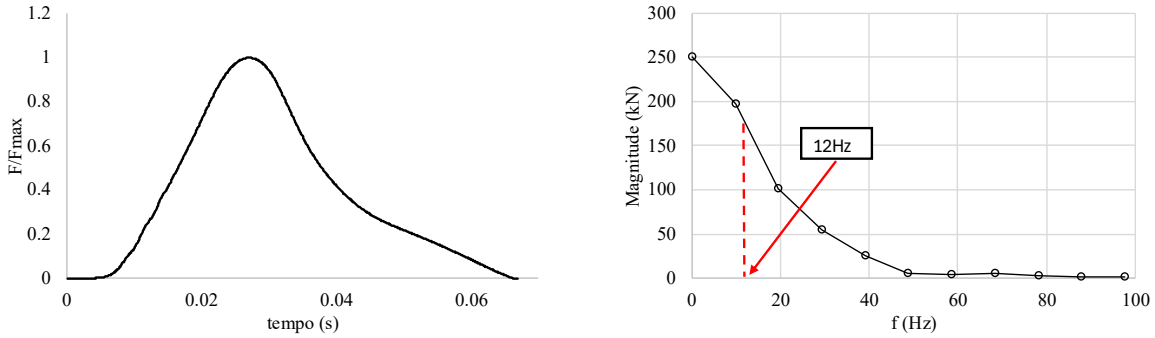
Nesta etapa, são desenvolvidas as funções do Fator de Correção (FC) e do Erro Padrão (EP) associado. Também é apresentado o método adotado para estimar a temperatura representativa da camada asfáltica. O método aqui apresentado é baseado no PSTT e inclui efeitos sobre o formato das curvas mestras de módulo, além de calibrar o método para misturas asfálticas nacionais. Apesar do método se basear em uma propriedade viscoelástica linear (valor absoluto do módulo complexo), a aplicação proposta se aproxima de casos práticos brasileiros, com medidas de FWD no pavimento e de módulo de resiliência (MR) dos materiais asfálticos. A formulação apresentada pode ser generalizada para quaisquer conjuntos de dados misturas asfálticas e ensaios deflectométricos, entretanto, os parâmetros são calibrados a partir de misturas brasileiras, daí a especificidade de sua aplicação com os parâmetros obtidos nesse estudo.

2.1. Desenvolvimento da Equação do Fator de Correção

O primeiro passo consiste na avaliação da frequência dominante de carregamento aplicada pelo FWD. Essa frequência, denominada f_{FWD}, é obtida por meio do cálculo da média ponderada das frequências da transformada de Fourier do carregamento (Al-Qadi et al., 2008) (Equação 1). A transformada é aplicada à curva de carregamento no tempo, registrada no arquivo com extensão *hst*:

$$f_{FWD} = \frac{\sum A \times f}{\sum A} \tag{1}$$

onde A é a amplitude e f a frequência na transformada de Fourier do carregamento.



a) Sinal normalizado da carga do FWD b) Transformada de Fourier dessa carga

Figura 1: Carregamento do FWD no domínio no tempo e no domínio da frequência. A frequência representativa do carregamento neste exemplo é igual a 12Hz

De posse da frequência de carregamento, igual a 12Hz para o equipamento FWD utilizado, calcula-se a frequência reduzida para a temperatura do ensaio de campo ($\omega_{R_{FWD}}$) e, analogamente, a frequência reduzida para a temperatura de referência ($\omega_{R_{REF}}$), considerando-se uma equação para representar o PSTT para o material investigado:

$$\omega_{R_{FWD}} = f(\omega_{FWD}, T) = \frac{\omega_{FWD}}{a_T(T_{FWD})} \tag{2}$$

$$\log a_T = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \tag{3}$$

onde T é a temperatura em ºC, a_T é o *shift-factor* e a_1, a_2, a_3 são constantes experimentais. Conhecidas as frequências reduzidas para a temperatura de campo e de referência, o FC pode ser obtido a partir da manipulação da curva mestra. Diferentemente de Le et al. (2023), que consideram apenas os parâmetros do *shift-factor* (a_1, a_2, a_3), neste artigo são considerados os parâmetros da curva sigmoidal, que influenciam a sensibilidade do módulo dinâmico à variação de temperatura. O FC é definido nas Equações (4) e (5).

$$FC = \frac{|E^*|_{REF}}{|E^*|_{FWD}} \tag{4}$$

$$\log FC = \alpha \left[\frac{1}{1 + e^{\beta(\log \omega_{R_{Ref}} + \gamma)}} - \frac{1}{1 + e^{\beta(\log \omega_{R_{FWD}} + \gamma)}} \right] \tag{5}$$

Em aplicações práticas, os usuários de programas de retroanálise raramente possuem os parâmetros específicos das misturas asfálticas utilizadas em campo, uma vez que o objetivo da retroanálise é justamente estimar os módulos. Desta forma, torna-se necessário desenvolver uma equação geral para o fator de correção que não dependa de propriedades específicas dos materiais. Para isso, utilizou-se um banco de dados (Figura 2) com 40 misturas asfálticas extraídas de estudos anteriores (Nascimento, 2015; Santiago, 2017; Santos, 2020; Barbosa et al., 2024; Lira, 2025), das quais cerca de 70% classificadas como CBUQ convencional e 30% com outras classificações, como modificada por diferentes polímeros, com adição de cinzas, dentre outros. A partir destes dados foi gerada uma curva média representativa.

Calculou-se então o FC para 2000 casos simulados, gerados aleatoriamente variando a temperatura da mistura em campo, entre 10 ºC e 50 ºC, seguindo a distribuição uniforme. Para cada caso, escolheu-se aleatoriamente uma mistura e uma temperatura de campo, e em seguida calculou-se o FC (Figura 3). Devido à

heterocedasticidade do Fator de Correção estimado, cuja variância aumenta com a diferença de temperatura, a Regressão Linear Ponderada foi escolhida para ajustar o logaritmo do FC em função da diferença de Temperatura (Equação (6). Também se ajustou um modelo de Erro Padrão e calculou-se a envoltória de erros considerando 80% de grau de confiança (Equação (7).

ID_mix	b	d	g	α1	α2	α3	Tref	T (°C)	T-Tref	logFC
37	3.2910	1.3310	0.6040	0.0011	-0.1752	3.2616	46	26	-20	-0.73
13	3.4774	1.5433	0.5453	0.0010	-0.1882	3.3681	11	33	22	0.64
17	7.5000	2.8493	0.4483	0.0009	-0.1813	3.2563	43	33	-10	-0.32

Figura 2: Primeiras linhas da amostra de Fatores de Correção

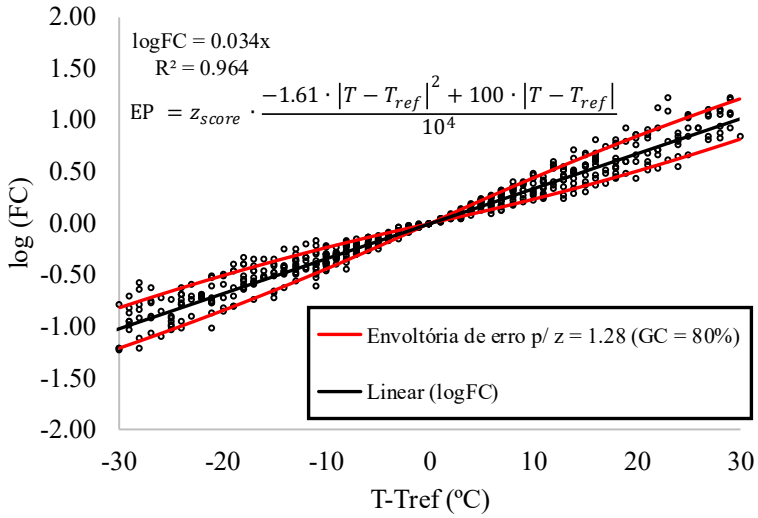


Figura 3: Fator de correção em função da temperatura

$$\log FC = 0.034 \cdot (T - T_{ref}) \;\Rightarrow\; FC = 10^{(T-T_{ref})\cdot 0.034} \quad (6)$$

$$EP = z_{normal} \cdot \left[\frac{-1.61 \cdot |T - T_{ref}|^2 + 100 \cdot |T - T_{ref}|}{10^4}\right] \quad (7)$$

2.2. Determinação da temperatura do material de revestimento

A temperatura registrada pelo FWD corresponde à temperatura da superfície do pavimento e não representa de forma homogênea toda a espessura da camada asfáltica. A variação da temperatura com a profundidade depende da radiação solar, da temperatura do ar e da hora do dia. Para fins de análise estrutural, é necessário adotar uma temperatura representativa, que, quando considerada uniforme ao longo da espessura, produza resposta mecânica equivalente àquela obtida com o perfil real de temperaturas.

Usualmente define-se temperatura na metade da camada como representativa (Fernando & Liu, 2001; Hu et al., 2022), restando, portanto, estimar essa temperatura para a aplicação da equação do Fator de Correção. O Manual do Usuário para o Programa de Correção de Módulo por Temperatura (Fernando & Liu, 2001) recomenda a equação BELLS2 (Lukanen et al., 2000) (Equação 8). Essa equação apresenta bom desempenho em diferentes contextos, especialmente para camadas menores que 16cm e para camadas reabilitadas (Li et al., 2018; Solatifar et al., 2018), situações frequentes nos pavimentos brasileiros.

$$T(d) = \beta_0 + \beta_1 T_{sup} + [\log(d) - 1.25]\left[\beta_2 T_{sup} + \beta_3 T_{1-dia} + \beta_4 sen(h_{18} - 15.5)\right] + \beta_5 T_{sup} sen(h_{18} - 13.5) \quad (8)$$

Onde d (mm) é a profundidade que se deseja avaliar a temperatura da camada, β_i são os coeficientes da equação, disponíveis em Fernando & Liu (2001), T_{sup} (ºC) é a temperatura na superfície do pavimento registrada pelo equipamento, T_{1-dia}(ºC) é a média entre a temperatura do ar máxima e mínima do dia anterior e h_{18} é um fator que depende da hora do dia, calculado de acordo com Stubstad et al. (1998).

3. APLICAÇÃO DO MODELO

Para verificação do modelo proposto, foram utilizados dados de levantamento deflectométrico com FWD e ensaios de Módulo de Resiliência (MR), conforme DNIT (2018), ambos realizados em um trecho rodoviário

monitorado no Ceará. O ensaio FWD foi executado em 40 pontos distribuídos ao longo de cerca de 30 km. Já o ensaio de MR foi aplicado em corpos de prova coletados em 3 localidades do trecho, com 4 testemunhos por local. A estrutura do pavimento é composta por: revestimento asfáltico em CBUQ com 6% de ligante e 6.5 cm de espessura, sobre base granular de 15 cm, sub-base granular entre 15 e 20 cm, e subleito natural. As temperaturas da superfície do revestimento no momento dos ensaios variaram entre 45 e 50ºC.

Os módulos da camada asfáltica obtidos por retroanálise foram corrigidos para a temperatura de referência do ensaio de MR utilizando a equação proposta. Considerando as limitações da comparação, decorrentes das diferenças nos estados de tensões e modos de carregamento entre os dois ensaios, essa abordagem é adotada como a melhor aproximação viável.

Para minimizar a influência de *outliers* característicos de ensaios deflectométricos, adotou-se a mediana como medida de tendência central. A razão entre a mediana dos módulos obtidos por retroanálise (portanto na temperatura representativa do material em campo) e a mediana dos valores de MR (medida em laboratório a 25ºC) foi de 5.1, sendo esse valor adotado como referência para o Fator de Correção. As equações de Chen et al. (2000) e Le et al. (2023) resultaram em fatores medianos de 3.0 e 2.7, respectivamente, enquanto a equação proposta neste trabalho forneceu um valor de 5.6 (Figura 4), bastante mais próxima dos 5.1 de fato observados na aplicação investigada. A Tabela 1 corrobora a maior proximidade entre os resultados da equação proposta e os módulos obtidos experimentalmente.

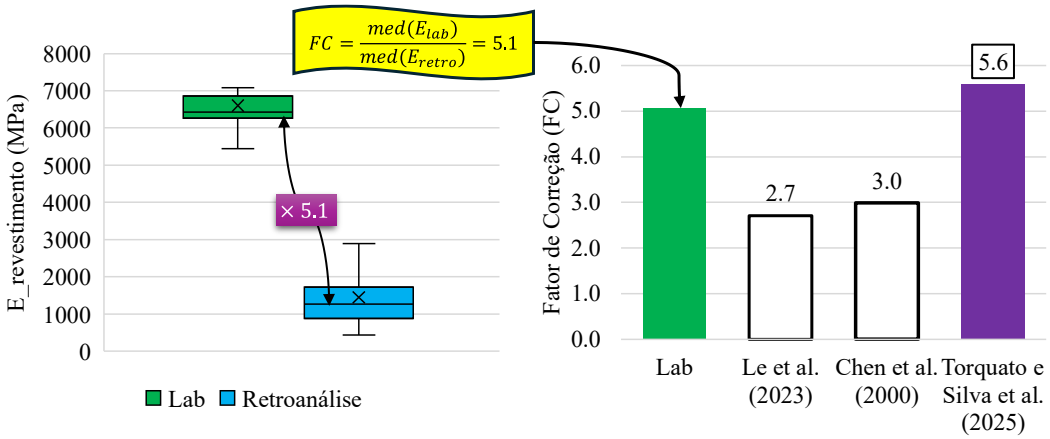


Figura 4: Boxplot dos MRs e dos módulos elásticos da retroanálise e resultados do Fator de Correção

Tabela 1: Estatística descritiva dos resultados dos módulos obtidos em laboratório, por retroanálise e corrigidos

	Mediana (MPa)	1º quartil (MPa)	3º quartil (MPa)	Média (MPa)	CV (%)
Retroanálise (T = 40 a 50ºC)	1268	903	1713	1448	50
MR_{lab}	6426	6260	6811	6602	11
Le et al. (2023)	3438	2185	4357	3608	50
Chen et al. (2000)	3791	2426	4804	3982	50
Torquato e Silva et al. (2025)	7089	4956	9626	7834	52

A maior proximidade entre os resultados da equação proposta e os dados obtidos em campo pode ser atribuída à sua formulação de base mecanicista e à calibração a partir de misturas asfálticas brasileiras. Tais misturas tendem a apresentar maior sensibilidade térmica, influenciada entre outros fatores, pelo uso preponderante de ligantes não modificados, caracterizados por menor viscosidade e maior suscetibilidade térmica (Domingos et al., 2012). Embora este resultado não configure, por si só, uma validação formal do modelo, ele reforça a relevância de utilizar equações calibradas com dados representativos das condições locais da aplicação

4. CONCLUSÕES

Este artigo formulou uma equação para estimação de Fator de Correção (FC) de temperatura aplicado a módulos elásticos obtidos por retroanálise de levantamentos deflectométricos, baseou-se no PSTT e utilizou-se dados de misturas asfáltica brasileiras. Os resultados indicam que: i) a variabilidade do FC aumenta com a diferença entre a temperatura de campo e a de referência, exigindo cautela na correção de dados obtidos em temperaturas elevadas (os valores de referência de MR usados no Brasil são a 25ºC, mas as bacias

deflectométricas frequentemente são medidas em revestimentos a 50ºC); ii) a equação proposta fornece valores de FC superiores (e mais próximo de valores medidos das situações reais de campo apresentadas neste artigo) se comparadas aos de modelos internacionais, o que pode estar relacionado à maior susceptibilidade térmica das misturas brasileiras, em função do uso de ligantes menos viscosos, como o ligante puro convencional.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa (FUNCAP), ao Tribunal de Contas do Estado do Ceará (TCE-CE), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Qadi, I., Xie, W., & Elseifi, M. A. (2008). Frequency determination from vehicular loading time pulse to predict appropriate complex modulus in MEPDG. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*.

Barbosa, E., Lira, L., Filho, M. S., Babadopulos, L., Soares, J., Santos, G., & Bastos, J. (2024). Mechanical Analysis through Non-Destructive Testing of Recycled Porous Friction Course Asphalt Mixture. *Buildings*, *14*(9), 2907. https://doi.org/10.3390/buildings14092907

Chen, D. H., Bilyeu, J., Lin, H. H., & Murphy, M. (2000). Temperature correction on falling weight deflectometer measurements. *Transportation Research Record*, *1716*, 30–39. https://doi.org/10.3141/1716-04

DNIT. (2018). *NORMA DNIT 135/2018 - ME - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio*.

Domingos, M. D. I., Pamplona, T. F., Faxina, A. L., & Gigante, A. C. (2012). Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. *Transportes*, *20*(2). https://doi.org/10.4237/transportes.v20i2.560

Fernando, E., & Liu, W. (2001). *User's guide for the modulus temperature correction program (MTCP)*.

Hu, X., Li, J., Hu, Y., & Sun, L. (2022). Study on Temperature Correction of Asphalt Pavement Deflection Based on the Deflection Change Rate. *Applied Sciences*, *13*(1), 367. https://doi.org/10.3390/app13010367

Kim, Y., Lee, Y., Kim, Y. R., & Lee, Y. (1995). Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Asphalt Concrete Moduli. *Transportation Research Record No. 1473*, 55–62.

Lai, J.-C., Liu, J., & Huang, C.-W. (2019). The Application of Frequency-Temperature Superposition Principle for Back-Calculation of Falling Weight Deflectometer. *Applied Sciences*, *10*(1), 132. https://doi.org/10.3390/app10010132

Le, V. P., Le, A. T., Nguyen, M. T., & Nguyen, Q. P. (2023). Development and validation of a temperature correction model for FWD backcalculated moduli. *Australian Journal of Civil Engineering*, *21*(1), 89–97. https://doi.org/10.1080/14488353.2022.2083045

Li, Y., Liu, L., & Sun, L. (2018). Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer. *Construction and Building Materials*, *160*, 802–809. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.145

Lira, L. A. (2025). *Influência das condições de ensaio de deformação permanente de misturas asfálticas na modelagem de pavimentos* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal do Ceará.

Lukanen, E., Substad, R., & Briggs, R. (2000). *Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement*.

Nascimento, L. A. H. (2015). *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil* [Tese de Doutorado]. North Carolina State University.

Park, S. W., & Kim, Y. R. (1997). Temperature Correction of Backcalculated Moduli and Deflections Using Linear Viscoelasticity and Time-Temperature Superposition. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1570*(1), 108–117. https://doi.org/10.3141/1570-13

Santiago, L. da S. (2017). *Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* [Tese de Doutorado]. Universidade Federal do Ceará.

Santos, A. B. V. (2020). *Contribuições para um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Ceará.

Solatifar, N., Abbasghorbani, M., Kavussi, A., & Sivilevičius, H. (2018). Prediction of depth temperature of asphalt layers in hot climate area. *Journal Of Civil Engineering And Management*, *24*(7), 516–525. https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6162

Stubstad, R. N., Lukanen, E. O., Richter, C. A., & Baltzer, S. (1998). Calculation of AC layer temperatures from FWD field data. *5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*, 919–928.

Yang, R., Sun, L., Hu, Y., Jin, T., & Liu, L. (2024). Research on modulus temperature correction of asphalt layer based on deflection equivalence and measured temperature field. *Construction and Building Materials*, *446*, 138020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138020

Samuel de Almeida Torquato e Silva (samuel@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Campus Universitário do Pici, R. Planalto do Pici, 733 - Pici, Fortaleza – CE

USO DE FOTOGRAMETRIA DIGITAL COM CÂMERA DE *SMARTPHONE* NA INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS

Larissa de Abreu Gimenes, Carlos Alberto Prado da Silva Júnior, Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina

RESUMO
Este estudo teve como objetivo avaliar o uso da fotogrametria digital com câmera de *smartphone* na inspeção de pavimentos flexíveis urbanos. A metodologia consistiu na coleta de imagens, utilizando um iPhone 11, e posterior processamento no *software iTwin* para geração de modelos. Os resultados obtidos foram comparados com a inspeção em campo, seguindo o método *Pavement Condition Index*. Observou-se elevada correspondência entre os métodos, tanto em número de ocorrências quanto em extensão dos defeitos. Os coeficientes de determinação indicaram forte correlação entre os dados, demonstrando a precisão e a confiabilidade do modelo. A técnica mostrou-se viável, econômica e eficiente, oferecendo uma alternativa acessível à inspeção tradicional na gestão da infraestrutura viária urbana.

1. INTRODUÇÃO

A gestão eficiente da infraestrutura viária urbana é essencial para assegurar mobilidade, segurança e qualidade de vida, além de impulsionar o desenvolvimento econômico e social das cidades. No entanto, o tráfego intenso nas áreas urbanas acelera o desgaste das superfícies pavimentadas, especialmente no contexto brasileiro, onde ainda há carência de diretrizes normativas eficazes de avaliação. A avaliação da condição dos pavimentos é essencial para planejar intervenções e garantir o desempenho funcional das vias. Tradicionalmente, realizada de forma manual, o que torna o processo demorado, sujeito à subjetividade e à inconsistência entre avaliadores.

Nesse contexto, a implantação de um adequado Sistema de Gerência de Pavimentos Urbanos (SGPU) surge como uma solução viável para esse problema, oferecendo ferramentas de planejamento baseadas na avaliação funcional e estrutural dos pavimentos. Para que os SGPU sejam eficazes, é necessário empregar métodos práticos, ágeis e acessíveis, que permitam a coleta precisa de dados sobre as condições das vias.

Dentre os métodos utilizados para quantificar a condição do pavimento, destaca-se o *Pavement Condition Index* (PCI), desenvolvido em 1976 pelo *United States Army Corps of Engineer* – USACE. Suas diretrizes foram sistematizadas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) na norma D6433, publicada em 1999 e atualizada em 2024 (ASTM, 2024). O PCI é determinado por meio das combinações do tipo, severidade e extensão dos defeitos, os quais são coletados por avaliadores que percorrem as vias e preenchem formulários específicos para cada ocorrência. No presente estudo, entretanto, o PCI não foi calculado como índice de classificação da condição do pavimento, sua metodologia foi utilizada apenas para quantificar dimensões, severidade e extensão dos defeitos observados, itens necessários para atingir o objetivo proposto.

Para superar algumas limitações, tecnologias automatizadas vêm sendo incorporadas às metodologias de inspeção, promovendo maior padronização, agilidade e confiabilidade nos resultados. A fotogrametria se consolidou como uma ferramenta essencial para a obtenção de formas e medidas desde o seu surgimento, em meados do século XIX, inicialmente aplicada ao levantamento de monumentos históricos (Groetelaars e Amorim, 2004). Seu objetivo principal é reconstruir um espaço tridimensional a partir de um conjunto de imagens bidimensionais, transformando o sistema fotográfico bidimensional em uma representação tridimensional do espaço ou do objeto documentado (Coelho Filho; Silva, 2007; Liu *et al.*, 2020).

Com o avanço das tecnologias digitais, o sistema de fotogrametria à curta distância também tem se destacado, permitindo a criação de modelos 3D da superfície de pavimentos flexíveis utilizando câmeras portáteis (Mena e Torres, 2020). Nesse contexto, tecnologias mais acessíveis, como câmeras portáteis e *smartphones*, têm mostrado potencial, dispensando esforço físico e garantindo a segurança das equipes em campo (Souza, 2020).

Dessa forma, a fotogrametria à curta distância com uso de *smartphones* destaca-se como alternativa viável e econômica à inspeção manual tradicional, apresentando potencial para suprir lacunas na gestão da malha viária urbana. Assim, este trabalho tem como objetivo examinar o potencial do uso de *smartphones* na aquisição de imagens e avaliação de defeitos na superfície de pavimentos flexíveis urbanos, analisando a viabilidade da fotogrametria de curta distância como ferramenta para a gestão eficiente da infraestrutura viária urbana.

2. MÉTODO

O estudo foi conduzido em uma das vias da rede de pavimentos flexíveis de um campus universitário localizado em zona urbana, caracterizado por intenso fluxo de pedestres e veículos. A escolha desse local visa representar a dinâmica característica de áreas urbanas em cidades de pequeno porte, refletindo as condições reais de uso enfrentadas em pavimentos flexíveis. O trecho analisado possui 4,1 metros de largura e extensão de 71,9 metros, concentrando-se exclusivamente sobre a malha viária destinada ao tráfego. A via encontra-se em área arborizada, o que proporciona sombreamento significativo ao longo do trajeto.

O método de coleta de dados foi baseado em adaptações do Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação de Defeitos (PAIPA), utilizado por Gimenes (2025). O levantamento de imagens foi realizado com um protótipo de Veículo para Procedimento de Aquisição de Imagens do Pavimento e Avaliação de Defeitos (VPAIPA), descrito em Garcia (2025, em desenvolvimento). O *smartphone* utilizado foi acoplado ao protótipo fixado a uma altura de 2 metros em relação à superfície do pavimento (Figura 1).

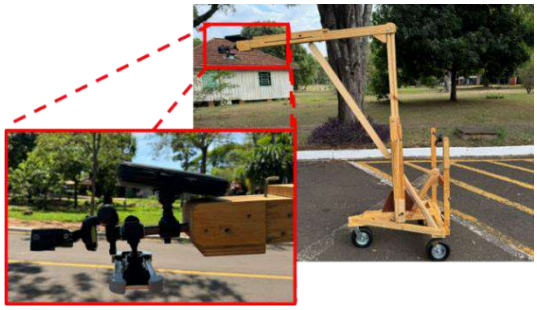


Figura 1: Protótipo VPAIPA com o *smartphone* acoplado

As imagens foram captadas com a câmera traseira de um *smartphone* iPhone 11, cuja resolução é de 12 megapixels (4032 x 3024 pixels). A câmera possui duas aberturas focais, f/1.8 e f/2.4, com distância focal de 4 mm (equivalente a 26 mm em câmeras de 35 mm). O tamanho dos pixels é de 1,4 µm e o sensor possui dimensão de 1/2.55 polegadas. Os formatos de arquivo gerados pela câmera incluem HEIF, JPEG e DNG.

Foram adotados critérios de sobreposição de 70% na direção transversal e 80% na longitudinal, conforme recomendações da literatura para levantamentos fotogramétricos. Com o teste para determinar o campo real de visão da câmera, foi encontrada uma cobertura horizontal de 2,32 m e vertical de 1,75 m por imagem, o que resultou no espaçamento de 70 cm transversalmente e 30 cm entre disparos longitudinais para os instantâneos.

O procedimento envolveu o deslocamento do protótipo ao longo da via, com apoio de marcações no solo e o uso de controle *bluetooth* para o disparo da câmera. A coleta foi executada por duas pessoas. Uma delas era responsável pelo alinhamento do protótipo com base em uma trena estendida ao longo da via e pela marcação das distâncias com o auxílio de um medidor de distância com rodas. A outra conduzia o VPAIPA e realizava os disparos da câmera utilizando um controle remoto *bluetooth*. A cobertura do trecho foi feita por cinco linhas paralelas (ziguezague apenas na direção de ida), com pontos de controle distribuídos no início, meio e fim de cada linha, utilizados como pontos de referência e escala no processamento posterior.

Simultaneamente à aquisição das imagens, foi realizada a inspeção em campo dos defeitos, conduzida seguindo o método do PCI, conforme descrito na norma ASTM (2024). A identificação foi feita por meio de caminhada e foram registradas informações detalhadas sobre o tipo, a severidade e a extensão dos defeitos encontrados. Ressalta-se que, embora o procedimento tenha seguido as diretrizes do PCI, o índice numérico não foi calculado, uma vez que o objetivo do estudo foi apenas quantificar dimensões e severidades.

Para o processamento das imagens optou-se pela utilização dos softwares da linha de produtos *iTwin*, da *Bentley Systems*, acessados por meio de licenças acadêmicas, disponibilizadas pelo programa *Bentley Education*. Os softwares utilizados foram: *iTwin Capture Modeler* (versão 24.01.04.380) empregado como ferramenta principal para gerar os produtos fotogramétricos; o *iTwin Capture Desktop Viewer* (versão 24.1.1.100), utilizado para a visualização dos modelos 3D; e o *iTwin Capture Manage and Extract* (versão 24.2), responsável pela obtenção de dados do modelo tridimensional.

Após o processamento fotogramétrico no *iTwin Capture Modeler*, foi gerado um modelo realista em formato .3sm e o arquivo foi importado para o *iTwin Manage And Extract*. Esse produto foi analisado para identificação e quantificação dos defeitos, com base no método PCI, replicando os critérios da inspeção de campo. Cada defeito foi classificado por tipo e severidade, organizados em camadas (*layers*) com diferenciação por cores.

3. RESULTADOS

A inspeção realizada no trecho analisado permitiu identificar diversos tipos de defeitos na superfície do pavimento, entre eles: trincas por fadiga, trincas longitudinais, trincas transversais, remendos e desgaste. Cada defeito foi classificado segundo os níveis de severidade (alta, média e baixa), tanto a partir da inspeção em campo quanto do processamento digital das imagens. Foi elaborado um gráfico de colunas agrupadas, representado na Figura 2, com a comparação entre as ocorrências (número de vezes que cada defeito foi identificado) e as extensões (somatório das áreas ou comprimentos individuais de todos os defeitos observados em cada categoria) de cada tipo de defeito, considerando ambos os métodos de levantamento.

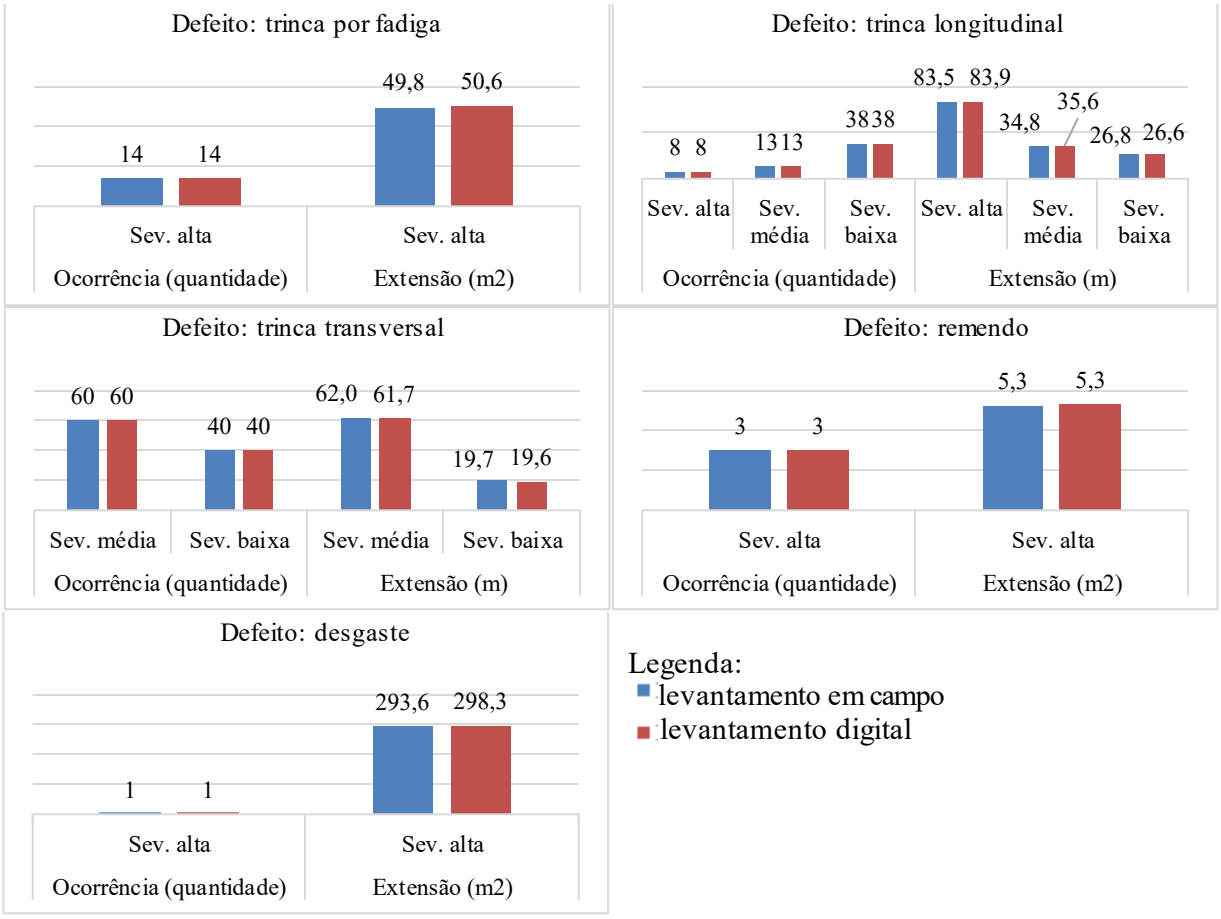


Figura 2: Ocorrência e extensão dos defeitos para as medidas de campo e digital

A comparação entre os levantamentos em campo e digital revelou alta correspondência na identificação e mensuração dos defeitos, tanto em número de ocorrências quanto em extensão. Para o defeito trinca por fadiga, ambos os métodos registraram 14 ocorrências com severidade alta, com uma variação mínima na extensão: 49,8 m² no levantamento em campo e 50,6 m² no levantamento digital, sendo 0,8 m² de diferença entre os dois, representando um erro relativo de 1,6%. Quanto às trincas longitudinais, houve correspondência total nas quantidades observadas: 8 ocorrências de severidade alta, 13 de severidade média e 38 de severidade baixa. As extensões também foram semelhantes, com pequenas variações: 83,5 m (campo) e 83,9 m (digital) para severidade alta (erro de 0,5%); 34,8 m e 35,6 m para severidade média (erro de 2,3%); e 26,8 m e 26,6 m para severidade baixa (erro de 0,7%).

Nas trincas transversais, foram identificadas 60 ocorrências de severidade média e 40 de severidade baixa por ambos os métodos. As extensões foram igualmente próximas: 62,0 m e 61,7 m (erro de 0,5%) para severidade

média; e 19,7 m e 19,6 m (erro de 0,5%) para severidade baixa. Para o defeito remendo, ambos os métodos identificaram 3 ocorrências de severidade alta, com extensão idêntica de 5,3 m², evidenciando total compatibilidade entre os levantamentos. Já o defeito desgaste, ambos os métodos registraram 1 ocorrência com severidade alta, com uma variação mínima na extensão: 293,6 m² no levantamento em campo e 298,3 m² no levantamento digital, sendo 4,7 m² de diferença entre os dois, o que representa um erro relativo de 1,6%.

Dentre os defeitos analisados, a trinca transversal apresentou o maior número de ocorrências, totalizando 100 ocorrências identificadas por ambos os métodos. O defeito de maior extensão foi o desgaste de severidade alta, que, apesar de apresentar maior diferença entre os métodos (4,7 m²), ocupou grande parte da área estudada, justificando sua representatividade espacial. O menor erro foi observado no defeito remendo de severidade alta (0%), enquanto a maior porcentagem de erro ocorreu nas trincas longitudinais de severidade média (2,3%). Em geral, os erros relativos permaneceram abaixo de 2,5%, indicando que as diferenças entre os métodos são pouco significativas e confirmando a confiabilidade do levantamento para mensuração dos defeitos.

Observou-se que os valores de extensão obtidos pelo levantamento digital foram ligeiramente superiores aos obtidos em campo, o que pode ser atribuído às condições mais controladas no ambiente de análise digital, que favorecem a identificação mais precisa dos defeitos. Em contrapartida, a avaliação em campo, realizada sob condições adversas pode ter levado à subestimação da gravidade ou da extensão dos danos. Uma exceção foi observada nas trincas transversais, cujo somatório de extensão foi maior no levantamento em campo, refletindo uma percepção conservadora na análise do modelo, o que pode ter acontecido devido à qualidade da imagem.

Para avaliar o grau de concordância entre os dados, foi realizada uma análise de regressão entre as extensões dos defeitos de trincas (por fadiga, longitudinais e transversais), conforme ilustrado na Figura 3.

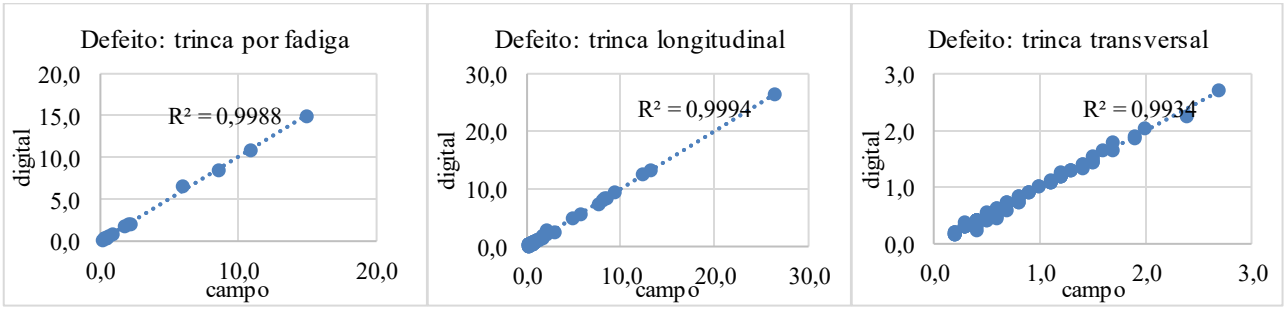


Figura 3: Gráficos de correlação para as medidas de campo e modelo digital

A análise dos gráficos de dispersão entre os dados obtidos em campo e aqueles extraídos do levantamento digital revelou uma forte correlação linear positiva para todos os defeitos avaliados. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,9994 para trincas longitudinais, indicando quase perfeita equivalência entre as medições em campo e as extraídas do modelo 3D. Para a trinca por fadiga, o valor foi de 0,9988, e para a trinca transversal, 0,9934, o que ainda representa excelente correspondência. Com isso a linha de tendência e o diagrama de dispersão indicam que quase 100% da variação das medições do modelo é explicada pela reta de regressão, o que reforça a confiabilidade do modelo fotogramétrico para fins de avaliação de defeitos.

As diferenças observadas entre os procedimentos foram pequenas, sem introduzir influência significativa na análise. Além disso, a qualidade visual do modelo 3D se mostrou satisfatória, a visualização no software *iTwin Capture Viewer* evidenciou o nível de detalhamento do modelo 3D, conforme demonstrado na Figura 4.

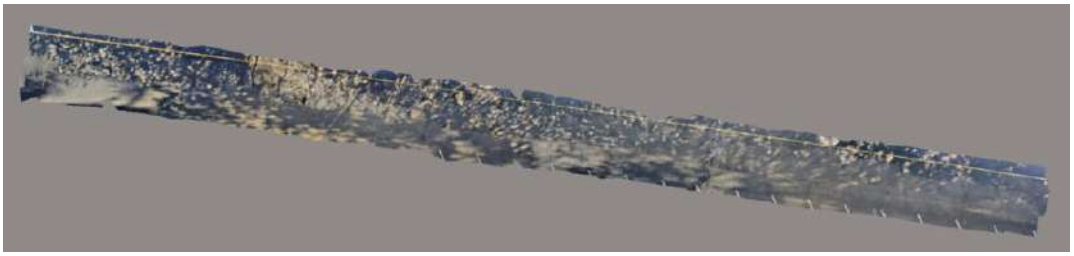


Figura 4: Visualização do modelo 3D no *iTwin Capture Viewer*

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a aplicação da fotogrametria digital com uso de imagens adquiridas com a câmera de um *smartphone* na avaliação de defeitos na superfície de pavimentos flexíveis urbano. A análise comparativa entre os dados obtidos em campo e aqueles extraídos do modelo digital 3D evidenciou a precisão e a confiabilidade do método. A trinca transversal foi o defeito com maior número de ocorrências (100 no total), enquanto o desgaste apresentou a maior extensão registrada (293,6 m² em campo e 298,3 m² no modelo digital 3D). Os altos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,9994$ para trinca longitudinal, 0,9988 para trinca por fadiga e 0,9934 para trinca transversal) confirmam a forte correlação entre os métodos, evidenciando a precisão e a confiabilidade da fotogrametria digital com *smartphone* na avaliação de pavimentos flexíveis urbanos. Ademais, o modelo 3D exibiu uma qualidade visual satisfatória, possibilitando a identificação precisa dos defeitos, apesar de algumas limitações pontuais em regiões sombreadas que comprometeram a clareza das imagens.

O uso de *smartphones* para a inspeção de pavimentos oferece benefícios consideráveis, como o custo reduzido dos aparelhos, a facilidade de uso e a portabilidade, possibilitando a coleta de dados de maneira rápida e prática, sem a exigência de equipamentos especializados. Além disso, as câmeras modernas têm qualidade suficiente para produzir imagens claras e compatíveis com softwares de reconstrução 3D, o que torna a técnica interessante para pesquisas em engenharia urbana. No entanto, o método possui restrições no que diz respeito à sensibilidade à luz, interferências visuais e estabilidade durante a captura, as quais podem afetar a qualidade das imagens e a exatidão dos modelos. Apesar desses desafios, o processamento em softwares especializados manteve a qualidade das imagens e assegurou resultados confiáveis. Isso demonstra que a fotogrametria de curta distância com *smartphones* é uma solução tanto técnica quanto econômica para auxiliar na gestão eficaz da infraestrutura viária urbana.

Para continuidade da pesquisa, pretende-se ampliar a amostra para incluir diferentes condições de tráfego e iluminação, bem como aprofundar a discussão sobre as limitações encontradas. Futuras aplicações do método devem considerar essas variáveis para validar a robustez da técnica e orientar ajustes metodológicos, garantindo maior confiabilidade e abrangência nos estudos de pavimentos urbanos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, bem como ao Laboratório de Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia e Urbanismo (LET-CTU) e à Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela infraestrutura fornecida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D6433-24: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys, 2024.

COELHO FILHO, Luiz Carlos Teixeira; SILVA, Jorge Luís Nunes Brito. *Fotogrametria Digital*. Rio de Janeiro: Eduerj, 2007. 196 p.

GARCIA, C. *Procedimento de aquisição de imagens do pavimento e avaliação de defeitos (PAIPA)* [tese de doutorado em desenvolvimento]. Londrina: Universidade Estadual de Londrina; 2025.

GIMENES, L.A. *Fotogrametria à curta distância com uso de smartphone para avaliação da condição de pavimentos flexíveis urbanos* [dissertação]. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil; 2025. https://repositorio.uel.br/handle/123456789/18605.

GROETELAARS N.J., AMORIM A.L. Técnicas de restituição fotogramétricas digitais aplicadas à Arquitetura: um estudo de caso. *6º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário* (COBRAC); 2004; Florianópolis.

LIU, Y. *et al*. *3D Imaging, Analysis and Applications*. [s.l.] Springer Nature, 2020.

MENA, L. P. C.; TORRES, B. A. Z. Evaluación del desgaste de pavimento flexible mediante el uso de fotogrametría de corto alcance. *Avances Investigación en Ingeniería*, v. 18, n. 1, 3 dez. 2020. https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6629.

SOUZA, A. A. *Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos com o uso de geotecnologias*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

Larissa de Abreu Gimenes (larissa.gimenes@uel.br); *Carlos Alberto Prado da Silva Júnior* (cprado@uel.br); *Heliana Barbosa Fontenele* (heliana@uel.br)
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380 - Campus Universitário, Londrina - PR

Avaliação e Reabilitação de Pavimentos

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DE MISTURAS RECICLADAS ESTABILIZADAS COM EMULSÃO ASFALTICA: PARAMETROS MECANICOS E FUNCIONAIS

Leonardo Lunkes Wagner, Washington Peres Núñez, Lélio Antônio Teixeira Brito
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
A avaliação de materiais reciclados com emulsão para uso em camadas de reabilitação de pavimentos tem ganhado espaço, com discussões a nível nacional impulsionadas pelo avanço da normatização técnica em desenvolvimento. Neste contexto, esta pesquisa busca contribuir para o entendimento de padrões mecânicos, em laboratório e campo, de materiais do tipo *bitumen stabilised materias* (BSM), empregados em camadas de base rodoviárias. Em nível laboratorial, serão avaliadas misturas com diferentes teores de RAP, além da análise de desempenho em campo e por meio de ensaios acelerados com o simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS, aplicados a uma mistura composta por 32% de RAP, agregados virgens, 1% de cimento Portland e emulsão asfáltica, utilizada em camada de base. Com esta pesquisa, espera-se estabelecer correlações entre propriedades laboratoriais e de campo, bem como analisar a influência da variação dos teores de RAP no desempenho de materiais do tipo BSM.
Palavras-chave: Reabilitação de pavimentos, Simulação de tráfego, Materiais estabilizados.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais estabilizados do tipo b*itumen stabilised material* (BSM), com emulsão asfáltica apresenta crescimento no cenário nacional. Conforme Guatimosim (2015), nos últimos anos, a reciclagem a frio tem ganhado destaque devido aos seus benefícios econômicos e ambientais, utilizando a estabilização com asfalto. A crescente demanda por soluções que combinem alto desempenho estrutural com baixos custos de manutenção e aplicação tem impulsionado a expansão das técnicas de reciclagem de pavimentos, com destaque para aquelas que utilizam a estabilização com agentes asfálticos. A capacidade de reutilizar o material fresado de pavimentos deteriorados, aliada à redução dos custos de transporte, fortalece ainda mais a viabilidade financeira desses processos. Além disso, o menor tempo necessário para a execução das obras contribui para a diminuição dos impactos operacionais. Sob o ponto de vista técnico, a reciclagem permite a rápida reabilitação de camadas mais profundas do pavimento, configurando-se como uma solução eficaz para eliminar problemas estruturais.

Não há consenso na literatura quanto à melhor abordagem para o uso desses materiais, conforme apontado por Meocci *et al.* (2017) e Xiao *et al.* (2018). No Brasil, iniciativas normativas vêm avançando, com a elaboração de normas nacionais pela ABNT, diretrizes do DNIT e regulamentações estaduais, como as do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP). No entanto, ainda persistem divergências quanto aos métodos de dosagem, aos critérios de ensaios mecânicos e de desempenho, evidenciando a necessidade de padronização e validação técnica.

A complexidade na definição de parâmetros decorre da variação das características do RAP, incluindo diferenças na granulometria, nos teores de fíler (como cimento) e na quantidade de emulsão asfáltica adicionada. Esses fatores influenciam diretamente o comportamento do material, que deve manter propriedades granulares com desempenho estrutural aprimorado. Além disso, a proporção de RAP nas misturas e a escolha dos agentes cimentantes impactam significativamente a resposta mecânica do material. O excesso de aglutinantes pode induzir a cimentação, alterando seu comportamento de um estado granular para cimentado (Ayar, 2018). A literatura recomenda a utilização de 0% a 3% de material aglutinante, podendo-se empregar cimento, cal ou combinações desses agentes (Gouveia *et al.*, 2021; Niazi; Jalili, 2009; Romeo *et al.*, 2018; SABITA, 2020).

Somado a isso, a definição do método de compactação mais adequado ainda gera questionamentos na literatura especializada. Diversas abordagens têm sido propostas para a determinação da umidade ótima em misturas estabilizadas com emulsão asfáltica. O TG2 (SABITA, 2020) recomenda sua determinação seja realizada por meio de curvas de compactação em energia modificada, permitindo determinar a umidade ótima de compactação e a densidade máxima. Em outros estudos, a umidade ótima pode ser determinada compactando-se corpos de prova com 180 giros, mantendo um teor fixo de cimento e variando os teores de água. O teor ótimo de fluidos é identificado no ponto de maior densidade aparente (Leandri; Losa; Di Natale, 2015).

Pesquisas desenvolvidas por Bessa *et al.* (2016); Bocci *et al.* (2011); Brondani (2016); Mondal; Kuna (2022); Tanski, (2016) destacam a utilização do compactador giratório como a alternativa utilizada para a moldagem de seus corpos de prova, tanto para dosagem quanto para as demais moldagens para avaliações complementares. A utilização do Compactador Giratório Superpave para preparação de amostras de

laboratório é mais eficaz e útil que outros métodos de compactação. Entretanto, diversos países adotam métodos distintos, em função de limitações tecnológicas e financeiras. O TG2 (SABITA, 2020) emprega, alternativamente, o compactador vibratório, o qual tem demonstrado um desempenho satisfatório na compactação das BSM e se apresenta como uma solução economicamente mais viável em comparação ao compactador giratório.

O objetivo geral da pesquisa é conduzir um amplo estudo em laboratório e em campo, visando determinar as propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica. Para isso, serão empregados ensaios em laboratório utilizando o compactador vibratório, simulações em verdadeira grandeza com simulador de tráfego e avaliações em condições reais de serviço. Busca-se, assim, compreender o comportamento dessas misturas ao longo do tempo e avaliar seu potencial de aplicação em obras rodoviárias.

2. MÉTODOS

A pesquisa será realizada considerando três etapas básicas conforme demonstrado na Figura 1.

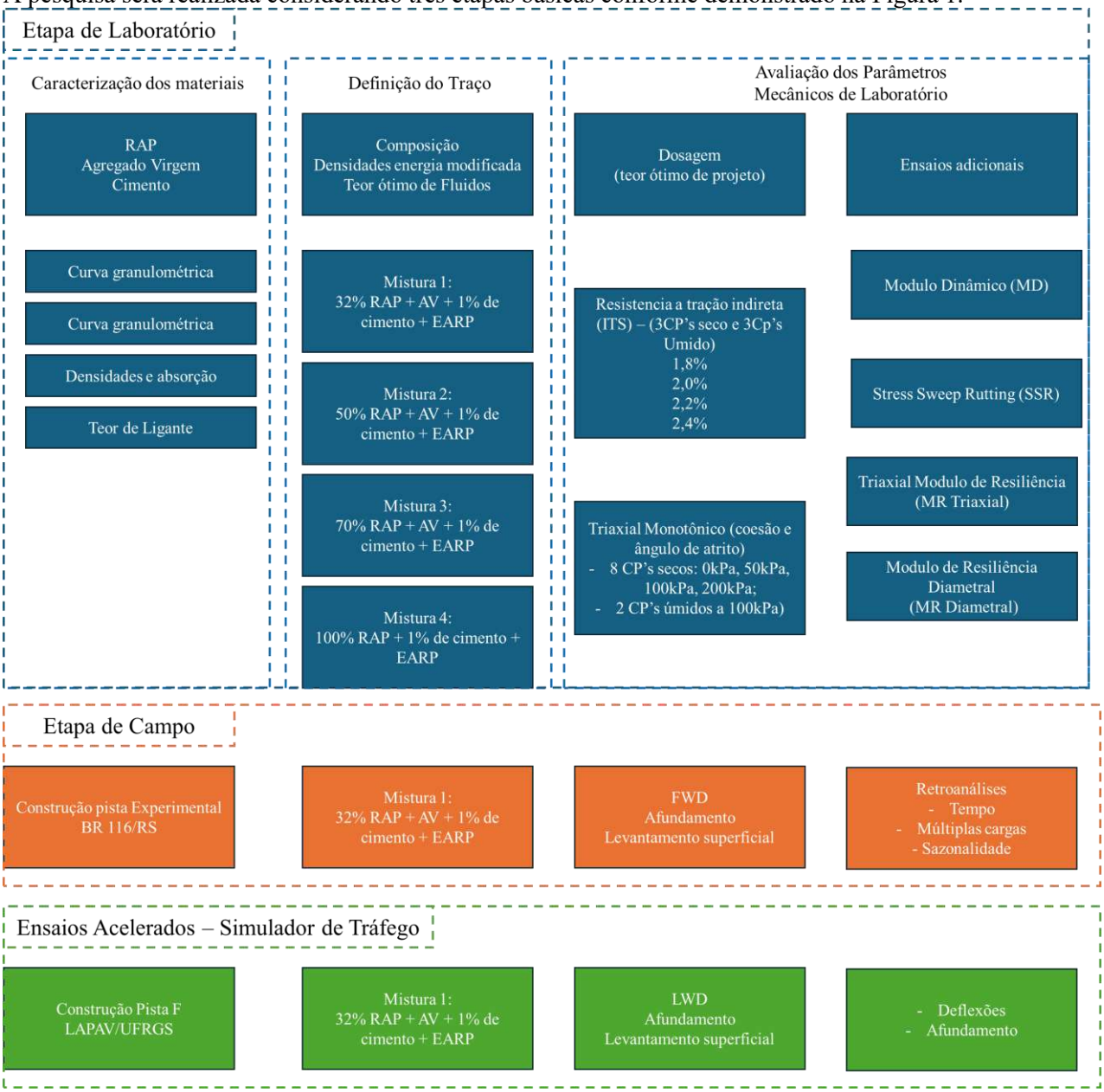


Figura 1: Delineamento da pesquisa

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Até o presente momento, os resultados preliminares obtidos contemplam as três etapas previstas na pesquisa. Na etapa laboratorial, foi desenvolvida uma mistura contendo 32% de RAP, a qual atendeu a todos os requisitos

de desempenho estabelecidos. Essa mesma composição foi empregada na construção de um trecho experimental na BR-116/RS, no km 495, bem como na execução da pista experimental F, localizada no Laboratório de Pavimentação, em janeiro de 2023. Nesse contexto, ambos os segmentos vêm sendo monitorados e avaliados, com a coleta contínua de dados para, ao final da pesquisa, possibilitar a obtenção e análise dos parâmetros técnicos de desempenho.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio dos Recursos de Desenvolvimento Tecnológico – RDT, da Concessionaria ECOVIAS SUL, sob regulação da Agência Nacional de transportes Terrestres – ANTT.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYAR, Pooyan. Effects of additives on the mechanical performance in recycled mixtures with bitumen emulsion: An overview. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 178, p. 551–561, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.174.

BESSA, Iuri S. *et al.* Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and portland cement. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 43, n. 9, p. 773–782, 2016. Disponível em: http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/cjce-2016-0111.

BOCCI, M. *et al.* A study on the mechanical behaviour of cement-bitumen treated materials. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 25, n. 2, p. 773–778, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007.

BRONDANI, Chaveli. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO COM EMULSÃO E CIMENTO PORTLAND**. 2016. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO, [*s. l.*], 2016.

GOUVEIA, Beatriz Chagas Silva *et al.* Use of calcium oxide as active filler for bituminous stabilised materials. **Road Materials and Pavement Design**, [*s. l.*], v. 22, n. 9, p. 2131–2144, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1881591.

GUATIMOSIM, FREDERICO VASCONCELLOS. **Mechanical Behaviour and Structural Performance of Recycled Foamed Bitumen Stabilized Materials**. 2015. 124 f. - Universidade de São Paulo, [*s. l.*], 2015.

LEANDRI, Pietro; LOSA, Massimo; DI NATALE, Andrea. Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 75, p. 275–282, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.028.

MEOCCI, Monica *et al.* Evaluation of mechanical performance of cement–bitumen-treated materials through laboratory and in-situ testing. **Road Materials and Pavement Design**, [*s. l.*], v. 18, n. 2, p. 376–389, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213506.

MONDAL, Purbayan Ghosh; KUNA, Kranthi K. Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 326, n. February, p. 126783, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126783.

NIAZI, Y.; JALILI, M. Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 23, n. 3, p. 1338–1343, 2009. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020.

ROMEO, Elena *et al.* Effect of active fillers on cracking performance of bitumen-stabilised materials. **Road Materials and Pavement Design**, [*s. l.*], v. 19, n. 7, p. 1563–1574, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1325773.

SABITA. **Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)**. 3°ed. [*S. l.: s. n.*], 2020.

TANSKI, MATEUS CAMARGO COMPORTAMENTO. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAL RECICLADO A FRIO COM EMULSÃO E CIMENTO**. 2016. - Universidade Federal de Santa Maria, [*s. l.*], 2016.

XIAO, Feipeng *et al.* A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 180, p. 579–604, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006.

Leonardo Lunkes Wagner (leonardo.lunkes@ufrgs.br)
Washington Peres Núñez (washington.nunez@ufrgs.br) Co orientador
Lélio Antônio Teixeira Brito (lelio.brito@ufrgs.br) Orientador
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Laboratório de Pavimentação – LAPAV/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 43816 - Agronomia, Porto Alegre - RS, Brasil, CEP 91501-970.

RECICLAGEM COM EMULSÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM BASES LATERÍTICAS – ESTUDO LABORATORIAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

Júlia Lenzi Cardoso, Washington Peres Núñez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
A crescente demanda por soluções sustentáveis na infraestrutura rodoviária tem impulsionado o uso de técnicas de reciclagem de pavimentos, destacando-se a Reciclagem Profunda a Frio (FDR) com adição de emulsão asfáltica, recentemente introduzida no Brasil. Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho mecânico de uma mistura composta por 25% de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) e 75% de solo laterítico, estabilizada com emulsão asfáltica, representando camadas recicladas em regiões onde as bases de pavimentos são constituídas por este tipo de solo. A pesquisa adota como referência a metodologia da SABITA (2020) – TG2, além de empregar ensaios laboratoriais como o de resistência à tração indireta (ITS) e ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência e parâmetros de cisalhamento. Os resultados preliminares indicam viabilidade da mistura para uso em camadas recicladas de pavimentos, especialmente em regiões tropicais, onde solos lateríticos são predominantes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo propõe a investigação do comportamento mecânico de misturas recicladas de RAP e solo laterítico, estabilizadas com emulsão asfáltica, visando sua aplicação em obras rodoviárias. A motivação central reside na ausência de normativas nacionais que tratem da FDR com esse tipo de combinação de materiais, além da necessidade prática de reabilitação de pavimentos, em Estados da região Centro-Oeste, como o Mato Grosso, onde bases de pavimentos antigos foram construídas com materiais lateríticos, dada a inexistência de agregados pétreos.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico de uma mistura de RAP e solo laterítico reciclada com emulsão asfáltica, considerando parâmetros de mistura e influência do tempo de cura.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os materiais constituintes da mistura reciclada, incluindo RAP, solo laterítico e emulsão asfáltica, quanto às suas propriedades físicas e mecânicas relevantes.
- Desenvolver o processo de dosagem da mistura RAP + solo laterítico com emulsão asfáltica, com base em diretrizes técnicas internacionais.
- Investigar o efeito do tempo de cura nos parâmetros de desempenho mecânico da mistura reciclada, por meio de diferentes metodologias de cura (controlada e estendida).
- Determinar a resistência à tração indireta (ITS) da mistura em diferentes tempos de cura, avaliando a evolução da resistência e a suscetibilidade à umidade.
- Determinar o módulo de resiliência (MR) da mistura reciclada, em diferentes tempos de cura, visando identificar a evolução da rigidez do material.
- Analisar a viabilidade técnica da aplicação da mistura reciclada como camada de base em pavimentos de tráfego moderado a alto, considerando os parâmetros obtidos e a ausência de normativas nacionais específicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica de reciclagem profunda de pavimentos (Full Depth Reclamation – FDR), especialmente com emulsão asfáltica, tem se destacado como alternativa sustentável para reabilitação rodoviária. Segundo Balbo (2007) e Milton et al. (2015), ela permite a reutilização integral das camadas de revestimento e base, reduzindo a necessidade de agregados virgens e os impactos ambientais do transporte. No Brasil, a escassez de materiais como a brita graduada simples (BGS) e os altos custos logísticos reforçam o uso de materiais locais, como o solo laterítico, presente em cerca de 85% do território nacional (Vilibor et al., 2009), com propriedades geotécnicas favoráveis.

O RAP, por sua vez, representa um insumo reaproveitável com bom desempenho quando combinado ao solo laterítico e estabilizado com emulsão asfáltica (SABITA, 2020; Wirtgen, 2012). Sem estabilização adequada, essa mistura apresenta baixas coesão e resistência (Balbo, 2007). A escolha da emulsão como ligante justifica-se por sua compatibilidade, facilidade de uso e baixa exigência técnica (NCHRP, 2021; SABITA, 2020). Seu

desempenho, entretanto, está intimamente ligado ao tempo de cura, fundamental para o desenvolvimento da coesão (Milton et al., 2015; Kézdi, 1979).
O Brasil ainda carece de normativas específicas sobre FDR com emulsão; destaca-se apenas a especificação do DER-SP (ET-DE-P00/034) e o Projeto de Norma DNIT XXX – ES, em desenvolvimento. No exterior, destacam-se as metodologias da Wirtgen (2012), SABITA TG2 (2020), Austroads (2019), ARRA FDR201A (2018) e AASHTO M 352 (2023), com ênfase para o TG2, por considerar variáveis de cura e umidade. A adição de fíleres ativos como cal ou cimento é recomendada para melhorar coesão e durabilidade (Kézdi, 1979; SABITA, 2020), desde que o teor de fíler não ultrapasse 1% do material seco, evitando comportamento excessivamente rígido e fissuramento por fadiga.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa compreendeu as seguintes etapas:

3.1. Coleta e caracterização dos materiais

Tanto o RAP quanto o material laterítico utilizados nesta pesquisa foram cedidos por uma concessionária do Estado do Mato Grosso. A coleta foi realizada no município de Diamantino, localizado a aproximadamente 182 km de Cuiabá, capital estadual. A extração dos materiais ocorreu por meio de uma máquina fresadora, que operou separadamente nas camadas de revestimento e de base do pavimento, de modo a permitir a obtenção individualizada de cada tipo de material. Em seguida, foram conduzidos ensaios de análise granulométrica e de compactação, com o objetivo de caracterizar adequadamente os materiais coletados.

3.2. Emulsão asfáltica

Foi utilizada emulsão catiônica de ruptura lenta RL-1C-E (Recycla RP), fornecida pela empresa GRECA Asfaltos, indicada para misturas com alto teor de RAP.

3.3. Dosagem da mistura

A etapa de dosagem da mistura teve como objetivo determinar as proporções ideais entre os componentes principais: 75% de solo laterítico e 25% de material fresado (RAP), considerando a adição de emulsão asfáltica como agente estabilizante e da cal hidratada como fíler ativo, em proporção fixa de 1% em massa do material seco. A estimativa inicial do teor de emulsão foi realizada com base nas características granulométricas da mistura, conforme preconizado pelo guia técnico TG2 (SABITA, 2020).
Para a definição do teor ótimo de emulsão, foram moldadas amostras submetidas a ensaios de resistência à tração indireta (ITS), utilizando teores de ligante residual variando entre 1,8% e 2,4%. Os resultados desses ensaios permitiram a identificação do teor mais adequado, buscando assegurar o desempenho mecânico desejado da mistura, com níveis satisfatórios de coesão e resistência à umidade.

3.4. Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi feita por meio da compactação vibratória de amostras previamente dosadas, utilizando-se umidade ótima e teor de emulsão previamente determinados. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 150 mm de diâmetro por 95 mm de altura para os ensaios de resistência à tração indireta (ITS), e corpos de 150 mm por 300 mm para os ensaios triaxiais.
Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a dois protocolos distintos de cura: a cura controlada, conduzida segundo as condições padronizadas pelo guia técnico TG2 (SABITA, 2020), e a cura estendida, conforme os procedimentos descritos por Martell (2022), a qual busca avaliar o comportamento da mistura ao longo de períodos prolongados. Os tempos de cura investigados foram de 3, 7, 14 e 28 dias, de forma a possibilitar a análise da evolução da resistência e rigidez da mistura reciclada.

3.5. Ensaios realizados

A avaliação do desempenho mecânico da mistura reciclada com emulsão asfáltica foi realizada por meio da execução de três tipos principais de ensaios laboratoriais:

- Resistência à Tração Indireta (ITS): ensaio realizado em diferentes teores de emulsão e fíler, sob condições secas e úmidas. Este ensaio foi utilizado para avaliar a resistência mecânica da mistura, sua durabilidade frente à ação da umidade e como critério de aceitação na definição dos teores de ligante e aditivo.
- Ensaio Triaxial Monotônico: conduzido com o intuito de determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura, a saber, a coesão (c), o ângulo de atrito interno (ϕ) e a coesão retida (RetC), por meio da construção da envoltória de Mohr-Coulomb. Os corpos de prova foram submetidos a tensões confinantes de 0, 50, 100, 150 e 200 kPa, conforme metodologia adaptada da SABITA (2020).
- Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas (Módulo de Resiliência – MR): utilizado para avaliar a deformabilidade da mistura ao longo dos diferentes tempos de cura. Os ensaios foram realizados em corpos de prova de maiores dimensões (150 mm × 300 mm), conforme especificações da DNIT 134/2018-ME. O módulo de resiliência foi determinado para os períodos de 3, 7, 14 e 28 dias de cura, permitindo a avaliação do desenvolvimento mecânico da mistura ao longo do tempo.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

O RAP apresentou deficiência nas frações finas (<0,075 mm), porém, seu uso limitado a 25% manteve a mistura dentro dos parâmetros.

A curva granulométrica da mistura final atendeu integralmente aos limites normativos da SABITA TG2 (2020). Observa-se que as porcentagens de RAP (25%) e solo laterítico (75%) representam as espessuras de revestimentos asfáltico e base laterítica característicos de pavimentos da região.

Agradecimentos

Agradeço à concessionária Nova Rota do Oeste e à empresa Greca Asfaltos pelo fornecimento dos materiais essenciais à realização desta pesquisa. Registro também minha gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de fomento acadêmico, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balbo, J. T. *Pavimentação Asfáltica: Volume 2 – Técnicas de Construção.* São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

Kézdi, Á. *Soil Physics: Selected Topics.* Amsterdam: Elsevier, 1979.

Martel, D. W. *Reciclagem profunda de pavimentos asfálticos com emulsão: aplicação da metodologia de dosagem sul-africana a nível nacional.* 2022. 139 f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Milton, M. F.; Silva, R. A.; Gomes, L. P. *Avaliação do impacto ambiental na estabilização de pavimentos com materiais reciclados.* Revista de Engenharia Civil, v. 22, n. 3, p. 215–226, 2015.

NCHRP – NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Best Practices for Full-Depth Reclamation with Stabilization. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2021.

SABITA – SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION. *Technical Guidelines: Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials.* SABITA TG2. 4th ed., 2020.

Vilibor, J. *et al*. *Classificação dos solos lateríticos brasileiros e sua aplicação em pavimentação.* Simpósio Brasileiro de Geotecnia, Porto Alegre, 2009.

WIRTGEN GmbH. *Cold Recycling Manual.* Windhagen, Alemanha: Wirtgen Group, 2012.

Júlia Lenzi Cardoso (julia.lenzi@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Av. Osvaldo Aranha, 99 – 7º andar, sala 706, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
Washington Peres Núñez (washington.nunez@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Av. Osvaldo Aranha, 99 – 7º andar, sala 706, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Dimensionamento e Modelagem Computacional de Pavimentos

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS EMPREGADOS EM CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Wendel Silva Cabral [1], **Suelly Helena de Araújo Barroso** [2]
[1]Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, [2] Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO
Devido às novas exigências de análises mecânicas dos pavimentos brasileiros motivadas pelo desenvolvimento de novos métodos de dimensionamento, torna-se importante promover pesquisas para conhecimento e controle da ocorrência da Deformação Permanente (DP) em solos. A partir disso, o presente estudo apresenta como objetivo geral uma análise comparativa na obtenção do parâmetro da DP de solos utilizados em pavimentos do oeste potiguar/RN, pelos métodos nacional do DNIT e pela técnica do ensaio triaxial de múltiplos estágios. Os resultados mostraram que o ensaio triaxial de carga repetida de múltiplos estágios, baseada na norma europeia, apresentou vantagens operacionais, bem como na otimização de recursos. Observou-se que tal técnica tornou-se mais recomendada como método para obtenção de DP das amostras ensaiadas, haja vista apresentar menos complexidade, mais celeridades e economia energética.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora os pavimentos no Brasil ainda sejam dimensionados, empiricamente levando-se em consideração informações pouco representativas da realidade estrutural das camadas frente às solicitações das cargas dos veículos, esforços têm sido empreendidos no desenvolvimento, validação e uso de técnicas mais racionais. O método MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), recentemente apresentado pelo DNIT, permite dimensionar pavimentos incluindo dados mecânicos obtidos em ensaios dinâmicos. A Deformação Permanente (DP) se apresenta como um dos principais parâmetros utilizados.

Medina e Motta (2015) apresentaram o método a partir de pesquisas desenvolvidas na Rede Tecnológica de Asfaltos, com a inclusão de parâmetros de deformabilidade plástica no pavimento asfáltico em todas as camadas, possibilitando o entendimento do comportamento da estrutura com suas deformações totais.

Um dos fenômenos relevantes no estudo do comportamento estrutural do pavimento a DP, favorece a análise do defeito de afundamento de trilha de roda (ATR), um dos principais processos de deterioração dos pavimentos flexíveis. O estudo da DP em camadas granulares ainda é pouco difundido no Brasil, haja vista que suas instruções de ensaios são processos longos e onerosos conforme consta em DNIT 179/2018 – IE. Segundo Guimarães (2009), o estudo da DP deve ser feito para as diferentes configurações de cargas que solicitam o pavimento incluindo-se os veículos pesados.

Para a obtenção dos valores de deformação, os materiais do pavimento são caracterizados através de estudos em laboratório, nos quais as condições de carga e ambientais frequentemente experimentadas pelo material no campo são simuladas a partir dos ensaios triaxiais de carga repetida. Os dados obtidos são utilizados para desenvolver equações constitutivas e modelos matemáticos, que podem prever o comportamento mecânico dos materiais conforme citado em Salour e Erlingsson (2015).

Os ensaios de DP em solos, regulamentado pela norma DNIT 179/2018 – IE e realizado por meio de ensaios triaxiais, são conduzidos utilizando-se pares de tensões (confinamento constante e desvio variável) sujeitos a um determinado número de ciclos de carga (mínimo de 150.000). Devido ao perfil do tráfego, o solo é ensaiado com tensões de diferentes magnitudes requerendo o preparo de diversas amostras fazendo com que haja a necessidade de dispêndio de tempo em torno de 9 a 18 dias a depender da frequência aplicada.

Porém, para melhor simular as condições do tráfego, foi desenvolvido o teste triaxial de carga repetida de múltiplos estágios na qual uma única amostra é submetida a uma série de aplicações de ciclos de até 10.000 cargas com tensões consecutivas de magnitudes variáveis. Embora as especificações e procedimentos de testes triaxiais de múltiplos estágios sejam explicitados na norma europeia CEN – EN. 13286–7 (2004), a obtenção de dados tem sido um desafio.

Portanto, esse estudo tem o objetivo de testar metodologias de laboratório para a avaliação da DP de solos que ocorrem na região do oeste potiguar, estado do Rio Grande do Norte, realizar análise comparativa na obtenção

de tal parâmetro, pelos métodos nacional do DNIT e pela técnica do ensaio triaxial de múltiplos estágio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O material selecionado para a coleta e ensaios de deformação permanente, foi em jazidas utilizadas em obras rodoviárias, no baixo oeste potiguar (Microrregião de Mossoró). Essa localidade abrange seis municípios e está situada no estado do Rio Grande do Norte, divisa com o estado do Ceará. No tocante as características biofísica, o solo estudado possui uma geologia argilito/arenoso e pedologicamente um latossolo amarelo distrófico. Os equipamentos utilizados nos ensaios de ambas os métodos foram exatamente iguais. A Figura 1 mostras as características do material, além da jazida onde foi coletado.



Figura 1: Aspectos visuais dos solos coletados

2.2. Metodologia adotada

2.2.1. Ensaios usuais

Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios de massa específica, análise granulométrica por peneiramento, bem como a determinação dos limites de consistência (LL e LP), por meio das normas NBR 6508, 7181, 7180 e 6459, respectivamente. Após a caracterização, os materiais foram submetidos aos ensaios de compactação (NBR 7182), bem como os de pavimentação como CBR e expansão (DNIT – 172 ME).

2.2.2. Ensaios dinâmicos

Para obtenção de dados da DP no solo, foi empregado ensaios triaxiais de carga repetida. O método nacional com aplicação de no mínimo 150.000 golpes, com instruções na norma DNIT 179/2018 – IE, e a técnica europeia regulamentada pela norma CEN – EN. 13286–7 (2004), foram os dois procedimentos empregados nesse presente estudo. O resultado obtido em ambas foi objeto de análises e comparação das vantagens e desvantagens no uso destas.

Ressalta-se que a amostra foi submetida a 150.000 ciclos de carga, quando aplicado o método brasileiro. A frequência de carregamento aplicada foi de 1Hz A duração do pulso de carga para qualquer frequência foi de 0,1 segundo. A compactação foi realizada num molde tripartido de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura em 10 camadas com Wót na energia intermediária. A Tabela 1 apresenta os valores de pares de tensão (confinante – $\sigma 3$ e desvio – σd) empregados.

Tabela 1: Relação de tensões utilizadas nos ensaios triaxiais

Ensaio	Tensão (kPa)		N
	σd	σ3	
1	40	40	150.000
2	80		
3	120		
4	140		

O segundo método utilizado constou da determinação dos níveis máximos de tensão que não devem ser excedidos, par a evitar o desenvolvimento de DP excessivas. Esse procedimento, baseado na norma europeia,

consiste em utilizar diferentes níveis de pares de tensão com a aplicação de 10.000 ciclos de carga (N) em cada par, no mesmo corpo de prova (CP), ou seja, em um único ensaio o material é submetido mais de uma vez às simulações de tráfego com diferentes pares de tensões adotadas no processo.

Conhecido como ensaio triaxial de carga repetidas de múltiplos estágios (RLT), o procedimento europeu estabelece a interrupção do teste quando a DP axial atinge 0,5% em cada estágio antes do carregamento total, prosseguindo com o par de tensão seguinte. Isto é, se ocorrer um afundamento de 0,5% da espessura inicial do CP durante o ensaio, o teste deve ser paralisado e recomeçado com o par de tensão seguinte programado. Uma vez concluída a aplicação dos primeiros 10.000 ciclos de cargas (estágio 1), o ensaio segue sendo realizado de acordo com os estágios planejados restantes.

A Tabela 2 apresenta os ensaios realizados nas amostras dos solos conforme o procedimento europeu. Em todos os ensaios, as amostras foram submetidas a quatro pares de tensões, ou seja, quatro estágios, simulando condições de pequenos, médios e grandes níveis de carregamentos, as quais o material poderá ser submetido no pavimento, com solicitações de 10.000 pulsos de carga para cada par, totalizando uma sequência de 40.000 ciclos por ensaio realizado.

Tabela 2: Relação de tensões utilizadas nos ensaios triaxiais da norma EN. 13286–7, 2004

Ensaios	Tensão (kPa)		N
	σ_d	σ_3	
1	40	40	10.000
	80		
	120		
	160		
2	80	80	
	120		
	240		
	320		
3	120	120	
	240		
	360		
	480		

A norma CEN – EN. 13286–7, 2004, especifica que em cada sequência de ensaios o CP seja submetido a pelo menos três estágios (pares de tensão) ou seja a 30.000 ciclos. Segundo a Tabela 2, foi adotado uma relação σd/σ3 de 1, 2, 3 e 4, respectivamente, mantendo-se a tensão confinante constante para uma sequência com quatro estágios por ensaios, com o intuito de verificar mais detalhadamente a influência do estado de tensões no comportamento do material. Assim, observe-se que para cada ensaio o CP foi submetido a 40.000 ciclos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaios usuais

O resumo da composições granulométrica são mostrados na Tabela 3. Os valores obtidos do coeficiente de uniformidade (Cu) para o solo estudado, apresentou valor menor que 5 indicando boa uniformidade e bem graduados, pois mostrou valor do coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 e 3 segundo a norma NBR 7181/84.

Tabela 3: Resumo da composição granulométrica (%) dos materiais em estudo

Material	Argila + Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
Solo	19,0	33,0	27,0	10,0	11,0

Os valores obtidos de LL, LP e IP, bem como da classificação da AASTHO, foram 20,2%, 12,31%, 7,85% e A-2-4, respectivamente. Em relação à classificação AASTHO, o solo está inserido em um grupo que apresenta previsão de comportamento com desempenho de excelente a bom como material para subleito. Quanto aos ensaios de compactação, obteve-se uma umidade ótima de 6,00%, densidade aparente seca máxima de 1,97 g/cm³ e CBR de 41,90%. O material não apresentou expansibilidade.

À luz dos critérios empíricos, os resultados dos ensaios de CBR mostram que o solo apresentara tendência de boa resistência ao carregamento se utilizados como materiais de camadas mais nobres dos pavimentos (41,9%). Com esses valores, segundo o manual de pavimentação DNIT (2006) o solo é indicado para o uso em sub-bases. Para uma rodovia de baixo volume de tráfego, o solo pesquisado poderia ser empregado na camada de base a depender das especificações locais.

3.2. Ensaios dinâmicos

3.2.1. Método nacional (DNIT)

Os resultados dos afundamentos das quatro (04) amostras ensaiadas, são apresentados na Tabela 4. São mostrados os valores de DP (mm), acumulada da primeira carga aplicada (ε^1), com 10.000 ciclos (ε^{10}), 80.000 (ε^{80}) e 150.000 (ε^{150}) ciclos (N).

Na mesma tabela ,também são apresentados os dados do acúmulo percentual do afundamento por períodos, no qual o corpo de prova foi submetido em relação ao estágio final com 150.000 ciclos, de modo que: (a) ε^1-ε^{10} [$100\times\varepsilon^{10}/\varepsilon^{150}$] representa o acúmulo nos primeiros 10.000 ciclos de carga; (b) ε^{10}-ε^{80} [$100\times(\varepsilon^{80}-\varepsilon^{10})/\varepsilon^{150}$] representa o acúmulo entre 10.000 e 80.000 e (c) ε^{80}-ε^{150} [$100\times(\varepsilon^{150}-\varepsilon^{80})/\varepsilon^{150}$] identifica a DP total ocorrida, em percentual, a partir das 80.000 cargas aplicadas até a conclusão do ensaio.

Tabela 4: Deformação Permanente total e suas relações de acúmulo

Ensaio	Tensão (kPa)		ε^1 (mm)	ε^{10} (mm)	ε^{80} (mm)	ε^{150} (mm)	ε^1-ε^{10} (%)	ε^{10}-ε^{80} (%)	ε^{80}-ε^{150} (%)
	σ_d	σ_3							
1	40	40	0,082	0,155	0,165	0,171	90,64	5,85	3,51
2	80		0,121	0,630	0,732	0,769	81,92	13,26	4,81
3	120		0,176	0,915	0,951	0,975	93,85	3,69	2,46
4	160		0,117	0,048	0,064	0,066	72,73	24,24	3,03

Constata-se que o maior acúmulo de DP ocorreu até 10.000 ciclos, indicando um acomodamento do CP após esse carregamento. Nos ensaios 1 e 3, a amostra deformou mais de 90%, enquanto que no ensaio 2 a DP acumulou 81,92%. Mesmo com um acúmulo de quase 25% no período entre 10.000 e 80.000 das cargas recebidas, o solo apresentou uma linearidade quando submetido às condições do ensaio 4 após 10.000 cargas.

O comportamento do afundamento desse material corrobora com a premissa de que não há necessidade da aplicação de elevado carregamento para a obtenção da DP para o caso deste solo, haja vista que após 10.000 ciclos o material já terá experimentado a deformação que causará o ATR no pavimento. A Figura 2 exibe o desempenho da amostra estudada durante o carregamento programado, apontando para uma estabilização do afundamento antes de 10.000 cargas aplicadas.

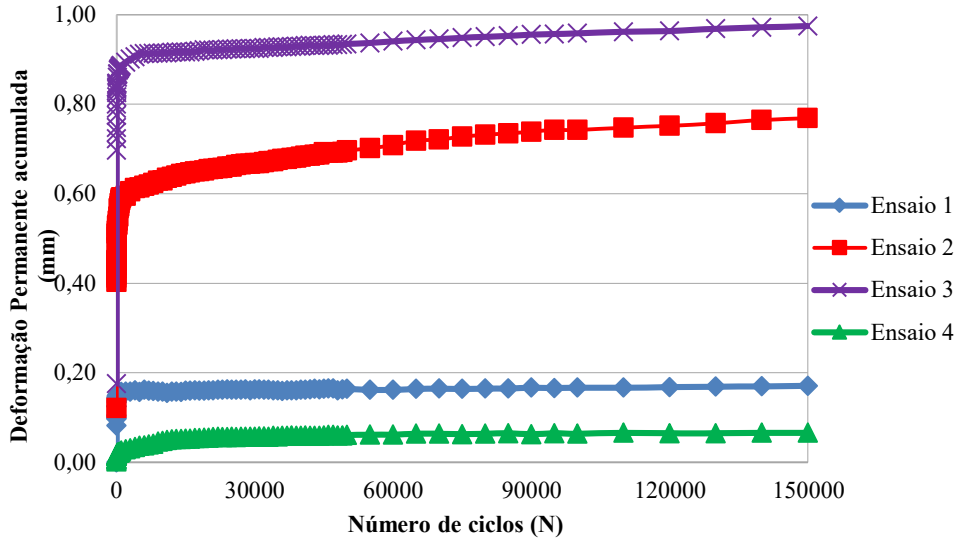


Figura 2: Acúmulo de DP no solo realizados com a norma DNIT 179/2018 – IE

3.2.2. Método europeu (ensaio triaxial de múltiplos estágios)

O índice usualmente utilizado em projetos de rodovias brasileiras é de 12,5 mm (GUIMARÃES, 2009). O ensaio, com o único corpo de prova preparado com o material coletado para o estudo, apresentou bons comportamentos acerca da ocorrência de deformação permanente durante a submissão das cargas nos estágios programados, pois os afundamentos obtidos são significativamente baixos em relação ao considerado como admissíveis. Segundo a Tabela 5, com exceção do experimento 7, os demais ensaios apresentaram tendência de acomodamento após 60% (ε^{6000}) do carregamento aplicado. Esse cenário mostra que o presente solo pode ser utilizado em camadas granulares de pavimentos em todos os perfis de tráfego, haja vista os baixos valores de DP obtidos.

Tabela 5: DP total da amostra pesquisa e suas relações de acúmulo

Ensaio	Tensão (kPa)		σd/σ3	ε^1 (mm)	ε^{6000} (mm)	ε^{10000} (mm)	$\varepsilon^1/\varepsilon^{6000}$ (%)	$\varepsilon^{6000}/\varepsilon^{10000}$ (%)
	σ_d	σ_3						
1	40	40	1	0,324	0,362	0,365	99,2	0,8
2	80		2	0,066	0,213	0,215	99,1	0,9
3	120		3	0,101	0,159	0,163	97,5	2,5
4	160		4	0,019	0,096	0,099	97,0	3,0
5	80	80	1	0,247	0,420	0,427	98,4	1,6
6	120		1,5	0,033	0,071	0,073	97,3	2,7
7	240		3	0,034	0,115	0,149	77,2	22,8
8	320		4	0,027	0,081	0,100	81,0	19,0
9	120	120	1	0,446	0,939	0,976	96,2	3,8
10	240		2	0,031	0,142	0,164	86,6	13,4
11	360		3	0,028	0,101	0,119	84,9	15,1
12	480		4	0,026	0,076	0,087	87,4	12,6

Observa-se que os maiores acúmulos de DP ocorreram nos ensaios 1, 5 e 9 com 0,365; 0,427 e 0,976 mm, respectivamente, desempenho esperado por se tratarem dos primeiros carregamentos em seus respectivos ensaios em cada corpo de prova. Esse comportamento mostra a estabilização do material devido ao efeito da compactação causada pelo tráfego, após o acomodamento inicial do material.

Conforme a Figura 3, o solo apresenta comportamento adequado para utilização em camadas de um pavimento quando submetida a altas e médias intensidades de cargas, indicando tratar-se de um material de alta resistência à DP. De acordo com Guimarães (2009), combinações de tensões desvio com aproximadamente 400kPa e confinantes com 150kPa, podem ser consideradas altas para uma situação de campo.

Tanto na segunda, quanto na terceira sequência de ensaios, adotando tensões elevadas, os afundamentos totais são considerados baixos, 0,749 mm e 1,346 mm, respectivamente. Diante disso, o material é indicado para utilização em camadas de pavimento por apresentar elevada resistência à deformação permanente.

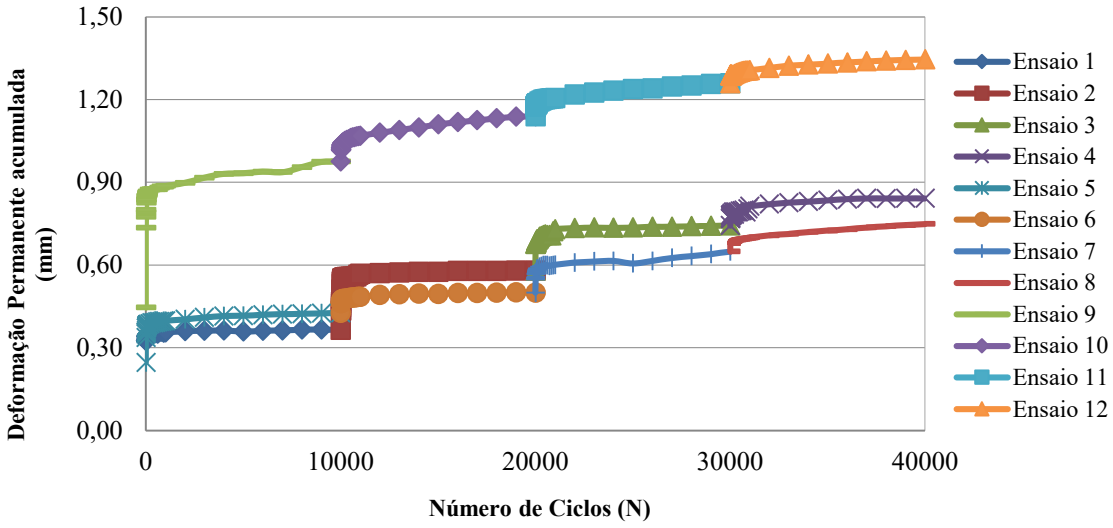


Figura 3: DP total acumulada nos estágios de tensões da amostra

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia de ensaios triaxiais de cargas repetidas de múltiplos estágios (RLT) com aplicações de 10.000 ciclos por estágio (CEN – EN. 13286–7, 2004) apresentou comportamento satisfatório na obtenção dos valores da DP do solo aqui pesquisado quando comparada a metodologia do uso de ciclos de cargas longos com 150.000 ciclos (DNIT 179/2018 – IE). Essa técnica permitiu a aquisição de resultados confiáveis para as devidas análises em aproximadamente 28 horas e 45 minutos para a conclusão do ensaio em uma amostra, em detrimento aos experimentos com ciclos longos que durariam cerca de 17 dias para finalizar todos os testes.

Além disso, o referido método proporcionou processos operacionais menos complexos, menos consumo elétrico, insumos, acessórios, material de coleta (solo), dentre outros recursos. Além do mais, essa norma possibilitou a obtenção de valores de DP da camada de um pavimento através de simulações de tráfego, com carregamentos diversos em um mesmo corpo de prova.

Agradecimentos

Os agradecimentos são devidos: (i) à Petrobras pelo apoio financeiro através da Rede Temática de Asfaltos; (ii) à Universidade Federal do Ceará (UFC), através do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) e (iii) à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 6508 (1984): Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica.

ABNT. NBR 7181 (1984): Solo – Análise Granulométrica.

ABNT. NBR 7180 (1984): Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

ABNT. NBR 6459 (1984): Solo – Determinação do Limite de Liquidez.

ABNT. NBR 7182 (1984): Solo – Ensaio de Compactação.

CEN - European Committee for Standardization (2004). EN. 13286–13287 (2004): Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures. Brussels: European Standard.

DNIT (2018) Norma IE 179 /2018: Pavimentação: Solos: Determinação da deformação permanente: Instrução de Ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2016) Norma ME 172/2016: Pavimentação: Solos: Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2006). Manual de Pavimentação. 3.ed. – Rio de Janeiro, 274p. (Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Publ., 719).

GUIMARÃES, A. C. R. (2009) Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. (2015) Mecânica dos Pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Inter Ciência. ISBN: 9788571933668.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. (2015) Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. International Journal of Pavement Engineering, DOI:10.1080/10298436.2015.1065991.

Wendel Silva Cabral (wendel.cabral@ufersa.edu.br)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Unidade Acadêmica do Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharias – DENGE/ Angicos), R. Gamaliel Martins Bezerra, Angicos, Rio Grande do Norte, Brasil. 59515-000)
Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes/Laboratório de Mecânica dos Pavimentos Campus do Pici - Bloco 703 - 60455-760 Tel: +55 (85) 3366-9488 (Ramal 209) Fortaleza, Ceará

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MISTURAS AFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO COM BAIXOS TEORES DE RAP

Elane Donato Santos[2], Mario Sergio de Souza Almeida[1, 2, 4], Paulo Ricardo Lemos de Santana[2], Rhuan Vitor Lima Marques[1], Fernando Santos do Amor Divino[1], Vanessa Rebouças Santana[3], Weiner Gustavo Silva Costa[1], Acbal Rucas Andrade Achy[1]

[1]Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, [2]Universidade Estadual de Feira de Santana, [3]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [4]Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

RESUMO

A incorporação de material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) em camadas de revestimento asfáltico tem se destacado como uma alternativa para a mitigação de custos e impactos ambientais, sendo objeto de pesquisas que visam caracterizar suas propriedades quando incorporado como agregado em misturas asfálticas. Neste contexto, foi avaliado o comportamento de misturas a frio com diferentes teores de RAP (10%, 20%, 30% e 40%) e uma mistura de controle, composta por agregados virgens utilizando a metodologia Marshall. Foram conduzidos ensaios de estabilidade, resistência a tração, módulo de resiliência e fadiga, bem como a análise da estimativa de evolução da área trincada, calculada com uso da modelagem do método mecanístico-empírico brasileiro (MeDiNa). Os resultados demonstraram que a incorporação de RAP, nos teores avaliados, promoveu aumento da estabilidade e rigidez das misturas asfálticas. Quanto ao desempenho, verificou-se uma tendência de redução da área trincada com o aumento do teor de RAP ao longo do período de projeto de 10 anos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No contexto da infraestrutura rodoviária, a incorporação de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) na produção de misturas asfálticas tem se consolidado como uma solução sustentável e economicamente viável (Jain e Singh, 2021). A utilização de baixos teores desse material tem sido amplamente estudada por possibilitar a redução do consumo de agregados e ligantes virgens, ao mesmo tempo em que se procura garantir os níveis mínimos de desempenho mecânico exigidos para as camadas de revestimento (Copeland, 2011).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a compatibilização adequada entre o material reciclado e o ligante virgem pode viabilizar a sua aplicação, principalmente quando o teor de RAP é mantido em níveis moderados. Nesse sentido, Pradhan *et al.* (2023) investigaram o impacto da incorporação de 10% a 30% de RAP em misturas asfálticas, observando desempenho mecânico satisfatório com até 20% da incorporação do material. Resultados semelhantes foram observados por Ragab e El-Naga (2022), que ao compararem misturas asfálticas a frio com teores crescentes de RAP (0 a 100%), verificaram ganho progressivo de estabilidade, ainda que com aumento da fluência. Apesar do desempenho inferior em relação às misturas a quente, os autores destacam o potencial das misturas recicladas a frio para a redução do uso de ligante asfáltico e a fomentação de soluções mais sustentáveis e com menor custo.

Considerando a viabilidade técnica demonstrada pelas misturas asfálticas recicladas a frio com baixos teores de RAP, torna-se imprescindível aprofundar a caracterização mecânica desses materiais em relação ao seu módulo de resiliência e a resistência à fadiga. Essa necessidade é reforçada pela iminente consolidação do novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), que adota uma abordagem mecanístico-empírica e requer a definição desses parâmetros (Liz *et al.*, 2024; Santana *et al.*, 2025).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de misturas asfálticas a frio com teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% de RAP, por meio de ensaios de caracterização volumétrica e mecânica, de modo a obter parâmetros compatíveis com a ET-DE-P00/025 (DER-SP, 2006) e aplicáveis à simulações mecanístico-empíricas no MeDiNa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o programa experimental foram moldados corpos de prova de misturas asfálticas convencionais e recicladas a frio com baixos teores de RAP compostas por agregados virgens provenientes da pedreira de Pedra do Cavalo, localizada no município de Muritiba-BA, material fresado (RAP) oriundo de obras de restauração do pavimento da rodovia BR-101/BA e emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C) fornecida pela empresa Brasquímica LTDA. Para a caracterização dos agregados e RAP, foram realizados os ensaios em conformidade aos requisitos estabelecidos pela ET-DE-P00/025 (DER-SP, 2006).

2.1. Projeto de mistura asfáltica e ensaios de caracterização

A metodologia para a moldagem dos corpos de prova teve início com o ajuste da composição granulométrica dos agregados de modo a atender à Faixa VII da especificação ET-DE-P00/025 (DER-SP, 2006). A estimativa do teor ótimo de ligante foi realizada pelo método da superfície específica de Vogt, utilizando dados granulométricos dos materiais. As massas dos componentes foram calculadas para a produção de amostras de 1200 g, considerando o teor de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) residual da emulsão. O fracionamento dos agregados seguiu o DNER 107 ME (DNER, 1994), com energia de compactação de 50 golpes. O teor de ligante asfáltico residual presente no RAP foi determinado pelo método Rotarex, obtendo-se o valor de 5,03%. A estimativa do teor ótimo de ligante das misturas asfálticas foi realizada pelo método da superfície específica de Vogt, utilizando dados granulométricos dos materiais. Foram avaliados teores de CAP residual de 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 e 6,0% nas misturas de controle e recicladas. Com base na análise comparativa dos resultados, estabeleceu-se 4,0% como teor ótimo de CAP residual, adotado em todas as composições, de forma a garantir conformidade com os critérios da ET-DE-P00/025 (DER-SP, 2006), otimização do consumo de CAP e adequada comparabilidade entre os diferentes teores de RAP.

A caracterização das misturas asfálticas foi realizada seguindo as normas do DNIT para garantir parâmetros volumétricos, mecânicos e de durabilidade adequados. Inicialmente, avaliou-se os resultados volumétricos (densidades e volume de vazios) conforme DNIT 427 ME (DNIT, 2020) e DNIT 428 ME (DNIT, 2020). Em seguida, procedeu-se ao ensaio de estabilidade e fluência Marshall de acordo com a norma DNIT 447 ME (DNIT, 2024), obtendo-se os valores máximos de carga e deformação. Para quantificar a resistência à tração por compressão diametral, utilizou-se o DNIT 136 ME (DNIT, 2018), enquanto o módulo de resiliência (MR) foi determinado conforme o DNIT 135 ME (DNIT, 2018). O comportamento das misturas quanto a fadiga foi avaliada por meio da metodologia estabelecida no DNIT 183 ME (DNIT, 2018), visando aferir a vida útil frente ao carregamento repetido. Esse protocolo sequencial atende às exigências estabelecidas na especificação ET-DE-P00/025 (DER-SP, 2006) e fornece dados essenciais para o dimensionamento mecanístico-empírico previsto no MeDiNa, contribuindo para uma avaliação mais precisa do desempenho estrutural da mistura ao longo do tempo.

2.2. Avaliação da performance ao longo prazo das misturas asfálticas

A avaliação do desempenho das diferentes misturas asfálticas foi realizada com base na estimativa da performance de um pavimento de referência (Figura 1), compatível com o uso de revestimento asfáltico a frio e projetado para condições de baixo volume de tráfego no Brasil, correspondente a um número N (USACE) de 3×10^6 ao longo de uma vida de projeto de 10 anos. No pavimento de referência, as camadas de base e sub-base foram compostas por brita graduada simples (BGS), convencionalmente utilizados em obras, adotando-se um MR de 300 MPa sobre um subleito com MR de 100 MPa. Para a modelagem, foram utilizados coeficientes de Poisson de 0,30 para a camada de rolamento, 0,35 para as camadas de base e sub-base, e 0,40 para o subleito, sugeridos na IP-DE-P00/001 (DER-SP, 2024). A metodologia adotada para avaliação do desempenho das misturas consistiu na simulação individual de cada uma delas como revestimento asfáltico do pavimento de referência (Figura 1), utilizando-se a modelagem do método MeDiNa.

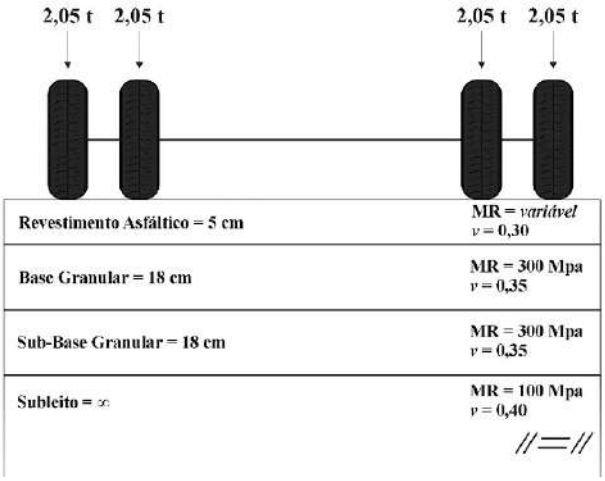


Figura 1: Pavimento de referência

O primeiro passo consistiu no cálculo do dano médio ($D_{médio}$), definido em função da deformação de tração (ε_t). Para tanto, considerou-se uma malha distribuída em 20 pontos, sendo 10 posicionados na fibra superior e 10 na fibra inferior do revestimento asfáltico. As deformações foram determinadas utilizando-se o programa MeDiNa, que aplica modelos de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). A partir dos valores de εt obtidos em cada ponto, foi possível calcular o número de solicitações admissíveis do revestimento asfáltico, empregando-se a curva de fadiga da respectiva mistura, caracterizada em laboratório pelos parâmetros k_1 e k_2 (Equação 1), aplicando- se os resultados na Equação 2. Na sequência, utilizando-se a Equação 3, foi determinado o fator de deslocamento, ou *shift factor* (f_s), seguido do cálculo do N ajustado (N') com base nas Equações 3 e 4, respectivamente. Por fim, foi considerada a função sigmoidal do MeDiNa (Z= 0,25 e n=5), para calcular os parâmetros A (Equação 5) e B (Equação 6), permitindo assim a estimativa da evolução da área trincada usando a Equação 7. Com os resultados dessa análise mecanístico-empírica, foi possível comparar o desempenho das diferentes misturas em termos da área trincada acumulado no final da vida útil de 10 anos.

$$N_{ef} = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k2} \quad (1)$$

$$D_{médio} = \frac{1}{20}\sum \frac{1}{N_{ef}} \quad (2)$$

$$fs = 1993{,}7.\left(D_{médio}\right)^{0{,}3737} \quad (3)$$

$$N^{'} = \mathrm{N}.fs.10^{-10} \quad (4)$$

$$A = \left(\frac{N^{'}-1}{Z-1}\right)^{n} \quad (5)$$

$$B = \left(\frac{-1}{Z-1}\right)^{n} \quad (6)$$

$$AT = \frac{e^{-A}-e^{-B}}{1-e^{-B}} \quad (7)$$

Onde:
N_{ef} é o número de solicitações admissíveis determinada com base na curva de fadiga obtida em laboratório;
k_1 e k_2 são parâmetros de ajuste da curva de fadiga;
$D_{médio}$ é o dano a que uma determinada camada asfáltica estará submetida;
fs é o fator campo-laboratório (*shift fator*) ou função de transferência;
N' é o número equivalente ajustado;
Z e n são parâmetros de ajuste da função sigmoidal (Z = 0,25 e n = 5);
AT é a área trincada estimada (%).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Comportamento mecânico preliminar das misturas

A Tabela 1 apresenta os resultados de densidade aparente (Gmb), densidade máxima medida (Gmm), volume de vazios (Vv), estabilidade (EST), fluência, resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR) das misturas de controle e recicladas, considerando um teor de 4,0% de CAP residual.

Tabela 1: Resultados da Dosagem Marshall da mistura controle e das misturas recicladas

Parâmetro	Controle	10% RAP	20% RAP	30% RAP	40% RAP
Gmb	2,075	2,012	1,990	1,980	1,955
Gmm	2,698	2,637	2,598	2,555	2,305
Vv (%)	23,1	23,7	23,4	22,5	15,2
EST (kgf)	235,00	373,33	438,33	555,00	511,67
Fluência (mm)	2,47	2,72	3,17	3,77	2,68
RT (MPa)	0,101	0,109	0,136	0,138	0,139
MR (MPa)	502,35	580,85	636,56	656,86	807,17

Nos parâmetros volumétricos, observou-se uma tendência de redução nos valores de densidade aparente (Gmb) e densidade máxima medida (Gmm), o que resultou, consequentemente, em uma diminuição no volume de vazios (Vv) com o aumento dos teores de RAP nas misturas. Conforme apresentado na Tabela 1, houve um aumento na estabilidade das misturas recicladas em comparação à mistura controle. Quanto à fluência, verificou-se que a presença do RAP proporcionou um crescimento do parâmetro, fazendo com que os corpos de prova sofressem maiores deformações. Em relação à resistência à tração e ao módulo de resiliência, o acréscimo dos teores de RAP foi acompanhado por um aumento da rigidez das misturas. Esses comportamentos estão em conformidade com os resultados obtidos por Ragab e El-Naga (2022) e Pradhan *et al.* (2023).

3.2. Evolução da Área trincada ao longo prazo das misturas asfálticas

Com base no pavimento de referência (Figura 1) e nos dados de caracterização mecânica das misturas asfálticas, bem como nos parâmetros k_1 e k_2 da curva de fadiga do revestimento asfáltico (Tabela 2), foi possível aplicar a modelagem mecanístico-empírica do método MeDiNa para estimar a evolução da área trincada (AT) ao longo do tempo (Figura 2), considerando cada uma das misturas asfálticas a frio avaliadas neste estudo.

Os resultados indicam uma tendência de redução da área trincada com o aumento dos teores de RAP. Esse comportamento pode estar relacionado à boa adesão entre o ligante remanescente do RAP e o ligante virgem adicionado, contribuindo para uma maior aderência ligante/agregado e menor suscetibilidade à fadiga. A Figura 2 indica que a mistura controle atingiu o limite máximo adotado no MeDiNa de 30% de trincamento por fadiga após, aproximadamente, 8 anos em serviço. As misturas com 10% e 40% de RAP apresentaram comportamentos semelhantes, sem ganhos significativos no desempenho estrutural ao longo de 10 anos. Em contrapartida, as misturas contendo 20% e 30% de RAP demonstraram desempenho adequado para aplicação como revestimento de pavimentos submetidos a um tráfego equivalente ao número N de 3×10^6.

Tabela 2: Parâmetros das curvas de fadiga das misturas asfálticas

Misturas	Curva Fadiga		
	k_1	k_2	R^2
Controle	5×10^{-7}	2,248	0,98
10% RAP	4×10^{-7}	2,286	0,91
20% RAP	6×10^{-6}	1,986	0,71
30% RAP	3×10^{-5}	1,824	0,94
40% RAP	3×10^{-7}	2,328	0,95

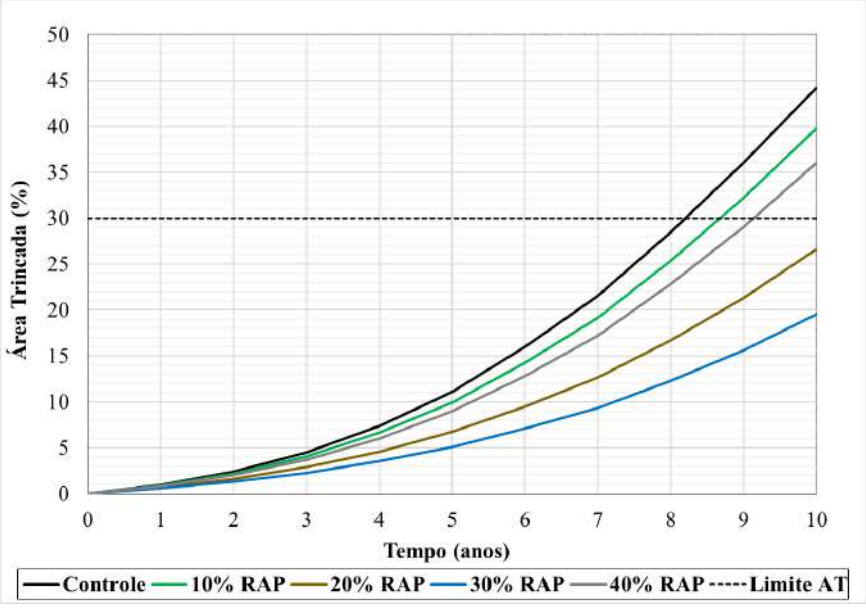


Figura 2: Evolução da AT, considerando as diferentes misturas asfálticas

4. CONCLUSÕES

Embora a modelagem do MeDiNa tenha sido calibrada para misturas à quente, seu uso pode indicar, comparativamente, tendências para avaliação do desempenho de misturas à frio como camada de revestimento. Assim, os resultados indicaram que a incorporação de RAP em misturas a frio pode ser um caminho eficiente para o aumento de reciclagem de material fresado no Brasil, sobretudo em rodovias de baixo volume de tráfego, em complementação aos esforços que vêm sendo enveredados para o aumento da utilização desse resíduo no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernucci, L. B.; L. M. G. da MOTTA; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares. (2008) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. 2. ed. Rio de Janeiro.

Copeland, L. (2011) *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA-HRT-11-021). Disponível em: https://highways.dot.gov/media/841. Acesso em: 15 jun. 2025.

DER-SP (2006) Norma DER-SP DE-P00/025/2006 – ET: Pré-misturado a frio. Especificação técnica. São Paulo. Departamento de Estradas de Rodagem.

DER-SP (2024) Norma DER-SP DE-P00/001/2024 – IP: Projeto de Pavimentação. Instrução de projeto. São Paulo. Departamento de Estradas de Rodagem.

DNER (1994) Norma DNIT 107/1994 – ME: Misturas betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT (2018) Norma DNIT 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018) Norma DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DNIT (2018) Norma DNIT 183/2018– ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DNIT (2020) Norma DNIT 427/2020 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Brasília/DF.

DNIT (2023) Norma DNIT 428/2023 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio. Brasília/DF.

DNIT (2024) Norma DNIT 447/2024 – ME: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall. Brasília/DF.

Liz, J. V. de; B. S. Barra; A. Mikowski; G. Hughes e J. V. S. de. Melo. (2024) *National Pavement Design Method (MeDiNa) applied to rehabilitation and restoration: a literature review*. Caderno Pedagógico, v. 21, n. 5, p. e4191. DOI: 10.54033/cadpedv21n5-209.

Pradhan, S. K.; U. Das e A. R. Patra. (2023) *Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in HMA mixtures for flexible pavement construction*. Materials Today: Proceedings, [S.l.], v. 2023-April. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.464.

Ragab, M. e El-naga, I. (2022) *Performance assessment of cold asphalt concrete mixtures containing recycled paving materials*. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 47, p. 4351-4360. DOI: https://doi.org/10.1007/s13369-021-06101-9.

Santana, V. R.; M. S. de S. Almeida; M. do S. C. S. Mateus; W. G. S. Costa; A. R. A. Achy; Í. M. M. Pereira; P. R. L. de Santana. (2025) *Accuracy of the Brazilian mechanistic-empirical method in the analysis of asphalt pavements from two experimental sections*. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 18, n. 2, p. e15741. DOI: 10.55905/revconv.18n.2-342.

Elane Donato Santos (elanedonato.eng@gmail.com)
Paulo Ricardo Lemos de Santana (lemossp.eng@gmail.com)
Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, Novo Horizonte, Feira de Santana, BA, Brasil.
Vanessa Rebouças Santana (vanessareboucas@alunos.utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, PR, Brasil.
Rhuan Vitor Lima Marques (rhuan.vitor@aluno.ufrb.edu.br)
Fernando Santos do Amor Divino (fernandodivino@aluno.ufrb.edu.br)
Weiner Gustavo Silva Costa (weiner@ufrb.edu.br)
Acbal Rucas Andrade Achy (acbal@ufrb.edu.br)
Mario Sergio de Souza Almeida (mario.almeida@ufrb.edu.br)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - Rua Rui Barbosa, 710, Centro, Cruz das Almas, BA, Brasil.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA DEFLEXÃO VISCOELÁSTICA DE UM REVESTIMENTO ASFÁTICO SOB A AÇÃO DO TRÁFEGO E DA TEMPERATURA

Felipe Pulheis Rodrigues, Albert Willian Faria, Paulo Roberto Garcia
Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

RESUMO
Este estudo analisa a sensibilidade da deflexão vertical em pavimentos asfálticos sujeitos à ação do tráfego e da temperatura. O modelo numérico foi desenvolvido no ANSYS-APDL, considerando um sistema multicamadas com revestimento viscoelástico (modelado por série de Prony) e camadas inferiores elásticas lineares. A dependência térmica foi introduzida por meio da equação de Arrhenius modificada. Foram aplicadas nove pressões distintas em pulsos semi-senoidais, simulando a carga de tráfego. A análise de sensibilidade foi conduzida por meio da Simulação de Monte Carlo com 1000 amostras e 10 parâmetros de entrada com diferentes distribuições estatísticas. A resposta do sistema foi avaliada pelo deslocamento vertical máximo durante a aplicação da carga. O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para quantificar a influência de cada parâmetro. Os resultados evidenciam os fatores mais relevantes no desempenho estrutural, destacando a influência da pressão aplicada, da temperatura de referência e das propriedades mecânicas das camadas. O estudo fornece subsídios para projetos mais robustos e confiáveis, considerando as incertezas associadas ao comportamento mecânico e térmico de pavimentos asfálticos.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por infraestrutura viária durável, segura e eficiente impõe desafios técnicos quanto ao desempenho estrutural dos pavimentos asfálticos frente a condições ambientais adversas e tráfego crescente. Entre os diversos fatores que influenciam o comportamento mecânico desses sistemas, destacam-se a temperatura e a magnitude das cargas aplicadas. Tais variáveis afetam diretamente as propriedades viscoelásticas dos materiais betuminosos, cuja resposta tempo-dependente demanda modelos avançados para sua representação realista. Pode-se citar vários trabalhos sobre essa temática, tais como Silva (2009), Yuan et al. (2014), Faria e Garcia (2024a; 2024b) e Rodrigues e Faria (2024).

O uso de modelos viscoelásticos no domínio do tempo, como a série de Prony, tem se mostrado eficaz na representação do módulo de relaxação dos ligantes asfálticos (HUANG, 2004). Além disso, a dependência térmica desses materiais pode ser incorporada por meio de equações empíricas, como a de Arrhenius, amplamente empregada na literatura para prever o comportamento reológico em diferentes temperaturas (HUANG, 2004).

Considerando as incertezas naturais dos parâmetros de entrada, métodos de análise probabilística, como a Simulação de Monte Carlo, são essenciais para quantificar a variabilidade das respostas estruturais e identificar os fatores de maior influência. A análise de sensibilidade, por sua vez, permite avaliar a relevância relativa de cada variável sobre o desempenho do pavimento, contribuindo para projetos mais robustos e confiáveis (FREY e PATIL, 2002; FREY et al., 2004).

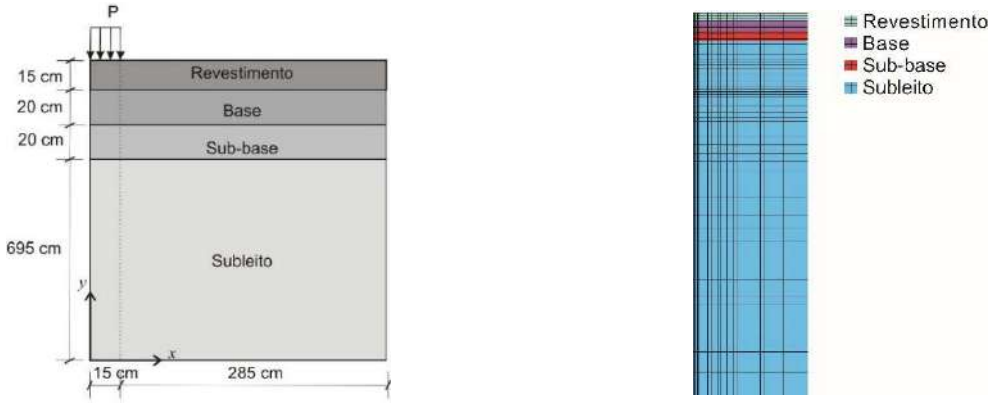
Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar a sensibilidade da deflexão vertical de um revestimento asfáltico viscoelástico, modelado no ambiente ANSYS-APDL, sob diferentes condições de carga e temperatura. Utiliza-se a equação de Arrhenius para ajuste térmico e a série de Prony para modelagem do comportamento viscoelástico, com avaliação probabilística das respostas via Simulação de Monte Carlo e análise de sensibilidade por coeficiente de correlação de Pearson.

2. METODOLOGIA

O pavimento analisado, proposto por Portela (2011), foi modelado no ANSYS-APDL como um sistema multicamadas, conforme ilustrado na Figura 1(a), composto por quatro estratos: revestimento, base, sub-base e subleito, de espessuras iguais respectivamente iguais a 15, 20, 20 e 695 cm. O revestimento foi considerado viscoelástico, com modulo de relaxação $E(t)$, enquanto as demais camadas elástico lineares, com módulo de Young (E): 500 MPa, 200 MPa e 100 MPa, respectivamente. O coeficiente de Poisson (ν) é igual a 0,35 para o revestimento e 0,40 para as demais camadas.

A carga distribuída P do tráfego foi aplicada em uma área circular de raio r de 15 cm e variou segundo um pulso semi-senoidal de duração t_p. A duração do pulso de carga está relacionada à velocidade do veículo V (km/h) pela equação de Brown (1973), *apud* Evangelista Junior (2006):

$$\log(t_p) = 0{,}2\,(1 - 4{,}7 \times \log(V)) \quad (1)$$



(a) (b)

Figura 1: Geometria, propriedades mecânicas dos materiais e posição do carregamento aplicado (a), malha de elementos finitos do modelo (b).

A partir da equação (1), para t_p = 0,1s, obtém-se a velocidade aproximada de 7 km/h, adotada na simulação deste estudo. Foi aplicada a pressão *P* igual a 440,77 kPa, aplicada na região x = 0 a 15 cm (Figura 1a).
No estudo de Portela (2011), utilizou-se uma mistura asfáltica produzida na Universidade Federal do Ceará, composta por um ligante asfáltico PG 70-22 com teor de 5,7% e agregado de granito comum no Ceará. Os parâmetros da série de *Prony* e o módulo de relaxação $E(t)$ dessa mistura, obtidos a 25°C, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Série de *Prony* da mistura asfáltica PG 70-22 à 25°C (Portela, 2011)

Termo	E(Pa)	ρ_i (s)	Termo	E(Pa)	ρ_i (s)
∞	8.45E+08	-	5	2.89E+09	2.00E-01
1	-1.53E+09	2.00E-05	6	1.78E+09	2.00E+00
2	5.04E+09	2.00E-04	7	6.13E+06	2.00E+01
3	4.86E+09	2.00E-03	8	-6.80E+04	2.00E+02
4	4.28E+09	2.00E-02	-	-	-

No *software* ANSYS-APDL, foi utilizado o elemento quadrático plano Plane182, formado por quatro nós e dois graus de liberdade por nó (translações horizontal e vertical, u e v). As condições de contorno, conforme sistema de eixos da Figura 1(a), são: impedimento dos deslocamentos u em x = 0 e x = 300 cm, e dos deslocamentos u e v em y = 0, sendo y o eixo de simetria.
O modelo 2D, mostrado na Figura 1(b), possui 11.766 graus de liberdade e adota o Estado Plano de Deformação (espessura unitária e deformações planas), sendo modelado considerando apenas a metade da estrutura.
A viscoelasticidade do material betuminoso do revestimento asfáltico foi representada no domínio do tempo por meio de uma série de *Prony*, expressando o módulo de relaxação $E(t)$ como a soma de termos exponenciais decrescentes (CHRISTENSEN, 2010):

$$E(t) = E_0\left(\alpha_\infty + \sum_{i=1}^{n_i} \alpha_i e^{\left(-\frac{t}{\rho_i}\right)}\right) = E_\infty + \sum_{i=1}^{n_i} E_i e^{\left(-\frac{t}{\rho_i}\right)} \quad (2)$$

em que E_0 é o módulo de relaxação inicial, α_i e α_∞ são coeficientes da série *Prony* ($\alpha_i = E_i/E_0$), e ρ_i representa os tempos de relaxação associados a cada termo i.
Para incorporar os efeitos da temperatura, os tempos de relaxação ρ_i foram ajustados nesse trabalho por um fator de deslocamento térmico $\alpha(T)$, definido pela equação de Arrhenius (CHRISTENSEN, 2010):

$$\log \alpha(T) = \log \alpha_T = C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \quad (3)$$

onde C é uma constante empírica, T e T_{ref} são respectivamente a temperatura absoluta de interesse e a de

referência (adotada nesse trabalho de 25°C). Assim, $\rho_i(T)=\alpha(T)\cdot\rho_i(T_{ref})$, possibilitando a modelagem do comportamento viscoelástico em diferentes condições térmicas sem necessidade de alterar os coeficientes α_i apresentados na Equação (2).

Nesse trabalho, as incertezas inerentes às variáveis de projeto do pavimento são incluídas no MEF por meio da simulação de Monte Carlo (SMC). A SMC envolve a definição de funções de densidade de probabilidade, técnicas de amostragem (empregando o Hipercubo Latino nesse trabalho) e geração de número aleatórios.

Além consideração das incertezas nas variáveis de entrada, uma etapa importante do projeto é identificar os parâmetros de entrada mais influentes nas respostas térmicas e/ou mecânicas do pavimento, por meio da análise de sensibilidade. Neste trabalho, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, que mede a relação linear entre variáveis de entrada e saída (sendo -1 uma correlação dita negativa, 1 positiva e 0 indicando a falta de correlação), definito por Frey e Patil (2002):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})\,(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\,(y_i - \bar{y})^2}} \tag{4}$$

em que n é o tamanho da amostra, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são médias das variáveis aleatórias X e Y, respectivamente.

As equações (2) e (3), referentes à modelagem do material viscoelástico e ao ajuste térmico via Arrhenius, foram implementadas por meio de *scripts* no ANSYS-APDL. A análise da sensibilidade foi realizada no *software* MATLAB, visto que versões recentes do ANSYS não incluem essa funcionalidade.

Foram utilizadas 1000 amostras na simulação de Monte Carlo. A cada amostragem, os parâmetros de entrada do modelo MEF foram modificados, e os resultados obtidos (parâmetro de saída) exportados para o MATLAB, onde foi aplicada a Eq. (4).

Como parâmetros de entrada foram considerados: as espessuras do revestimento asfáltico (e_r), da base (e_b), da sub-base (e_{sb}) e do subleito (e_{sl}); o módulo de relaxação inicial do revestimento (E_r); os módulos de elasticidade da base (E_b), da sub-base (E_{sb}) e do subleito (E_{sl}); a temperatura de trabalho (T_{ref}) e a pressão aplicada (P), totalizando 10 variáveis de entrada. Como variáveis de saída, adotou-se o máximo deslocamento vertical (v) e a deformação máxima de tração (ε_t) que ocorrem na camada do revestimento, no instante $t = t_p/2$= 0,05 s, quando a carga atinge sua máxima intensidade.

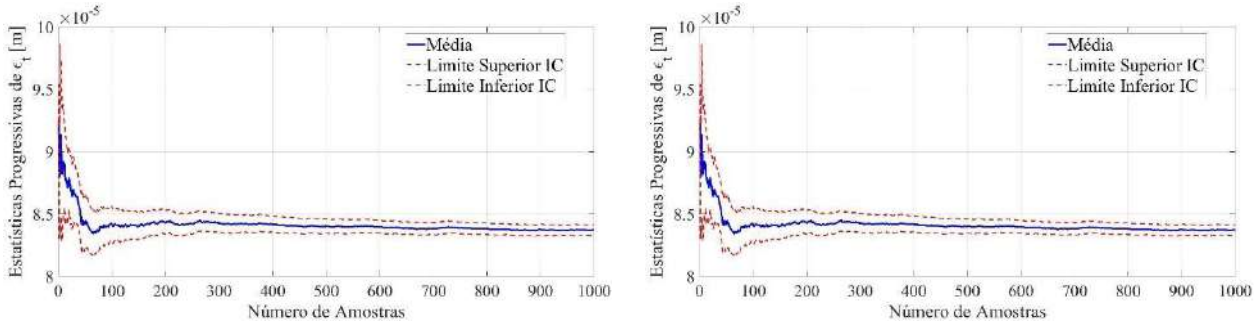
Assumiu-se que e_r, e_b, e_{sb}, e_{sl} e T_{ref} seguem distribuição uniforme com variação de ± 5% em relação ao valor médio (por exemplo, $T_{mín}$ = 0,95 T_{ref} e $T_{máx}$ = 1,05T_{ref}), enquanto os demais parâmetros mecânicos são assumidos com distribuição normal (Gaussiana), com coeficiente de variação (cv) igual a 5%.

Na simulação de Monte Carlo (SMC) foi assumido 1000 amostras empregando o método Hipercubo Latino para a amostragem, contribuiu para uma melhor exploração do espaço amostral, reduzindo a variabilidade entre as simulações e aprimorando a robustez da estimativa das respostas do modelo. Além disso, a convergência estatística dos dados é verificada, de modo a assegurar que o número de amostras adotado seja suficiente para representar o comportamento das variáveis com confiabilidade.

3. RESULTADOS

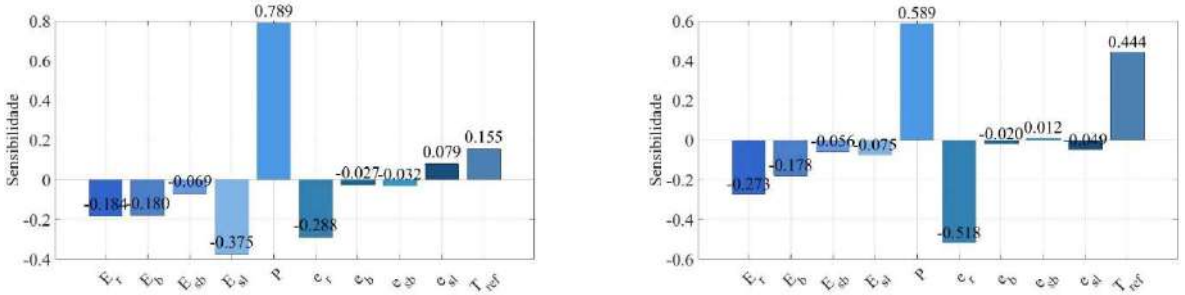
A Figura 2 apresenta a evolução das estatísticas progressivas do deslocamento vertical máximo (v), em (a), e da deformação de tração máxima (ε_t), em (b), obtidas no instante de tempo t = 0,05 s, correspondente ao pico do carregamento. Observa-se que, a partir de aproximadamente 500 amostras, tanto os valores médios quanto os intervalos de confiança se estabilizam, indicando convergência dos resultados. O deslocamento vertical médio converge para cerca de $1{,}9\times10^{-4}$ m, enquanto a deformação de tração estabiliza-se em torno de $8{,}5\times10^{-5}$. A redução do intervalo de confiança com o aumento do número de amostras reforça a eficácia da abordagem baseada em Simulação de Monte Carlo (SMC), com 1000 amostras mostrando-se suficientes para representar o comportamento estatístico das variáveis de saída com elevado grau de confiança (nível de 95%).

A Figura 3, em (a) e em (b), ilustra a sensibilidade das variáveis de entrada do modelo probabilístico em relação ao valor do deslocamento vertical médio v e em relação a deformação de tração ε_t, medido na superfície do revestimento asfáltico, no instante de tempo 0,05s, adotando um nível de significância igual a 2,5 %.



(a) (b)

Figura 2: Histórico do valor do deslocamento vertical, (a), e da deformação de tração máximos atuantes no revestimento.



(a) (b)

Figura 3: Sensibilidade das variáveis de entrada v, (a), e ε_t, (b), no instante t = 0,05 s, com um nível de significância de 2,5%.

Na Figura 3, são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída u e ε_t, indicando a sensibilidade do modelo probabilístico.

Para o deslocamento vertical v (Figura 3a), a pressão aplicada P destacou-se como a variável de maior influência positiva sobre a resposta (r = 0,789), seguida pela temperatura T_{ref}, que apresentou correlação moderada (r = 0,155). Por outro lado, os módulos de elasticidade do subleito E_{sl} (r = -0,375), do revestimento E_r (r = -0,184), da base E_b (r = -0,180), bem como a espessura do revestimento e_r (r = -0,288), exibiram correlação negativa, indicando que o aumento desses parâmetros tende a reduzir os deslocamentos verticais. As demais variáveis apresentam correlação de baixa magnitude (menor que 0,10). Já quanto à deformação de tração ε_t (Figura 3b), o parâmetro mais influente foi novamente a pressão aplicada P (r = 0,589), seguida pela temperatura T_{ref} (r = 0,444), reforçando o papel da viscoelasticidade dependente da temperatura. A espessura do revestimento e_r também apresentou correlação significativa e negativa (r = –0,518), o que indica que espessuras maiores tendem a reduzir a deformação de tração no revestimento. Os módulos E_r e E_b também apresentaram correlação negativa (r = –0,273 e –0,178, respectivamente), embora com menor intensidade.

Esses resultados demonstram que, além da carga aplicada, os parâmetros mecânicos, geométricos e térmicos do sistema têm papel fundamental na resposta estrutural do revestimento asfáltico.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo, analisou o comportamento viscoelástico de um pavimento asfáltico submetido a diferentes condições de carregamento e temperatura. A modelagem foi conduzida por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) no ambiente ANSYS-APDL, utilizando a série de Prony para representar o módulo de relaxação $E(t)$ e a equação de Arrhenius para ajustar os efeitos térmicos, possibilitando uma representação realista da dependência tempo-temperatura do revestimento asfáltico.

A abordagem probabilística, por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC), permitiu incorporar as incertezas associadas às variáveis geométricas, mecânicas e térmicas do sistema. A convergência estatística observada a partir de aproximadamente 500 amostras confirmou a eficiência da metodologia, sendo 1000 amostras suficientes para representar com confiabilidade o comportamento estatístico das respostas, com um nível de confiança de 95%.

A análise de sensibilidade estatística, baseada nos coeficientes de correlação de Pearson, revelou que a pressão

aplicada é a variável mais influente tanto para o deslocamento vertical máximo quanto para a deformação de tração máxima, reforçando a dependência direta da resposta estrutural em relação à intensidade do carregamento. A temperatura de referência também apresentou correlação positiva significativa com ambas as respostas, evidenciando a influência da temperatura na rigidez viscoelástica do material.

Em contrapartida, os módulos de elasticidade do revestimento, da base e do subleito, bem como a espessura do revestimento, apresentaram correlações negativas, indicando que o aumento dessas propriedades tende a reduzir os deslocamentos e as deformações de tração no revestimento. Entre esses, a espessura do revestimento destacou-se pela influência particularmente relevante na redução da deformação de tração, apontando seu papel estratégico no desempenho estrutural do sistema. Observou-se ainda que a temperatura exerce influência notável sobre a deformação de tração do pavimento, podendo acelerar processos de degradação, como a fadiga por carregamentos cíclicos.

Esses resultados demonstram que, além da intensidade da carga aplicada, os parâmetros mecânicos, geométricos e térmicos têm papel crucial na resposta estrutural do pavimento asfáltico. Dessa forma, a adoção de modelos viscoelásticos realistas e a consideração das incertezas nos parâmetros de entrada são essenciais para análises mais robustas e representativas, contribuindo para um dimensionamento mais confiável e durável de pavimentos flexíveis.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica pelo financiamento da bolsa de iniciação cientifica PIBITI-CNPq. Agradeço também à Jasfalto pelo apoio que viabilizou a participação no congresso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bai, T.; Huang, X.; Xu, W. (2018) Application of the Arrhenius model in asphalt rheological analysis under variable temperatures. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 548–555.

Beck, A. T. (2019) *Introdução à análise estrutural estocástica aplicada à engenharia civil.* São Paulo: Editora Blucher.

Brown, S. F. (1973) Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1973/431/431-004.pdf. Acesso em: 2 jun. 2025.

Christensen, R. M. (2010) *Theory of viscoelasticity*. (2nd ed.). Mineola, NY: Dover Publications, 384 p.

Evangelista Jr., F. (2006) Análise Quase-estática e dinâmica de pavimentos asfálticos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4887. Acesso em: 2 jun. 2025.

Faria, A. W. e Garcia, P. R. (2024) Análises probabilística e de sensibilidade aplicadas ao estudo de um pavimento asfáltico com revestimento modelado via série de Prony. *E&S – Engineering and Science*, v. 13, n. 1, p. 2–5. DOI: 10.18607/ES20241316683.

Faria, A. W.; Garcia, P. R. (2023) Estudo numérico de um pavimento de concreto asfáltico considerando revestimento viscoelástico ou elástico-linear. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 15, n. 1, p. 1-12. Disponível em: https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/22406. Acesso em: 2 jun. 2025.

Fernandes, J. L. M.; Gomes, L. M. e Carvalho, R. L. (2004) Comportamento viscoelástico de misturas asfálticas: formulação, ensaios e modelagem. *Transportes*, v. 12, n. 2, p. 29–38.

Frey, H. C.; Patil, S. R. (2002) Identification and review of sensitivity analysis methods. *Risk Analysis*, v. 22, n. 3, p. 553–578. DOI: 10.1111/0272-4332.00039.

Huang, Y. H. (2004) *Pavement analysis and design.* (2nd ed.). New Jersey: Pearson Education.

Portela, E. L. (2011) Análise viscoelástica de materiais asfálticos considerando os efeitos da temperatura e do dano. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/3682. Acesso em: 2 jun. 2025.

Rodrigues, F. P. e Faria, A. W. (2024) Modelagem 3D por elementos finitos de um corpo de prova betuminoso considerando o efeito viscoelástico aproximado via série de Prony. In. Anais do XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (Uberaba, MG). Rio de Janeiro: CREEM, v. 14, n. 1, p. 2–4. DOI: 10.26678/ABCM.CREEM2024.CRE2024-0071.

Silva, H. N. (2009) Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: operacionalização computacional e análise pelo método dos elementos finitos. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Felipe Pulheis Rodrigues (felipepulheis@hotmail.com)
Albert Willian Faria (albert.faria@uftm.edu.br)
Paulo Roberto Garcia (paulo.garcia@uftm.edu.br)
Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM, Univerdecidade, Av. Randolfo Borges Júnior, 2856 - Uberaba - MG, 38064-100.

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS RECICLADAS COM USO DO *SOFTWARE FLEXPAVE* COM FOCO NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Eulália Romão Barbosa[1], **Jorge Barbosa Soares**[1], **Juceline Batista dos Santos Bastos**[2]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

RESUMO
Este artigo avaliou a resistência à deformação permanente (DP) de misturas asfálticas porosas recicladas (CPA-RAP), comparando com uma mistura de referência (CPA-REF) e uma mistura convencional (CA). Foram realizados ensaios de *Stress Sweep Rutting* (SSR) e 27 simulações no *FlexPAVE,* sob diferentes temperaturas e velocidade de tráfego, para prever o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) ao longo de 10 anos. O SSR mostrou comportamento semelhante entre as misturas CPA-REF e CPA-RAP. Quanto às simulações, a estrutura CPA_RAP apresentou comportamento superior, com ATR de 7,8 mm sob condição mais severa (33 °C e 40 km/h), contra 10,3 mm da estrutura CPA-REF. Todas as estruturas apresentaram ATR inferior a 12,5 mm, evidenciando um comportamento adequado quando à DP. Conclui-se que a incorporação de RAP contribui para o aumento da resistência à deformação permanente de estruturas com misturas asfálticas porosas, promovendo ganhos mecânicos e indicando potencial para uso sustentável em pavimentação.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As misturas asfálticas porosas, conhecidas no Brasil como Camada Porosa de Atrito (CPA), constituem um tipo de revestimento asfáltico caracterizado por uma elevada porosidade (18 a 25%) (DNER, 1999). A graduação aberta favorece a rápida drenagem da água sobre a superfície do pavimento, promovendo melhores condições de trafegabilidade sob chuva, além de contribuir para a redução do ruído gerado no contato pneu-pavimento e para o aumento da segurança viária (De Pascale *et al*., 2023).

Essas misturas são normalmente aplicadas como camadas superficiais sobre concreto asfáltico denso (Figura 1). Em Fortaleza – CE, por exemplo, a CPA tem sido aplicada como uma solução alternativa, especialmente em intervenções de reabilitação de pavimentos que, ao longo dos anos, receberam sucessivas aplicações de camadas asfálticas, sem a devida fresagem das camadas antigas (Maia *et al.,* 2019). Nesses casos, a camada drenante é aplicada sobre a superfície previamente fresada.

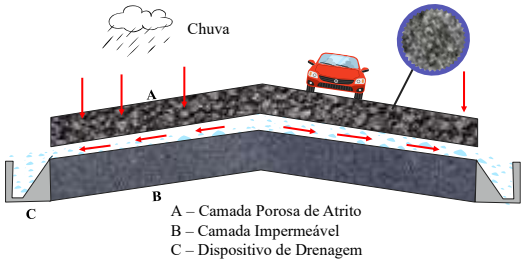


Figura 1: Esquema de funcionamento da CPA

A espessura da camada de CPA varia conforme as diretrizes técnicas de cada país. No Brasil, a especificação DNER 386/99 recomenda valores entre 30 mm e 40 mm, dependendo da faixa granulométrica adotada. Nos Estados Unidos, são comuns espessuras entre 20 mm e 25 mm, com aplicação predominantemente funcional, sem finalidade estrutural (Wang *et al*., 2014).

Embora a principal aplicação da CPA esteja associada ao desempenho funcional, estudos recentes têm apontado seu potencial para contribuir estruturalmente em sistemas de pavimentação (Alves *et al*., 2020; Barbosa *et al*., 2024). No entanto, sua estrutura porosa impõe desafios quanto à resistência mecânica, especialmente no que se refere à sua dificuldade de estabelecer um contato efetivo entre os agregados, o que torna a CPA mais susceptível à deformação permanente quando comparada às misturas densas convencionais (Putman, 2012). Além disso, a escassez de estudos que abordem suas propriedades mecânicas limita a compreensão do seu comportamento estrutural sob diferentes condições de tráfego.

Simultaneamente, cresce a demanda por soluções sustentáveis na engenharia de pavimentos, impulsionando o desenvolvimento de alternativas que combinem desempenho técnico e responsabilidade ambiental. Entre essas, destaca-se o uso do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), que permite a reciclagem de materiais

asfálticos, reduz o consumo de recursos naturais e pode melhorar o desempenho mecânico, além de diminuir os custos de produção.

Nesse contexto, esta pesquisa contribui com a avaliação comparativa da suscetibilidade à deformação permanente de duas misturas asfálticas porosas produzidas com ligante modificado por borracha. Embora esse tipo de ligante não esteja previsto na especificação ES 386 (DNER, 1999), sua utilização foi considerada devido a uma possível demanda local de uma fornecedora de asfalto-borracha, o que motivou a realização dos testes. As análises foram realizadas por meio dos ensaios *Stress Sweep Rutting* (SSR) e simulações com o *software FlexPAVE*, focando na previsão da evolução do Afundamento de Trilha de Rodas (ATR) ao longo do tempo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, foram produzidas duas misturas asfálticas porosas: uma de referência (CPA-REF) e outra reciclada com RAP (CPA-RAP), cuja composição consta na Tabela 1. A dosagem seguiu os princípios do método *Superpave*, com teor de 4,5% de asfalto-borracha (AB08). Na CPA-RAP, o teor de ligante foi ajustado com base no parâmetro *Binder Ratio* (RBR), que expressa a fração do ligante proveniente do RAP em relação ao total de ligante da mistura.

Tabela 1: Composição das misturas

Misturas	Brita 3/8" (%)	Pó de Pedra (%)	RAP (%)	Ligante (%)
CPA_REF	78,31	17,19	-	4,50
CPA_RAP	76,74	9,59	9,59	4,07+0,43 RAP

Os ensaios mecânicos incluíram o Desgaste Cântabro (DC) (DNER-ME 383/99), SSR (AASHTO TP 134, 2019) e o Módulo Dinâmico (MD) (DNIT-ME 416/2019), além da permeabilidade (NBR 13.292/2021) conforme Figura 2. A incorporação de RAP foi realizada de forma a preservar a distribuição granulométrica da mistura de referência, enquadrando-se na Faixa II da especificação ES 386 (DNER, 1999) (Figura 3).

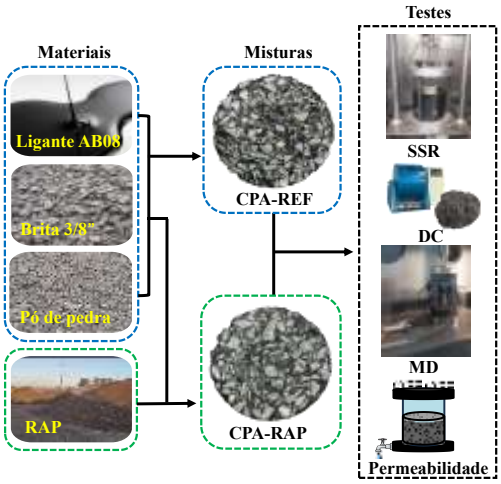


Figura 2: Fluxograma da pesquisa

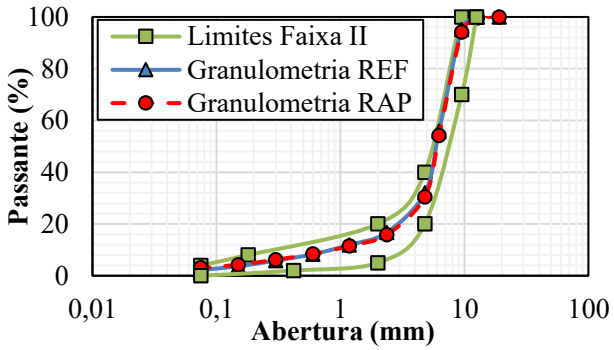


Figura 3: Composição granulométrica das misturas

A deformação permanente das misturas foi determinada seguindo as diretrizes da norma AASHTO TP 134 (2019). O ensaio foi realizado em uma UTM-25 (*Universal Testing Machine* - 25) em duas temperaturas (17 e 47 °C), sob tensão confinante constante de 69 kPa. O ensaio considera a aplicação de 600 ciclos, divididos em três blocos de 200 ciclos e três níveis de tensões verticais, cuja ordem de aplicação variou conforme a temperatura de ensaio. A 17 °C, foram aplicadas tensões na sequência de 483, 689 e 896 kPa, com tempo de carga de 0,4 s e intervalo de repouso de 1,6 s. Já a 47 °C, as tensões foram aplicadas na sequência de 689, 483 e 896 kPa, mantendo-se o tempo de carga em 0,4 s e o período de repouso em 3,6 s (Kim e Kim, 2017).

Para realizar as simulações e a previsão da evolução do ATR ao longo do tempo, foi utilizado o *software FlexPAVE* (Eslaminia *et al*., 2012). As simulações consideraram uma estrutura de pavimento típica para

aplicação da CPA, composta por camadas de um Concreto Asfáltico (CA) convencional, sobre camadas granulares, conforme ilustrado na Figura 4. Além disso, considerou-se também um cenário em que apenas uma mistura densa foi adotada como referência para fins de comparação.

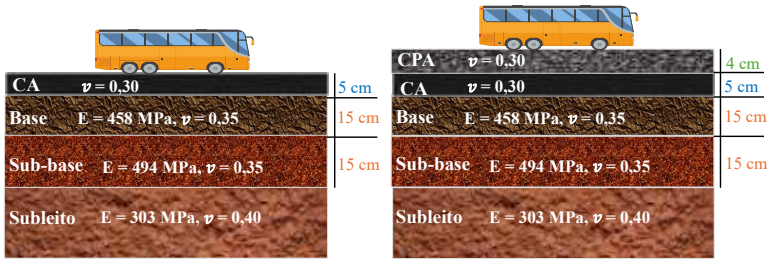


Figura 4: Estrutura considerada no dimensionamento

Para o dimensionamento, considerou-se um volume de tráfego médio (N = 5×10⁶). Foram adotadas as velocidades de 40, 60 e 80 km/h, abrangendo as faixas típicas observadas em vias urbanas e rodoviárias. As temperaturas selecionadas foram 27 °C, representativa da média climática de Fortaleza (Geografia de Fortaleza, 2025), 30 e 33 °C, que visam simular condições térmicas médias encontradas em outras cidades do Ceará. A previsão do ATR baseou-se nos coeficientes obtidos nos ensaios de MD (Barbosa *et al.,* 2024) e SSR.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foram avaliadas as propriedades funcionais e de desgaste das misturas. As permeabilidades foram de 0,0127 cm/s (CPA-REF) e 0,0143 cm/s (CPA-RAP), inferiores ao limite de 0,12 cm/s estabelecido pela ASTM D7064/2021. Contudo, a literatura aponta variação de coeficientes de permeabilidade e valores mínimos tomados como de referência (Queiroz, 2016), sendo que permeabilidade acima de 0,01 cm/s já indica boa drenabilidade em misturas asfálticas porosas (Goh e You, 2012). Em relação ao desgaste, registraram-se perdas de 62% (CPA-REF) e 46% (CPA-RAP), superiores ao limite de 25% previsto na DNER-ES 386/99, resultado associado ao elevado volume de vazios das misturas (23,8% e 23,2%, respectivamente).

3.1. Deformação Permanente (DP)

A Figura 5 exibe os resultados de deformação acumulada obtidas no ensaio de SSR. Também são apresentadas as constantes do modelo *shift model*, utilizadas como *inputs* de entrada nas simulações de dimensionamento realizadas com o *software FlexPAVE*. De modo geral, em ambas as temperaturas e ciclos analisados, as misturas apresentaram deformações semelhantes. No último ciclo de carregamento, sob a temperatura de 47 °C, os valores observados chegaram a 2,20% para CPA-REF e 2,04% para CPA-RAP. Embora essa redução não seja expressiva, estudos como o de Frota *et al.* (2022) observaram uma menor deformação ao incorporarem 15% e 30% de RAP em misturas densas, observando diminuições da ordem de 23% e de 35% para os respectivos teores de RAP. Além disso, a incorporação do ligante modificado por borracha também promove melhorias na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas (Fontes *et al*., 2010).

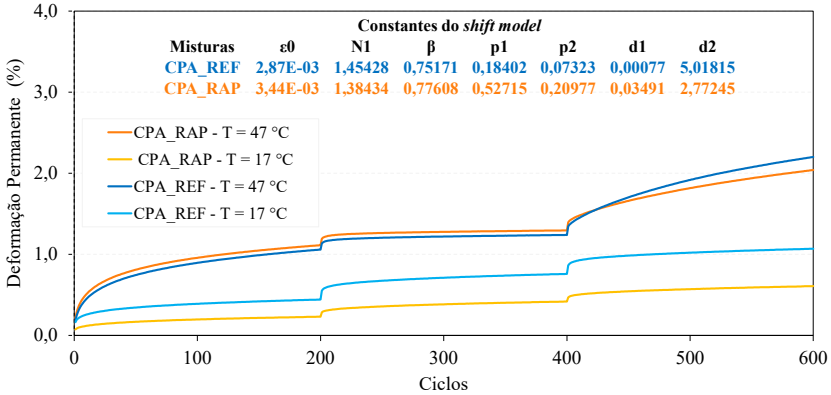
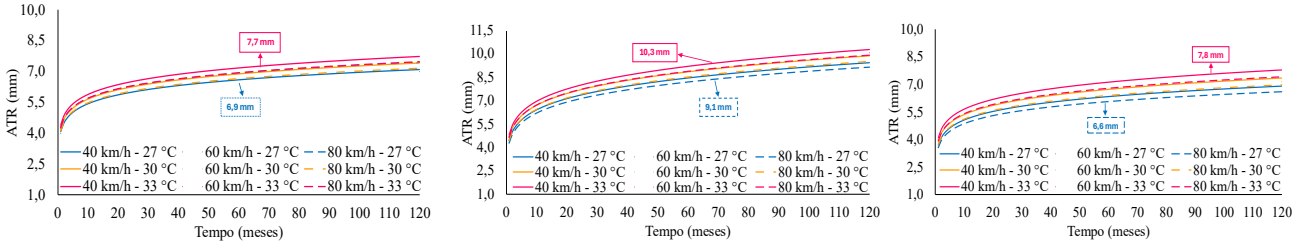


Figura 5: Deformação permanente de misturas ensaio SSR

3.2. Simulações estruturais

A Figura 6 apresenta a evolução do afundamento de trilha de roda ao longo de 10 anos para as estruturas

analisadas, considerando diferentes temperaturas (27, 30 e 33 °C) e velocidades de tráfego (40, 60 e 80 km/h). Observa-se que a estrutura CPA-RAP demonstrou comportamento superior em relação à estrutura (CPA-REF), mesmo sob condições mais severas de temperatura e carregamento (33 °C e 40 km/h), registrando um ATR de 7,8 mm, enquanto a estrutura CPA-REF atingiu 10,3 mm na mesma condição, valores 32% maiores. Além disso, verificou-se que o comportamento da estrutura CPA_RAP se assemelha ao da estrutura convencional (CA) (7,7 mm), sugerindo que a incorporação de RAP pode contribuir para o aumento da rigidez e da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas porosas, aproximando seu comportamento estrutural ao de pavimentos tradicionais, além de poder, melhorar à segurança viária (De Pascale *et al*., 2023). A menor deformação observada da estrutura CPA-RAP está associada à presença de ligante envelhecido no RAP, que tende a aumentar a rigidez da mistura, promovendo maior resistência ao esforço de cisalhamento e, consequentemente, à deformação permanente. Deformações superiores a 12,5 mm são geralmente indicativas de falha estrutural do pavimento, podendo resultar em problemas de segurança, como a ocorrência de aquaplanagem (Bastos *et al.,* 2015). Ressalta-se, contudo, que misturas do tipo CPA ainda não possuem critérios normativos específicos relacionados à resistência à deformação permanente, em razão de suas características intrínsecas, como alto volume de vazios e reduzida espessura (Wu *et al*., 2020). Apesar disso, as estruturas analisadas apresentaram valores de ATR inferiores ao limite de 12,5 mm usualmente adotado como limite. Estudos anteriores indicam que misturas CPA, após aproximadamente 4 anos de operação, podem apresentar deformações equivalentes a até 50% daquelas observadas em misturas CA (Takahashi, 2013).



(a) Estrutura do Concreto Asfáltico (CA) (b) Estrutura da CPA-REF (c) Estrutura da CPA-RAP

Figura 6: Afundamento de Trilha de roda ao longo do tempo

Observou-se, ainda, uma tendência de redução do ATR com o aumento da velocidade de carregamento, sendo que as menores deformações ocorreram aos 80 km/h, independentemente da temperatura considerada. Esse comportamento foi mais evidenciado nas estruturas do tipo CPA, indicando uma maior sensibilidade dessas composições à duração de aplicação da carga, o que pode estar associado à sua estrutura mais aberta e ao elevado volume de vazios, que tornam o comportamento mecânico mais dependente do tempo de carregamento.

4. CONCLUSÃO

Este artigo evidenciou que a incorporação de 10% de RAP também melhora a resistência à deformação permanente de estruturas com misturas asfálticas porosas com asfalto-borracha. Essa melhoria ocorreu nos ensaios laboratoriais e nas simulações computacionais (*FlexPAVE*) que indicaram menores valores de ATR para a estrutura com mistura reciclada em diferentes condições de temperatura e tráfego. Os resultados demonstraram que a presença de RAP contribui para a redução da deformabilidade das misturas ao longo do tempo, conferindo à estrutura com CPA-RAP comportamento comparável ao da estrutura com mistura convencional (CA), além do ganho em segurança viária. Além da viabilidade técnica, destacam-se os potenciais ganhos econômicos e ambientais relacionados à reciclagem de materiais. De modo geral, todas as estruturas apresentaram ATRs abaixo dos limites indicados na literatura para estruturas com CA, o que reforça o potencial estrutural das misturas CPA. Recomenda-se ainda a avaliação da suscetibilidade ao trincamento por fadiga da estrutura, a fim de ampliar a compreensão sobre a durabilidade dessas misturas. Sugere-se a realização de análises estatísticas das avaliações mecânicas e das simulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2019) TP 134-19: Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).
ASTM (2021) D 7064– 04: Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design. USA.
ABNT (2021) NBR 13292: Solo — Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga Constante. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Alves, A.; L. P. Specht.; P. H. Mareze.; D. S. Pereira e J. B. S, Bastos. (2020) Comportamento funcional e estrutural de camadas porosas de atrito aplicadas em campo. *Revista Infinity*, v. 5, n. 2, p. 146 – 174.

Barbosa, E.; L, Lira.; M. Silva Filho.; L. Babadopulos.; J. Soares.; G. Santos e J. Bastos. (2024) Mechanical Analysis through Non-Destructive Testing of Recycled Porous Friction Course Asphalt Mixture. *Buildings*, v. 14, n. 9, p. 2907–2907. Doi.org/10.3390/buildings14092907.

Bastos, J. B. S.; R. L. Borges.; J. B. Soares e L. M. G. Klinsky. (2015) Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. *Revista Transportes*, v. 23, n. 3. p. 44-55. DOI:10.14295/transportes. v23i3.914.

De Pascale, B.; P. Tataranni.; C. Lantieri.; A. Bonoli e V. Vignali. (2023) Mechanical performance and environmental assessment of porous asphalt mixtures produced with EAF steel slags and RAP aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 400, n. 12, p. 132889–132889. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132889.

DNER (1999) Norma DNER 386/1999 – ES: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – Camada Porosa de Atrito. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT (2019) Norma DNIT 416/2019 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo Dinâmico – Método De Ensaio. Rio De Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNER (383) Norma DNER 386/1999 – ME: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

Eslaminia, M.; S. Thirunavukkarasu.; M. N. Guddati e Y. R. Kim. (2012) Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. Proceedings of the 7th International RILEM Conference on Cracking in Pavements, Delft, The Netherlands.

Frota, T. M.; A. C.F. Vale.; J. B. S. Bastos e J. B. Soares. (2022) Comparação da evolução da deformação permanente de misturas asfálticas recicladas em relação a uma mistura tradicional. In Anais do 19° Rio de Transportes: 978-65-5465-010-6.

Fontes, L. P.T.L.; G. Trichês.; C. J. Pais e P. A. A. Pereira. (2010) Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 7, p. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.021.

Goh, S. W.; You, Z. (2012). Mechanical Properties of Porous Asphalt Pavement Materials with Warm Mix Asphalt and RAP. *Journal of Transportation Engineering*, *138*(1), 90–97. DOI: 10.1061/(asce)te.1943-5436.0000307.

Geografia de Fortaleza. Wikipédia, a enciclopédia livre. 2025. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Geografia_de_Fortaleza. Acesso em: 06 jul. 2025.

Kim, D.; Y. R. Kim. (2017) Development of Stress Sweep Rutting (SSR) test for permanent deformation characterization of asphalt mixture. *Construction and Building Materials,* v. 154, p. 373–383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.172.

Maia, R. S.; C. M. C. Alecrim.; V. T. F. Castelo Branco.; V. M. C. Araujo e H. S. Reis Júnior. (2019) Utilização de revestimentos drenantes do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) e de Asfalto Modificado por Polímero (AMP) como soluções para o meio urbano em Fortaleza-Ce. In Anais 33° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Balneário Camboriú-SC.

Putman, B. J. (2012) Evaluation of Open-Graded Friction Courses: Construction, Maintenance, and Performance. Report No. FHWA-SC-12-04.

Queiroz, B. O. (2016). *Avaliação do desempenho de misturas asfálticas porosas modificadas com Politereftalato de Etileno (PET)*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB. Disponível: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/9108. (acesso em 17/04/2024).

Takahashi, S. (2013) Comprehensive study on the porous asphalt effects on expressways in Japan: based on field data analysis in the last decade. *Road Materials and Pavement Design*, v. 14, n 2, p. 239-255. DOI: 10.1080/14680629.2013.779298.

Wang, Y.; Z. Leng e G. Wang. (2014) Structural contribution of open-graded friction course mixes in mechanistic–empirical pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 15, n. 8, p. 731–741. DOI: 10.1080/10298436.2013.857776.

Wu, H.; J. Yu.; W. Song.; J. Zou.; Q. Song e L. Zhou. (2020) A Critical State-of-The-Art Review of Durability and Functionality of Open Graded Friction Course Mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 237, p. 117759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117759.

Eulalia Romão Barbosa (eulalia.barbosa@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Humberto Monte, SN, Pici, Fortaleza, CE, Brasil.

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA FADIGA EM UM REVESTIMENTO ASFÁLTICO VIA MEF COM BASE NO MÓDULO DE RELAXAÇÃO

Felipe Pulheis Rodrigues, Albert Willian Faria, Paulo Roberto Garcia
Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

RESUMO
Este trabalho apresenta uma modelagem numérica, via Método dos Elementos Finitos (MEF), para análise da fadiga em pavimentos asfálticos. A estrutura multicamada foi modelada em duas dimensões (2D), considerando carregamento cíclico e comportamento viscoelástico do revestimento, representado pela série de *Prony*. A estimativa da vida útil à fadiga baseia-se no modelo empírico MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), considerando diferentes níveis representativos de tráfego. Pressões variadas são aplicadas ao revestimento asfáltico, simulando distintas condições de tráfego. Os resultados são expressos em número de ciclos de fadiga (*Nf*), em função da razão entre carga aplicada e a carga de referência do eixo padrão (*RC*). A simulação indicou que o deslocamento vertical máximo ocorre próximo ao pico de carregamento, seguido de recuperação parcial por relaxação viscoelástica. Verificou-se que cargas inferiores à referência ($RC < 0$) aumentam a vida útil à fadiga, enquanto sobrecargas ($RC > 0$) aceleram a deterioração por fadiga do revestimento.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as rodovias desempenham papel estratégico na matriz de transporte, sendo responsáveis por cerca de 60% do transporte de cargas e 90% do transporte de passageiros (Medina e Motta, 2015). No entanto, falhas estruturais nos pavimentos e a falta de manutenção geram impactos econômicos significativos.

Os revestimentos asfálticos são essenciais nesse sistema, pois suportam cargas, protegem as camadas inferiores e garantem conforto e segurança. Compostos por misturas betuminosas (agregados minerais e ligantes asfálticos), apresentam comportamento viscoelástico sensível à temperatura e à taxa de carregamento — mais rígido sob cargas rápidas e mais flexível sob cargas lentas. Essa natureza viscoelástica contribui para o surgimento de fissuras por fadiga, causadas por solicitações cíclicas ao longo do tempo.

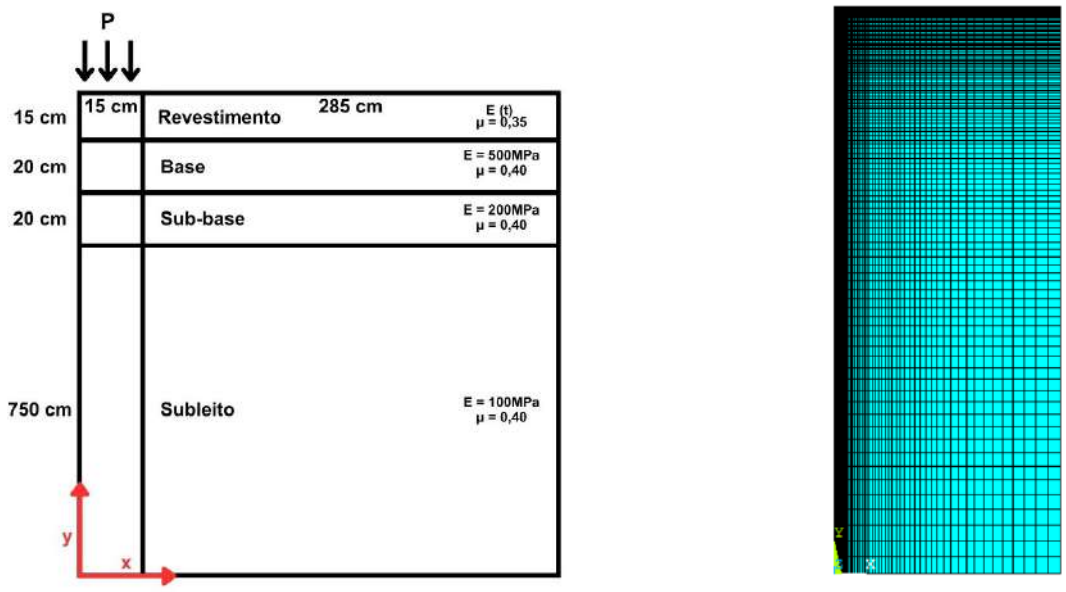
O dimensionamento de pavimentos deve considerar, entre outros fatores, as propriedades dos materiais, as condições de carregamento e ambientais, além das variações geométricas. A aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) permite simular essas variáveis e estimar com a vida útil da estrutura em diferentes cenários. Estudos como os de Mun *et al.* (2005), Faria e Garcia (2023; 2024) e de Rodrigues e Faria (2024) demonstram essa abordagem, incorporando o módulo de resiliência (MR) ou o módulo de relaxação $E(t)$ na caracterização do revestimento.

Neste contexto, este estudo realiza uma modelagem numérica bidimensional de pavimento asfáltico submetido à fadiga mecânica, desconsiderando efeitos térmicos, com foco na aplicação do módulo de relaxação $E(t)$. Diferente de abordagens tradicionais que utilizam MR ou módulo elástico estático, $E(t)$ permite captar os efeitos do tempo, temperatura e velocidade de carregamento, representando de forma mais realista o comportamento do revestimento.

Trabalhos como os de Reis (2009) e Franco (2007) abordam a fadiga, mas sem considerar $E(t)$, o que reforça a importância da abordagem aqui adotada. A utilização direta do módulo de relaxação como parâmetro mecânico representa uma contribuição metodológica relevante e ainda pouco explorada, ampliando o entendimento sobre a degradação por fadiga em pavimentos asfálticos sob carregamentos repetitivos.

2. METODOLOGIA

O pavimento analisado, proposto por Portela (2011), foi modelado no ANSYS-APDL como um sistema multicamadas com quatro estratos: revestimento, base, sub-base e subleito. O revestimento foi considerado viscoelástico, com coeficiente de Poisson constante de 0,35, e as demais camadas, elásticas lineares. As espessuras adotadas foram de 15 cm (revestimento), 20 cm (base e sub-base) e 750 cm (subleito). Os módulos de relaxação e coeficientes de Poisson para base, sub-base e subleito foram, respectivamente: 500 MPa, 200 MPa e 100 MPa, com $\nu = 0{,}40$ para todas.



(a) (b)

Figura 1: Geometria, propriedades dos materiais e posição do carregamento aplicado definido por Portela (2011), em (a), e malha de elementos finitos empregada na modelagem neste trabalho, em (b).

A carga distribuída P do tráfego é aplicada em uma área circular de raio r de 15 cm e varia segundo um pulso semi-senoidal de duração t_p. A duração do pulso de carga está relacionada a velocidade do veículo V (km/h) pela equação de Brown (1973), *apud* Evangelista Junior (2006):

$$\log(t_p) = 0{,}2\ (1 - 4{,}7 \times \log(V)) \qquad (1)$$

A partir da equação (1), para t_p = 0,1s, obtém-se a velocidade aproximada de 7 km/h, adotada na simulação deste estudo.

No estudo de Portela (2011), utilizou-se uma mistura asfáltica brasileira produzida na Universidade Federal do Ceará (UFC), composta por um ligante asfáltico PG 70-22 com teor de 5,7% e agregado de granito comum no Ceará. Os parâmetros da série de *Prony* e o módulo de relaxação E(t) dessa mistura, obtidos a 25°C, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da série de *Prony* da mistura asfáltica PG 70-22 à 25°C e experimentais da fadiga (Portela, 2011)

Termo	E(Pa)	ρ (s)	Parâmetros do modelo da fadiga	
∞	8.45E+08	-		
1	-1.53E+09	2.00E-05	k_1 =	$4{,}32 \times 10^{-3}$
2	5.04E+09	2.00E-04	k_2 =	3,291
3	4.86E+09	2.00E-03	k_3 =	0,854
4	4.28E+09	2.00E-02	V_a =	0,0400 %
5	2.89E+09	2.00E-01	V_b =	0,0532 %
6	1.78E+09	2.00E+00	M =	-0,2285
7	6.13E+06	2.00E+01		
8	-6.80E+04	2.00E+02		

No *software* ANSYS-APDL, foi utilizado o elemento quadrático plano Plane182, com dois graus de liberdade por nó (translações horizontal e vertical, *u* e *v*). As condições de contorno são: impedimento dos deslocamentos *u* em $x = 0$ e $x = 300$ cm, e dos deslocamentos *u* e *v* em $y = 0$, conforme sistema de eixos da Figura 1(a), onde *y* é o eixo de simetria.

O modelo 2D, mostrado na Figura 2, possui 11.766 graus de liberdade e adota o Estado Plano de Deformação (espessura unitária e deformações planas). Foi modelada somente apenas a metade da estrutura, conforme Figura 1(b). A malha foi definida após análise da convergência considerando o deslocamento axial máximo e

a deformação de tração máxima ε_t no revestimento asfáltico.
A viscoelasticidade do material betuminoso do revestimento asfáltico foi representada no domínio do tempo por meio de uma série de *Prony* (modelo generalizado de Maxwell), expressando o módulo de relaxação E(t) como a soma de termos exponenciais decrescentes:

$$E(t) = E_0 \left(\alpha_\infty + \sum_{i=1}^{n_i} \alpha_i e^{\left(-\frac{t}{\rho_i}\right)}\right) = E_\infty + \sum_{i=1}^{n_i} E_i e^{\left(-\frac{t}{\rho_i}\right)} \quad (2)$$

onde E_0 é o módulo de relaxação inicial, e α_i e α_∞ são coeficientes da série *Prony* ($\alpha_i = E_i/E_0$)

O modelo de fadiga adotado é o da MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) de 2004, apresentado por Garcia (2010):

$$N_f = 10^M k_1 {\varepsilon_t}^{-k_2} E^{-k_3} \quad (3)$$

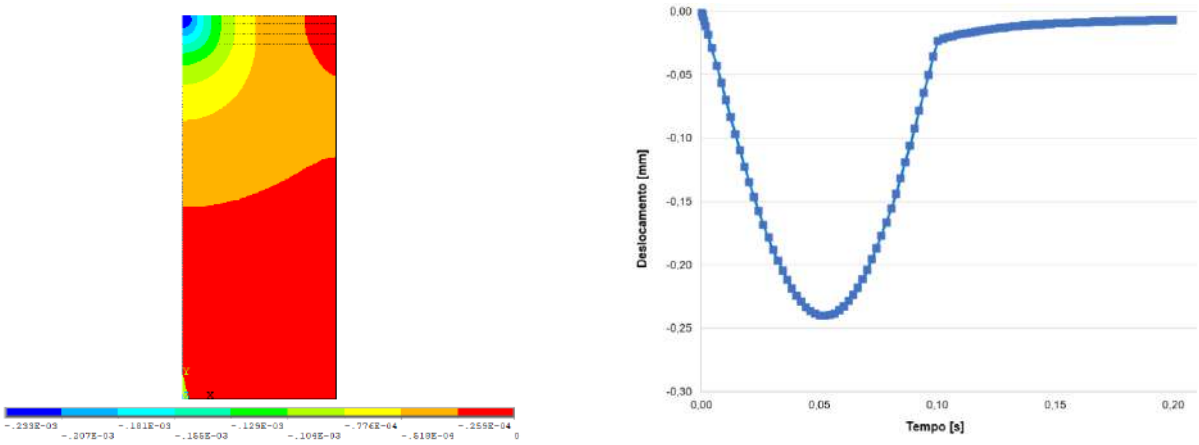
$$M = 4{,}84\left(\frac{V_b}{V_a - V_b}\right) - 0{,}69 \quad (4)$$

sendo N_f o número de repetições de carga até a falha por fadiga do revestimento asfáltico; ε_t a deformação de tração máxima atuante no revestimento, E o módulo de rigidez do material; k_1, k_2, k_3 são coeficientes experimentais; V_a e V_b representam os volumes de vazios (%) e de ligante (%), respectivamente. Os valores desses parâmetros físicos e experimentais da mistura são informados na Tabela 1.
Diferentemente do modelo tradicional da MEPDG que assume módulo constante, aqui substitui-se E por $E(t)$ avaliado no pico da carga, para incorporar os efeitos viscoelásticos e obter estimativas mais realistas da rigidez e vida útil do pavimento.
Foram aplicadas as nove pressões P: 0,44077; 0,46832; 0,49587; 0,52341; 0,55096; 0,60606; 0,66116; 0,71652; 0,77135, em MPa, na região x = 0 a 15 cm (Figura 1a). A pressão padrão de 0,55096 MPa equivale a uma carga de cerca de 39 kN, representando a atuação (carga peso) de uma roda do trem-tipo padrão.
O número de repetições de carga é calculado em função da Razão de Carga (RC), que relaciona a carga P com a carga do trem-tipo padrão (0,55096 MPa).

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos a partir da simulação numérica realizada com o modelo bidimensional no *software* ANSYS-APDL, considerando o comportamento viscoelástico do revestimento asfáltico. Em (a), observa-se o campo de deslocamentos verticais ao final da aplicação da carga, enquanto (b) mostra a variação do deslocamento vertical ao longo do tempo, no ponto correspondente à superfície do revestimento, diretamente sob a área carregada.
Na Figura 2(a), observa-se a distribuição espacial dos deslocamentos verticais no pavimento. Regiões em azul e verde indicam os maiores afundamentos, concentrados sob a área central da carga. As tonalidades quentes (amarelo a vermelho) indicam menor deformação, predominando nas camadas inferiores, onde o deslocamento é praticamente nulo. A forma concêntrica da distribuição confirma a aplicação da carga em área circular e condiz com a resposta de um meio viscoelástico em regime transitório.
A Figura 2(b) mostra a evolução temporal do deslocamento. Inicialmente, há uma rápida queda, indicando a resposta imediata do material. O deslocamento atinge o valor máximo (0,233 mm) por volta de 0,06 s. Após o pico de carga, que ocorre em torno de 0,1 s, inicia-se a fase de recuperação, evidenciando a relaxação viscoelástica do material. O deslocamento se estabiliza entre 0,18 e 0,20 s, sinalizando o equilíbrio mecânico após a dissipação parcial das tensões.
O carregamento segue a Eq. (1), variando ao longo do tempo, e está associado à velocidade do veículo. De forma geral, os resultados da Figura 2 confirmam o comportamento viscoelástico do revestimento, com deformação dependente do tempo e recuperação parcial, validando o uso da série de *Prony* para simular o

módulo de relaxação.



(a) (b)

Figura 2: (a) Campo de deslocamentos verticais, em m, obtido no tempo de máximo deslocamento vertical da simulação do modelo 2D; (b) Variação do temporal do deslocamento vertical, em mm, durante a aplicação da carga de referência P = 0,55096 MPa.

A Figura 3 ilustra a curva $N_f \times RC$ obtida considerando as diferentes cargas aplicadas a uma temperatura constante de 25 ºC e a fadiga do revestimento.

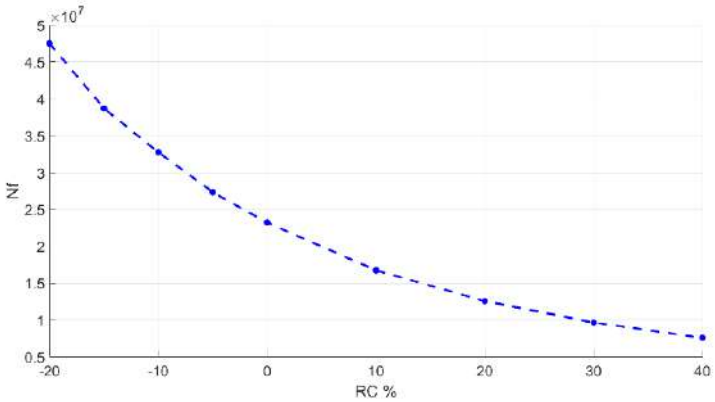


Figura 3: Repetições de carga (N_f) em função da Razão de Carga (RC), considerando fadiga do revestimento a 25°C.

A Figura 3 mostra a relação entre o número de repetições de carga até a falha por fadiga do revestimento (N_f) e a variação percentual da carga de referência (RC), considerando a temperatura constante de 25°C. Nota-se um comportamento inversamente proporcional: à medida que a RC aumenta (ou seja, cargas superiores à carga padrão), o número de repetições até a falha diminui de forma acentuada. Esse resultado destaca a sensibilidade do revestimento à sobrecarga, indicando redução na vida útil estrutural com o aumento do carregamento.
Para valores negativos de RC, que representam cargas inferiores à referência, N_f cresce significativamente, evidenciando maior durabilidade do pavimento. Esses dados reforçam a importância do controle do tráfego pesado no desempenho de pavimentos asfálticos.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo, baseado no modelo numérico adaptado de Portela (2011), avaliou o comportamento viscoelástico de um pavimento asfáltico sob diferentes condições de carregamento, com foco na resposta à fadiga. A modelagem foi realizada com o Método dos Elementos Finitos (MEF), incorporando a série de *Prony* para representar o módulo de relaxação $E(t)$, o que permitiu simular de forma mais realista o comportamento dependente do tempo do revestimento.
A carga veicular foi aplicada como um pulso semi-senoidal com duração t_p = 0,1 s, associada a uma velocidade

de tráfego de aproximadamente 7 km/h. As simulações demonstraram claramente a natureza viscoelástica do revestimento: a deformação vertical variou ao longo do tempo, com recuperação parcial após a remoção da carga, validando o uso do $E(t)$ na representação do material.

A análise de fadiga indicou que o número de repetições de carga até a falha (N_f) é inversamente proporcional à Razão de Carga (RC). Para cargas abaixo da referência ($RC < 0$), o pavimento apresentou maior vida útil, enquanto para $RC > 0$, associada a sobrecargas, a fadiga ocorreu mais rapidamente. Isso evidencia a sensibilidade do revestimento à intensidade da carga e a importância do controle de tráfego pesado.

De forma geral, o uso do módulo de relaxação $E(t)$ na modelagem do revestimento representa um avanço em relação às abordagens tradicionais baseadas em módulos elásticos constantes. A metodologia adotada permite estimativas mais precisas da resposta mecânica e da vida útil do pavimento, contribuindo para o planejamento de manutenções e para decisões mais eficazes na gestão da infraestrutura rodoviária.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica pelo financiamento da bolsa de iniciação cientifica PIBITI-CNPq, à Jasfalto e DEC-UFTM pelo apoio financeiro que viabilizou a participação no congresso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brown, S. F. (1973) Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1973/431/431-004.pdf (acesso em 02/06/2025).

Evangelista Jr., F. (2006) *Análise Quase-estática e dinâmica de pavimentos asfálticos*. Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/4887 (acesso em 02/06/2025).

Faria, A. W. e P. R. Garcia (2024) Análises probabilística e de sensibilidade aplicadas ao estudo de um pavimento asfáltico com revestimento modelado via série de Prony. *E&S - Engineering and Science*, v. 13, n. 1, p. 2–5. DOI: 0.18607/ES20241316683

Faria, A.W e P. R. Garcia. (2023) Estudo numérico de um pavimento de concreto asfáltico considerando revestimento viscoelástico ou elástico-linear. Disponível em: https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/22406 (acesso em 02/06/2025).

Franco, F. A. C. P. (2007) *Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos*. Tese (doutorado). Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em: www.coc.ufrj.br/pt/tesesde-doutorado/151-2007/1107-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco (acesso em 02/06/2025).

Garcia, F. H. (2010) Modelagem matemática dos efeitos do carregamento na degradação de pavimentos flexíveis. *Disponível* em: https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/07656d8c-d1a3-44ab-8bf8-87cb9cd9fdae (acesso em 02/06/2025).

Medina, J. e L. M. G. Motta (2015) *Mecânica dos Pavimentos.* (3ª. ed.). Rio de Janeiro: Ed. Interciência.

MEPDG (2004) National Research Council, guide for mechanistic-empirical pavement design, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (1ª ed.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation.

Mun, S.; M. N. Guddati e Y. R. Kim (2005) Continuum Damage Finite Element Modeling of Asphalt Concrete. *Journal of Civil Engineering*, v. 9, n. 3, p. 1–7. DOI: 10.1007/BF02829051

Portela, E. L. (2011) *Análise viscoelástica de materiais asfálticos considerando os efeitos da temperatura e do dano*. Dissertação (pós-Graduação). Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/3682 (acesso em 02/06/2025).

Reis, N. F. S. (2009) *Análise Estrutural de Pavimentos Rodoviários: Aplicação a um Pavimento Reforçado com Malha de Aço.* Dissertação (mestrado). Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139414347/Tese%20FINAL.pdf (acesso em 02/06/2025).

Rodrigues, F. P. e A. W. Faria (2024) Modelagem 3d por elementos finitos de um corpo de prova betuminoso considerando o efeito viscoelástico aproximado via série de prony. *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, v. 14, n. 1, p. 2–4. DOI: 10.26678/ABCM.CREEM2024.CRE2024-0071

Felipe Pulheis Rodrigues (felipepulheis@hotmail.com)
Albert Willian Faria (albert.faria@uftm.edu.br)
Paulo Roberto Garcia (paulo.garcia@uftm.edu.br)
Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

CONTRIBUIÇÃO DE DIFERENTES CAMADAS NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: APLICAÇÃO DO CAP3D-D EM RODOVIAS FEDERAIS

Juceline Batista dos Santos Bastos[1], Pedro Luiz Ribeiro Rocha[2], Lucas F. de A. L. Babadopulos[2], Evandro Parente Junior[2], Beatriz Chagas Silva Gouveia[3], Jorge Barbosa Soares[2]

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), [2] Universidade Federal do Ceará (UFC), [3] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

RESUMO

Esforços significativos têm sido empreendidos para aprimorar os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. No entanto, ainda não há um método consolidado que avalie a deformação permanente (DP) de toda a estrutura. Este artigo utiliza o *software* CAP3D-D para prever a evolução da deformação permanente em todas as camadas de pavimentos asfálticos reais e indicar quais camadas mais contribuirão para o Afundamento de Trilha de Roda (ATR). O CAP3D-D prevê o ATR integrando DPs previstas em diferentes pontos das camadas do pavimento. Para materiais asfálticos, utiliza-se o *Shift model*, e para as demais o mesmo modelo usado no *software* MeDiNa. Os resultados demonstram que a contribuição das diferentes camadas para o ATR depende das características dos materiais utilizados e da espessura das camadas. Nos pavimentos analisados, a camada de revestimento asfáltico foi a principal responsável pelo ATR, concentrando até 95% da DP em pavimentos com camadas inferiores bem estruturadas.

PALAVRAS-CHAVE: Deformação permanente; Afundamento de trilha de roda; Previsão de contribuição por camada.

1. INTRODUÇÃO

A deterioração prematura dos pavimentos rodoviários no Brasil impulsionou o desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa – DNIT, 2021). Embora este software calcule parâmetros estruturais para prever defeitos como área trincada e afundamento de trilha de roda (ATR), o ATR no MeDiNa considera apenas materiais não asfálticos, limitando a avaliação da deformação permanente (DP) do revestimento (Vale *et al*., 2022). Para suprir essa limitação, desenvolveram-se ensaios específicos: o Uniaxial de Carga Repetida (DNIT, 2018b), que fornece o *Flow Number* (FN), e o *Stress Sweep Rutting* (SSR), associado ao Shift model (Kim e Kim, 2017; Vale *et al*., 2022).

O ATR resulta do acúmulo de deformações permanentes geradas pelo tráfego repetido, envolvendo processos plásticos em materiais granulares e viscoplásticos em misturas asfálticas. Para camadas granulares, utiliza-se o modelo de Guimarães (2009) com ensaios triaxiais cíclicos (DNIT, 2018a). Contudo, o MeDiNa não considera a contribuição de todas as camadas, limitando a avaliação estrutural integrada.

O presente artigo emprega uma avaliação integrada da deformação permanente utilizando o CAP3D-D, ferramenta baseada no Método dos Elementos Finitos (CAP3D – Holanda *et al*., 2006) que incorpora o modelo de Guimarães (2009) para materiais sob o revestimento e o Shift model para misturas asfálticas. A metodologia é aplicada em rodovias federais na região Nordeste do país sob diferentes condições de tráfego e composições estruturais, com o objetivo de identificar quantitativamente quais camadas mais contribuem para o ATR.

2. METODOLOGIA

Para a consecução do objetivo de investigar as contribuições das diferentes camadas na deformação permanente de pavimentos asfálticos, incluindo as misturas asfálticas, foi utilizado o *software* CAP3D-D, recentemente modificado em parceria com o DNIT. Foram analisados cenários de 4 rodovias para as quais dados dos materiais envolvidos estão disponíveis graças a uma investigação também a nível de material, com corpos de prova fabricados utilizando materiais de campo. Para os trechos e materiais investigados, foram realizadas simulações utilizando os dados constantes na Seção 2.2 (cf. Tabela 1), referentes a esses trechos, usando o método brevemente descrito na Seção 2.1.

2.1. Breve Descrição do Método de Cálculo da Deformação Permanente nas Camadas

O programa CAP3D-D (com o "-D" representando a atividade de dimensionamento de pavimentos) foi desenvolvido com base no programa de elementos finitos CAP3D (Holanda *et al*., 2006), que calcula tensões e deformações em pavimentos podendo considerar diversos efeitos (dinâmicos, viscoelásticos, não lineares, etc.). Para otimizar o dimensionamento, o CAP3D-D utiliza cálculo estrutural "equivalente" com comportamento elástico linear, considerando módulos de elasticidade correspondentes aos cenários de temperatura, velocidade e confinamento. Para misturas asfálticas, o módulo equivalente corresponde ao valor

absoluto do módulo complexo (Equações 1 e 2), enquanto para os demais materiais utiliza-se o módulo de resiliência (MR) conforme as condições de tensão nas subcamadas. As tensões e deformações calculadas alimentam a previsão de defeitos por fadiga ou deformação permanente.

$$log\ (|E^*|)\ = a + \frac{b}{1 + e^{(d + g\ log\ f_r)}} \quad (1)$$

$$f_r\ =\ f \cdot 10^{(a_1\ T^2 + a_2\ T\ +\ a_3)} \quad (2)$$

Onde $|E^*|$ é o módulo dinâmico e a, b, d, g, a_1, a_2 e a_3 são os coeficientes do ensaio de módulo complexo. No caso da evolução de ATR, a previsão das deformações permanentes nas camadas asfálticas é baseada em ensaios de carregamento repetido (SSR) e no modelo viscoplástico conhecido como *Shift model* (Kim e Kim, 2017; Vale *et al*., 2022). Este modelo é apresentado nas Equações 3 a 5 e incorpora o efeito de temperatura, tempo de carregamento e amplitude de tensão. A temperatura ao longo do revestimento é estimada a partir de modelos empíricos baseados na temperatura do ar e na profundidade (Barker *et al*., 1977; Motta, 1991), sendo os módulos das camadas ajustados conforme a temperatura média em três subdivisões da camada de revestimento. As tensões utilizadas no modelo são convertidas para tensões equivalentes de laboratório por meio dos invariantes de Perzyna (1966), assegurando a correspondência entre os estados de tensão de campo e de ensaio. Enquanto isso, para as camadas granulares e o subleito, a deformação permanente é estimada com base nos modelos ajustados aos resultados de ensaios triaxiais de carga repetida (DNIT, 2018a), segundo modelo empírico proposto por Guimarães (2009), apresentado na Equação 6. A evolução das deformações é calculada incrementalmente para cada ponto de Gauss, mês a mês, ao longo de três turnos diários. Por fim, o afundamento da superfície (trilha de roda), ou em qualquer porção de uma dada camada, é determinado pela integração das deformações permanentes acumuladas ao longo de um eixo vertical de simetria, o que é realizado numericamente por meio da Regra do Ponto Médio (Santos, 2020).

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_0 \cdot N \cdot 10^{(a_{\xi p}\ +\ a_{\sigma v})}}{\left(N_1 + N \cdot 10^{(a_{\xi p}\ +\ a_{\sigma v})}\right)^{\beta}} \quad (3)$$

$$a_{\xi p} = p_1 log\ (\xi_p) + p_2 \quad (4)$$

$$a_{\sigma v} = (d_1 T + d_2)\left[log\left(\frac{\sigma_v}{p_a}\right) - 0{,}877\right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_p(\%) = k_1 \left(\frac{\sigma_c}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3} N^{k_4} \quad (6)$$

Onde ε_{vp} é a deformação viscoplástica, ε_0, N_1, β, p_1, p_2, d_1 e d_2 são os coeficientes do *Shift model*, ε_p é a deformação permanente e k_1, k_2, k_3 e k_4 são os coeficientes do modelo de Guimarães.

2.2. Características dos Materiais e das Estruturas Investigadas

As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros utilizados na modelagem das estruturas de pavimento das rodovias federais. A Tabela 1 reúne os dados das camadas de concreto asfáltico, incluindo espessura (h), coeficiente de Poisson (ν), coeficientes do modelo de módulo dinâmico (a, b, d, g, a_1, a_2, a_3), além dos parâmetros viscoplásticos usados na estimativa da deformação permanente (ε_0, N_1, β, p_1, p_2, d_1, d_2) e do FN.

Tabela 1: Concreto asfáltico – Estrutura, ν, coeficientes do módulo dinâmico e do *Shift model*, além do FN

BR/Material	h (cm)	ν	a	b	d	g	a_1	a_2	a_3
A/Capa	5	0,30	1,432	3,0138	-1,0988	-0,6243	0,0010	-0,1758	3,2708
A/Binder	6		1,223	3.2911	-1,3309	-0,6040	0,0009	-0,175	3,2644
B/Capa	12,5		1,3148	3,1272	-0,9838	-0,5223	0,0010	-0,1737	3,1766
C/Capa	5		1,337	3,194	-1,493	-0,581	0,0009	-0,172	3,243
C/Binder	10		1,245	3,338	-1,757	-0,554	0,0008	-0,170	3,170
D/Capa	5/7/15		-1,023	5,561	-1,757	-0,426	0,0009	-0,173	3,482

BR/Material	FN	ε_0	N_1	β	p_1	p_2	d_1	d_2
A/Capa	69	0,0047	0,5844	0,6971	0,6500	0,2586	0,0661	1,4957
A/Binder	105	0,0040	0,6804	0,8115	0,6251	0,2488	0,0403	2,1470
B/Capa	271	0,0032	0,4422	0,7132	0,5031	0,2002	0,0431	2,3293
C/Capa	2649	0,0024	0,1111	0,7729	0,5777	0,2299	-0,0560	6,2664
C/Binder	2680	0,0022	0,8086	0,76498	0,46061	0,1833	-0,0191	4,4598
D/Capa	798	0,0027	0,6293	0,7768	0,2026	0,0806	-0,0142	4,5571

A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos materiais sob o revestimento, com destaque para espessura, MR e coeficientes do modelo de Guimarães (k_1–k_4). As rodovias BR-A e BR-B incluem bases estabilizadas, com MRs superiores a 750 MPa e baixos valores de k_2, o que indica baixa suscetibilidade ao estado de tensões. Em contraste, as estruturas da BR-C e BR-D possuem camadas granulares com menores MRs.

Tabela 2: Materiais sob revestimento – Estrutura, ν, MR, e coeficientes do modelo de Guimarães

Estrutura sob revestimento	Material	h (cm)	ν	MR (MPa)	k_1	k_2	k_3	k_4
a) BR-A								
Base	Solo-brita-cimento	15	0,35	753	$3{,}00\times10^{-2}$	0,150	0	0
Sub-base	Solo	15	0,35	207	$1{,}60\times10^{-2}$	-0,487	1,633	0,142
Subleito	Solo	-	0,40	498	$3{,}20\times10^{-2}$	-0,988	2,799	0,102
a) BR-B								
Base	Solo-cimento	20	0,20	1015	$7{,}60\times10^{-3}$	-0,650	0,944	0,113
Sub-base	Solo	15	0,35	396	$7{,}96\times10^{-4}$	-0,973	1,949	0,136
Subleito	Solo	-	0,40	403	$1{,}17\times10^{-2}$	-0,3778	0,4316	0,2697
b) BR-C								
Base	Solo	20	0,35	703	$3{,}40\times10^{-3}$	-3,06	1,55	0,23
Sub-base	Solo	20	0,35	517	$6{,}80\times10^{-3}$	0,44	0,55	0,27
Subleito	Solo	-	0,40	270	$3{,}53\times10^{-2}$	0,82	0,50	0,16
d), e) e f) BR-D								
Base	Solo	- / - /15	0,35	458	$4{,}50\times10^{-3}$	-1,117	2,537	0,125
Sub-base	Solo	40/38/15	0,35	494	$3{,}04\times10^{-2}$	1,429	0,132	0,126
Subleito	Solo	-	0,40	303	$5{,}60\times10^{-3}$	-0,390	2,267	0,154

3. RESULTADOS

Utilizando o método e os dados apresentados nas Seções 2.1 e 2.2, foi usado o CAP3D-D para a modelagem, o que permitiu avaliar a contribuição específica de cada camada, além do subleito, para o ATR ao longo da vida útil de cada pavimento. Os resultados estão apresentados na Figura 1, com as simulações mostrando que o ranqueamento de misturas com base na deformação acumulada se alinha com a baseada no FN, especialmente quando FN > 2000 (Figura 1C).

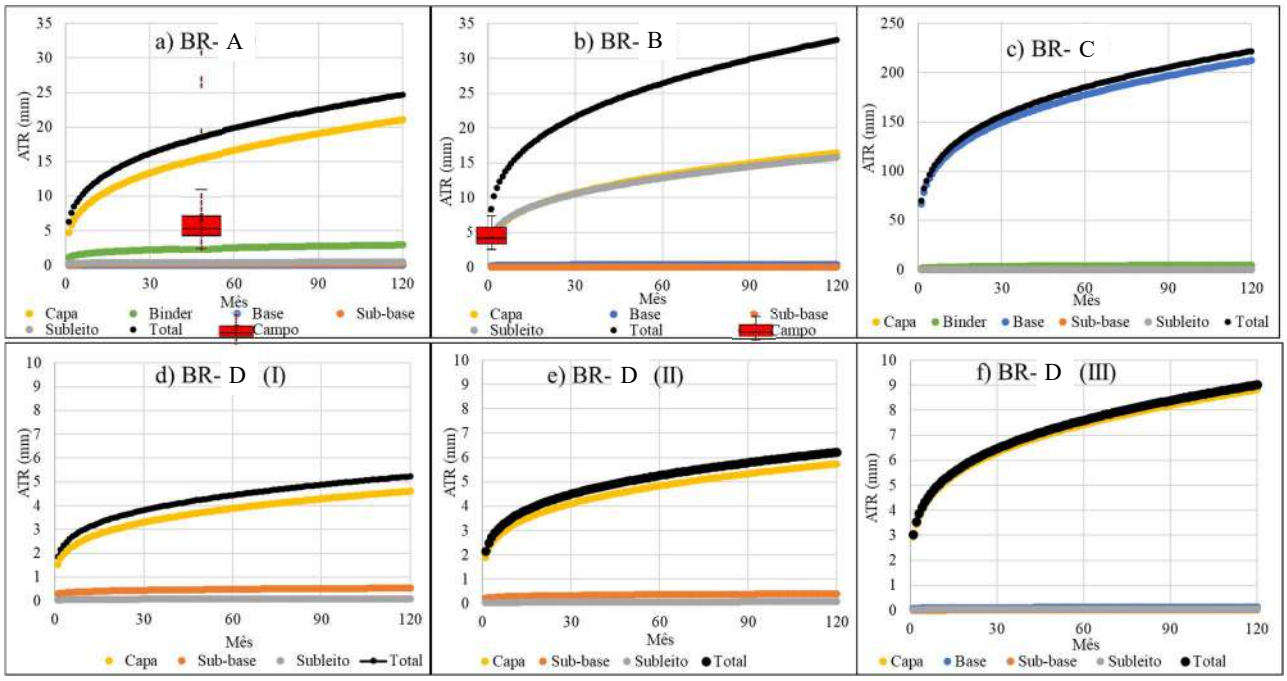


Figura 1: Evolução do ATR das rodovias avaliadas

A Figura 1a apresenta a previsão da evolução do ATR ao longo de 120 meses para um segmento da BR-A, dimensionado para um tráfego de $1{,}07\times10^{8}$, conforme USACE. A estrutura é composta por duas camadas

asfálticas (Capa e Binder), uma base coesiva em solo-cimento (6%) e uma sub-base granular. Os resultados indicam que a maior parte da deformação permanente ocorre na Capa, que supera 20 mm ao final do período simulado, seguida pelo Binder (≈4 mm). As camadas inferiores (base cimentada e sub-base) e o subleito apresentam comportamento praticamente elástico, com ATR inferior a 1 mm. O somatório dos ATRs simulados supera 25 mm, enquanto a medição de campo aos 48 meses indica um ATR médio de 6,7 mm.

A distribuição das deformações ao longo da profundidade indica que a base cimentada exerce papel importante na contenção das deformações nas camadas inferiores, promovendo a redistribuição das tensões ao longo do sistema estrutural. A concentração das deformações nas camadas asfálticas é compatível com o comportamento típico de estruturas com base rígida, onde predominam esforços de tração e cisalhamento. A projeção de ATR superior a 25 mm ao final do período analisado evidencia a importância do monitoramento contínuo e da implementação de estratégias de manutenção preventiva, especialmente considerando que o valor medido representa uma média, havendo já registros pontuais superiores a 30 mm em ambas as trilhas de roda.

A Figura 1b exibe os resultados para a BR-B, projetada para tráfego de 6×10^7. O ATR total previsto atinge cerca de 33 mm ao final de 120 meses, com maiores contribuições da Capa e do subleito. As camadas de base (solo-brita-cimento) e sub-base apresentam comportamento elástico, com recalques desprezíveis, indicando adequada capacidade estrutural. A medição de campo inicial, de cerca de 5 mm ainda no início da abertura ao tráfego, está alinhada com as projeções do modelo, validando a calibração dos parâmetros adotados.

Na Figura 1c, observa-se a simulação do ATR para a rodovia BR-C, dimensionada para $8{,}25\times10^7$. A estrutura é composta por 5 cm de Capa, 10 cm de Binder e camadas inferiores (40 cm) exclusivamente granulares. A deformação acumulada está concentrada na base, que atinge 200 mm, enquanto as demais camadas (capa, Binder e sub-base) e o subleito apresentam contribuição desprezível. Esse comportamento evidencia a baixa capacidade de suporte da base, cuja instabilidade frente às solicitações impostas compromete o comportamento da estrutura. A ausência de estabilização, associada à presença de materiais finos, contribui para a progressiva deformação e redução da vida útil do pavimento, apesar da presença de duas camadas asfálticas.

As Figuras 1d, 1e e 1f apresentam a evolução do acúmulo total de ATR para três estruturas executadas com os mesmos materiais na BR-D, submetidas a uma carga de tráfego de $3{,}95\times10^7$, porém com diferentes distribuições de espessura entre as camadas. A Estrutura 1, com 5 cm de revestimento asfáltico e 40 cm de sub-base, apresentou o menor ATR aos 120 meses (~5,2 mm), com concentração de deformações na camada superior. A Estrutura 2, composta por 7 cm de revestimento e 38 cm de sub-base, teve ATR intermediário (~6,2 mm). Já a Estrutura 3, com 15 cm de revestimento, 15 cm de base e 15 cm de sub-base, apresentou o maior ATR (~9,0 mm), quase totalmente concentrado no revestimento, evidenciando maior suscetibilidade dessa camada à DP.

Huang (2004) relata experimento semelhante, no qual duas pistas com a mesma espessura total, mas diferentes proporções entre revestimento e base, foram construídas sobre subleito com baixa capacidade de suporte. Nesse estudo, o melhor desempenho foi obtido com maior espessura de revestimento, reforçando seu papel crítico sobre subleitos fracos. Adicionalmente, com base em dados da pista experimental da AASHTO, Huang identificou que 59% da deformação permanente ocorre nas camadas granulares (45% na sub-base e 14% na base), 32% no revestimento asfáltico e apenas 9% no subleito, evidenciando a responsabilidade das camadas não ligadas no desempenho estrutural do pavimento. A comparação entre os casos indica que, embora espessuras maiores de revestimento beneficiem subleitos fracos, essa estratégia é ineficaz quando a camada superior apresenta elevada suscetibilidade à DP. A redução excessiva das camadas granulares compromete o desempenho estrutural global, como observado na BR-D.

4. CONCLUSÕES

Com base nas simulações realizadas em estruturas representativas de rodovias do contexto nordestino, observou-se que:

- Na BR-A, a presença de uma base em solo-cimento com 6% de cimento resultou em comportamento predominantemente elástico das camadas inferiores (contribuição <5%). O revestimento, composto pela Capa, com maior contribuição relativa, com cerca de 80%, seguida pela camada de Binder (≈15%), totalizando 95% do ATR total;

- Na BR-B, a análise indicou que o revestimento e o subleito foram os elementos com maior contribuição, com aproximadamente 40% e 35%, respectivamente, do ATR total;
- Na BR-C, caracterizada por camadas exclusivamente granulares e ausência de estabilização, a camada de base foi responsável por mais de 85% do ATR acumulado, indicando significativa instabilidade estrutural. A magnitude do ATR de 200 mm demonstra a limitação do desempenho mecânico dessa camada, comprometendo a durabilidade do pavimento mesmo na presença de revestimento duplo (Binder e Capa);
- Na BR-D, composta por variações estruturais com materiais granulares e concreto asfáltico, a camada de revestimento concentrou mais de 90% do ATR total. O comportamento evidencia que a espessura da camada asfáltica, quando associada a materiais com baixa resistência à deformação permanente, não é suficiente para mitigar o acúmulo de deformações sob tráfego repetido;

De uma forma geral, os resultados evidenciam que camadas de revestimento asfáltico, especialmente caso sejam compostas por materiais com baixa resistência à deformação permanente, possuem uma responsabilidade relevante pelo ATR, sobretudo quando há camadas inferiores bem estruturadas. Em estruturas com camadas granulares não estabilizadas e baixa capacidade de suporte, o ATR pode ser significativamente influenciado pelas camadas inferiores, o que reforça a importância da estabilização química para rodovias de tráfego elevado. Além disso, observou-se alinhamento entre simulações e FN, especialmente quando FN > 2000, indicando baixa contribuição das camadas asfálticas ao ATR. Parece essencial considerar a contribuição das camadas asfálticas na previsão do ATR, mesmo em casos de FN adequado.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à FUNCAP pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barker, W. R.; W. N. Brabston e Y. T. Chou (1977) A General System for the Structural Design of Flexible Pavements. Proc. of the 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, MI, p. 209-248.

DNIT (2018a*) Norma DNIT 179/2018-IE: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018b) *Norma DNIT 184/2018 - ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2021) Instrução de Serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa.

Guimarães, A. C. R. (2009) *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Holanda, A. S.; E. Parente Jr.; T. D. P. Araújo; L. T. B. Melo; F. Evangelista Jr. e J. B. Soares (2006) Finite Element Modeling of Flexible Pavements. XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE). Belém, Pará.

Huang, Y. H. (2004) *Pavement Analysis and Design*. 2nd ed. Pearson Prentice Hall, Kentucky.

Kim, D. e Y. R. Kim (2017) Development of Stress Sweep Rutting (SSR) test for permanent deformation characterization of asphalt mixture. *Construction and Building Materials* v. 154, p. 373–383.

Motta, L. M. G. (1991) *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil-Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Perzyna, P. (1966) Fundamental Problems in Viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, Academic Press. Vol. 9, pp. 243 – 377. New York.

Santos, A. B. V. (2020) *Contribuições para o desenvolvimento de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão da área trincada*. Mestrado em Engenharia de Transportes – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.

Vale, A. C. F.; L. S. V. Silva; J. B. S. Bastos; E. S. Barroso; L. F. A. L. Babadopulos; E. Parente Jr. e J. B. Soares (2022) Acúmulo de deformação permanente em camadas asfálticas no dimensionamento de pavimentos a partir de modelo viscoplástico. Anais do 36° ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza-CE.

Juceline Batista dos Santos Bastos (juceline.santos@ifce.edu.br)
Instituto Federal do Ceará, Departamento de Construção Civil, Av. Treze de Maio, 1989, Fátima, Fortaleza-CE, Brasil.

CONTROLE DEFLECTOMÉTRICO DO SUBLEITO: AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DAS DEFLEXÕES E SEUS EFEITOS NO DESEMPENHO DO PAVIMENTO

Pedro de Carvalho Teixeira[1], **Carlos Yukio Suzuki**[1, 2], **Caio Rubens Gonçalves Santos**[1], **Flaviane Melo Lopes Vallejo**[1,3], **Thisbe Cordeiro Moreira Prates**[1,2]
[1]Planservi Engenharia, [2]Universidade de São Paulo, [3]Instituto Mauá de Tecnologia

RESUMO
Este trabalho investiga a efetividade do controle deflectométrico no topo do subleito como critério para aceitação em obras de pavimentação. Por meio da simulação de 3.000 medições de deflexões e subsequente seleção de 20 segmentos com 10 pontos cada, avaliaram-se as deflexões segundo a metodologia estatística da ET-DE-P00/001 (DER/SP, 2024). A análise revelou inconsistências nos critérios atuais, uma vez que segmentos que seriam aceitos exibiram desempenho estrutural inferior a segmentos que seriam reprovados. A avaliação mecanicista mostrou que segmentos aceitos podem apresentar, pontualmente, reduções significativas na vida útil, chegando a 18 meses. Conclui-se que a abordagem estatística isolada não representa adequadamente o desempenho real da estrutura, sugerindo a necessidade de integração com critérios mecanicistas e a determinação do índice de confiabilidade. Desta forma, o estudo contribui com subsídios técnicos para inclusão dos critérios probabilísticos de aceitação com foco em desempenho e durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O controle tecnológico da qualidade em obras rodoviárias constitui uma ferramenta essencial para assegurar a confiabilidade dos serviços executados e a conformidade dos materiais, serviços e processos com os padrões técnicos estabelecidos nas normativas, manuais e especificações vigentes. Em um cenário de crescentes investimentos públicos em infraestrutura e de maior exigência por parte da sociedade quanto à transparência e à eficiência na aplicação dos recursos, a adoção de práticas sistematizadas de controle torna-se indispensável. Tais práticas visam não apenas garantir o desempenho, a durabilidade e a segurança da infraestrutura, mas também minimizar os riscos de aceitação de trechos com desempenho abaixo do esperado. No caso da camada de subleito, o controle tecnológico é dividido em quatro grupos principais, conforme estabelecido pelas especificações técnicas vigentes: (i) controle dos materiais, (ii) controle de execução, (iii) controle geométrico e de acabamento, e (iv) controle das deflexões. Esses grupos englobam, respectivamente, a verificação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados, a qualidade dos processos construtivos, a conformidade das dimensões e do acabamento da plataforma, e o desempenho estrutural da camada por meio de ensaios não destrutivos.

Dentre esses grupos, o controle das deflexões no topo do subleito tem destaque, especialmente pela sua simplicidade, grande aplicabilidade e capacidade de inferir, por meio de suas leituras, o desempenho estrutural da camada sob condições reais de carregamento. Nesse contexto, este artigo concentra-se na análise do controle deflectométrico da camada de subleito, avaliando os métodos estatísticos adotados pelas normativas técnicas vigentes e discutindo sua aplicação prática, efetividade e limitações no contexto das obras de infraestrutura rodoviária.

2. METODOLOGIA

2.1. Obtenção de banco de dados de deflexões de campo

Para analisar a influência do controle tecnológico do subleito por meio das medições das deflexões recuperáveis no desempenho global do pavimento, adotou-se uma estrutura de pavimento do tipo flexível, composta por revestimento asfáltico com base e sub-base de materiais granulares. A Tabela 1 apresenta os parâmetros elásticos e geométricos da estrutura adotada, denominada neste trabalho como estrutura de projeto, assim como os resultados da simulação das deflexões previstas no ensaio da viga Benkelman, utilizando o "*software*" ELSYM-5, considerando a aplicação das cargas equivalentes ao eixo padrão rodoviário de 80 kN.

Tabela 1: Parâmetros elásticos e geométricos da estrutura de pavimento

Camada	Espessura (mm)	Módulo de Resiliência (MPa)	Coef. de Poisson	D_0 (x 10^{-2} mm)
Revestimento	50	3.500	0,30	69,1
Base	150	250	0,35	77,6
Sub-base	200	150	0,40	91,2
Subleito	-	75	0,45	99,2

A variabilidade das condições de suporte do subleito foi avaliada a partir da simulação de medições de

deflexões no topo dessa camada, gerando um banco de dados artificial de deflexões. Para a simulação optou-se por limitar as deflexões conforme a equação 1, ou seja, sempre com medidas variando da média menos uma vez o desvio padrão até a média mais meio desvio padrão. Para a determinação do desvio padrão utilizou-se o coeficiente de variação de 15% conforme indica Huang (2004). Utilizou-se o "*software"* EXCEL, tendo sido obtido banco de dados de 3.000 medições de deflexões no topo do subleito.

$$D_{0\,Projeto} - S \leq D_{0\,Campo} \leq D_{0\,Projeto} + 0{,}5 \times S \quad (1)$$

$Onde$:

$$D_0 = Deflexão\ máxima\ no\ topo\ do\ subleito \qquad S = Desvio\ padrão$$

O banco de dados resultou em valor médio igual a 94,4 x 10^{-2} mm, desvio padrão igual a 5,5 x 10^{-2} mm e coeficiente de variação igual a 5,9%, valor este, dentro do indicado por Huang (2004). Adicionalmente verifica-se que a medida máxima e mínima obtida no banco de dados foi de 106 x 10^{-2} mm e 85 x 10^{-2} mm, respectivamente.

Para aproximar os dados gerados às condições reais observadas em campo, permitiu-se que o conjunto apresentasse maior concentração de valores inferiores à deflexão de projeto, em detrimento de valores superiores. A partir do conjunto de 3.000 dados simulados, foram selecionados aleatoriamente 20 segmentos, cada um composto por 10 pontos de medição de deflexões, totalizando 200 medições organizadas em unidades amostrais. Os dados deflectométricos das 20 unidades amostrais (segmentos) são tratados estatisticamente, para fins de verificação de conformidade, segundo especificação ET-DE-P00/001 (2024) do DER/SP.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1. Controle tecnológico de segmentos pela especificação do DER/SP

Para a avaliação inicial de cada segmento, foram feitos os cálculos de média, desvio padrão amostral, índice de confiabilidade considerando uma distribuição normal padrão e a probabilidade de falha, além da verificação da aceitação do segmento pelo critério estatístico na ET-DE-P00/001 (2024) do DER/SP, que considera o cálculo da deflexão característica em função do número de medições no segmento. Para 10 medições a deflexão característica (D_c) é calculada conforme a equação (2).

$$D_c = \bar{D} + 0{,}77 \times S \quad (2)$$

$Sendo$:

$$\bar{D} = Deflexão\ média\ do\ segmento \qquad S = Desvio\ padrão\ do\ segmento$$

O índice de confiabilidade (IC) de cada segmento foi determinado pelo cálculo do parâmetro β conforme a equação (3) e posterior determinação da confiabilidade segundo uma distribuição normal padrão.

$$\beta = \frac{D_{0\,Projeto} - \bar{D}}{\sqrt{{S_{Projeto}}^2 + S^2}} \quad (3)$$

Os segmentos e as análise estão apresentados na Tabela 2. Verifica-se que para os 20 segmentos o valor médio das deflexões resultou entre 91 e 98,5 x 10^{-2} mm, desvio padrão entre 3,5 e 8,1 e deflexão característica entre 95,4 e 101,7 x 10^{-2} mm. Desta forma, 6 segmentos deveriam ser reprovados segundo a metodologia proposta pelo DER/SP. Adicionalmente, verifica-se que entre os segmentos reprovados na primeira análise, os valores de Índice de Confiabilidade variam entre 51,7% e 61,8%. Por outro lado, entre os segmentos aceitos verifica-se índice de confiabilidade similar, entre 59,1% e 69,7%. No entanto, há casos em que segmentos aceitos apresentam confiabilidade inferior ou igual à de segmentos rejeitados, sugerindo que a avaliação baseada exclusivamente na média e no desvio padrão das deflexões pode não ser suficiente para refletir adequadamente o desempenho real de cada segmento.

Dessa forma, para complementar a análise estatística e melhor compreender o impacto das variações no suporte do subleito sobre o desempenho estrutural, procedeu-se, no próximo capítulo, à avaliação mecanicista do pavimento implantado sobre os 20 segmentos.

Tabela 2: Segmentos de medições de deflexões

Seg.	Deflexão no Subleito (x 10^{-2} mm)										Nº de Valores Acima de $D_{0\ Projeto}$	Deflexão Média (x 10^{-2} mm)	Desvio Padrão (x 10^{-2} mm)	Critério de Aceitação (DER/SP)		β	IC	PF
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				Dc (x 10^{-2} mm)	Situação			
1	93	86	99	98	96	97	90	100	92	95	1	94,6	4,4	98,0	Aceito	0,294	61,6%	38,4%
2	105	88	94	88	95	95	91	99	90	89	1	93,4	5,4	97,6	Aceito	0,364	64,2%	35,8%
3	94	100	100	97	101	99	104	93	93	104	5	98,5	4,1	101,7	Reprovado	0,043	51,7%	48,3%
4	93	86	97	96	90	93	96	90	93	96	-	93,0	3,5	95,7	Aceito	0,403	65,7%	34,3%
5	91	95	96	92	89	106	92	89	102	102	3	95,4	6,0	100,0	Reprovado	0,234	59,3%	40,7%
6	99	96	95	94	99	95	100	86	86	95	1	94,5	4,9	98,3	Aceito	0,297	61,7%	38,3%
7	105	95	92	95	93	102	91	93	88	100	3	95,4	5,3	99,5	Reprovado	0,238	59,4%	40,6%
8	100	89	94	89	85	91	93	86	99	100	2	92,6	5,6	96,9	Aceito	0,413	66,0%	34,0%
9	95	98	91	92	92	89	98	106	94	102	2	95,7	5,3	99,8	Reprovado	0,219	58,7%	41,3%
10	97	99	86	101	89	93	102	95	86	95	2	94,3	5,8	98,8	Aceito	0,304	61,9%	38,1%
11	94	88	88	100	102	106	104	86	86	87	4	94,1	8,1	100,3	Reprovado	0,299	61,8%	38,2%
12	95	98	90	97	85	93	99	85	93	88	-	92,3	5,1	96,3	Aceito	0,436	66,9%	33,1%
13	90	90	89	98	95	96	88	104	95	100	2	94,5	5,3	98,5	Aceito	0,295	61,6%	38,4%
14	97	92	93	90	91	96	89	93	85	98	-	92,4	3,9	95,4	Aceito	0,439	67,0%	33,0%
15	95	98	85	98	92	92	88	85	100	95	1	92,8	5,4	97,0	Aceito	0,402	65,6%	34,4%
16	92	89	85	93	102	86	89	95	94	85	1	91,0	5,3	95,1	Aceito	0,516	69,7%	30,3%
17	100	89	98	95	97	102	96	94	96	89	2	95,6	4,2	98,8	Aceito	0,230	59,1%	40,9%
18	95	87	96	87	95	90	89	105	102	90	2	93,6	6,2	98,4	Aceito	0,345	63,5%	36,5%
19	100	102	93	88	101	102	86	95	98	90	4	95,5	6,0	100,1	Reprovado	0,228	59,0%	41,0%
20	86	89	102	93	88	93	98	102	85	86	2	92,2	6,5	97,2	Aceito	0,428	66,6%	33,4%

3.2. Análise de desempenho dos segmentos

Para avaliar o desempenho da estrutura de pavimento incluindo a variação da capacidade de suporte do subleito, foi realizada uma análise para cada um dos 10 pontos de medição em cada segmento. Essa análise estabeleceu uma correlação entre as cargas equivalentes ao eixo padrão rodoviário de 80 kN e as características elásticas e geométricas das camadas. Assim, a partir dos valores de deflexão medidos no topo do subleito foram calculados os valores equivalentes de módulo de resiliência.

Com a utilização do "*software*" ELSYM-5, para cada módulo de resiliência obtido, foi simulada a estrutura de projeto (Tabela 1), apenas substituindo o módulo do subleito, pelos valores calculados. Os módulos de resiliência do subleito calculados variaram entre 70,2 e 87,5 MPa. Para cada estrutura foram avaliados seus parâmetros críticos para pavimentos asfálticos flexíveis, a saber:

- $D_{Máximo} - Deflexão\ máxima\ no\ topo\ do\ revestimento\ asfáltico$;
- $\varepsilon_t - Deformação\ horizontal\ de\ tração\ na\ fibra\ inferior\ do\ revestimento\ asfáltico$;
- $\varepsilon_v - Deformação\ vertical\ de\ compressão\ no\ topo\ do\ subleito$.

Utilizou-se os modelos de fadiga da IP-DE-P00/001 (2024) do DER/SP, para a determinação do número admissível de repetições equivalentes do eixo padrão de 80 kN (Número N), até a falha para cada parâmetro da estrutura. Para os modelos que se utilizam da metodologia AASHTO para o fator de carga, considerou-se o fator de conversão igual a 4 para equivalência com a metodologia USACE. Os modelos de fadiga utilizados para a conversão dos esforços internos das estruturas em Número N são apresentados nas equações (4) a (6):

- Deslocamento vertical no topo do revestimento - *DNER PRO 11/79*

$$\log D_{adm} = 3{,}01 - 0{,}176 \times \log N_{USACE} \quad (4)$$

- Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento - *Federal Highway Administration (FHWA - 1976)*

$$N_{AASHTO} = 1{,}092 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3{,}512} \quad (5)$$

- Deformação vertical de compressão no topo do subleito - *Shell ksla (Dormon & Metcalf - 1965)*

$$N_{USACE} = 6{,}069\ x\ 10^{-10} \times (\varepsilon_v)^{-4{,}762} \quad (6)$$

Para verificar se o desempenho da estrutura está abaixo do esperado em projeto, também foram calculados os esforços internos da estrutura de projeto, que serve como padrão de comparação frente às demais. Os valores de Número N admissíveis para a estrutura de projeto são apresentadas na Tabela 3 e a Tabela 4 ilustra uma pequena amostra da análise realizada.

Tabela 3: Número N admissível para a estrutura de projeto

N USACE (PRO 11/79)	N USACE (FHWA -1976)	N USACE (Dormon & Metcalf - 1965)	N Crítico
3,09E+06	9,48E+06	1,20E+06	1,20E+06

Tabela 4: Análise mecanicista das estruturas

Item	D_0 no Subleito	E_{SL} (MPa)	N USACE (PRO 11/79)	N USACE (FHWA - 1976)	N USACE (Dormon & Metcalf - 1965)	N Crítico	Situação de Projeto	Redução da Vida Útil
1	93,0	80,0	3,77E+06	9,45E+06	1,44E+06	1,44E+06	Atende	-
2	86,0	86,5	4,77E+06	9,42E+06	1,80E+06	1,80E+06	Atende	-
3	99,0	75,1	3,11E+06	9,47E+06	1,21E+06	1,21E+06	Atende	-
4	98,0	75,9	3,21E+06	9,47E+06	1,24E+06	1,24E+06	Atende	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...
198	102,0	72,9	2,83E+06	9,49E+06	1,11E+06	1,11E+06	Não Atende	7,56%
199	85,0	87,5	4,93E+06	9,41E+06	1,87E+06	1,87E+06	Atende	-
200	86,0	86,5	4,77E+06	9,42E+06	1,80E+06	1,80E+06	Atende	-
Mínimo	85,0	70,2	2,52E+06	9,41E+06	1,00E+06	1,00E+06	-	2,22%
Máximo	106,0	87,5	4,93E+06	9,50E+06	1,87E+06	1,87E+06	-	16,59%

Na Tabela 4, observa-se, por exemplo, que o ponto 198, pertencente ao segmento 20 (aprovado conforme indicado na Tabela 2) apresenta desempenho 7,56% inferior ao previsto em projeto. Esse ponto de medição representa 10% da extensão total do segmento.

Tabela 5: Redução da vida útil dos segmentos

Segmento	Critério de Aceitação (DER/SP)	% do Segmento com Vida Útil Inferior à de Projeto	Redução Média da Vida Útil nos Pontos com Deficiência de Desempenho		Vida útil Média dos Pontos com Deficiência de Desempenho
	Situação		%	Tempo	Tempo
1	Aceito	10,0%	2,2%	3 meses	117 meses
2	Aceito	10,0%	14,6%	18 meses	102 meses
3	Reprovado	50,0%	6,8%	8 meses	112 meses
4	Aceito	-	-	-	-
5	Reprovado	30,0%	10,6%	13 meses	107 meses
6	Aceito	10,0%	2,2%	3 meses	117 meses
7	Reprovado	30,0%	8,1%	10 meses	110 meses
8	Aceito	20,0%	2,2%	3 meses	117 meses
9	Reprovado	20,0%	12,1%	14 meses	106 meses
10	Aceito	20,0%	6,3%	8 meses	112 meses
11	Reprovado	40,0%	9,7%	12 meses	108 meses
12	Aceito	-	-	-	-
13	Aceito	20,0%	7,3%	9 meses	111 meses
14	Aceito	-	-	-	-
15	Aceito	10,0%	2,2%	3 meses	117 meses
16	Aceito	10,0%	7,6%	9 meses	111 meses
17	Aceito	20,0%	4,9%	6 meses	114 meses
18	Aceito	20,0%	11,1%	13 meses	107 meses
19	Reprovado	40,0%	5,6%	7 meses	113 meses
20	Aceito	20,0%	7,6%	9 meses	111 meses

Considerando que pavimentos flexíveis são usualmente dimensionados para um horizonte de projeto de 10 anos, tal desempenho implica em uma redução estimada de aproximadamente 9 meses na vida útil desse trecho específico. Essa mesma metodologia de avaliação foi aplicada para todos os segmentos, cujos resultados estão sintetizados na Tabela 5.

4. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido apresentou relevância no cenário do controle de tecnológico do subleito através do controle deflectométrico pelo ensaio da viga Benkelman. Os resultados apresentados sugerem limitações nos critérios atualmente empregados para o controle deflectométrico do subleito, especialmente no que se refere à análise estatística baseada exclusivamente na média e no desvio padrão das deflexões. Verificou-se que tais parâmetros, por si só, podem conduzir a decisões inconsistentes, como a aceitação de segmentos com desempenho inferior a outros que foram reprovados.

Adicionalmente, observa-se que as normativas vigentes não estabelecem critérios objetivos e claros para a delimitação dos segmentos de medição, tampouco preveem o uso de tratamentos estatísticos mais robustos que permitam avaliar de forma mais confiável a variabilidade dos dados obtidos em campo.

Diante desse cenário, sugere-se a incorporação do índice de confiabilidade e avaliações mecanicistas como parâmetros complementares de avaliação, por permitir uma análise mais criteriosa e assertiva da dispersão dos dados e do risco associado à aceitação de segmentos com desempenho insatisfatório. Recomenda-se, ainda, que futuras revisões normativas incluam diretrizes claras para a definição dos segmentos de medição e incentivem o uso de ferramentas estatísticas e mecanicistas integradas, de modo a fortalecer a consistência técnica e a confiabilidade do controle tecnológico em obras rodoviárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DER/SP (2024) ET-DE-P00/001: *Melhoria e preparo do subleito*. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem.

DER/SP (2024) IP-DE-P00/001: *Projeto de Pavimentação*. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem.

DNER (1997) DNER-PRO 277/97: *Metodologia para controle estatístico de obras e serviços*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNER (1979) DNER-PRO 011/79: *Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Dormon, G.M., C.T. Metcalf (1965) *Design of Asphalt Pavements for Highways and Streets*. Houston, Texas: Shell Oil Company.

FHWA (1976) *Traffic Assignment Manual*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation

Huang, Y. H. (2004) *Pavement analysis and design*. (2ª. ed.) Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. ISBN 0-13-142473-4.

Pedro de Carvalho Teixeira (pedro.teixeira@planservi.com.br)
Planservi Engenharia, Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1461, conjunto 181, Jardim Paulistano, São Paulo, SP, Brasil.
Carlos Yukio Suzuki (carlos.suzuki@poli.usp.br)
Planservi Engenharia, Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1461, conjunto 181, Jardim Paulistano, São Paulo, SP, Brasil.
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes, Avenida Professor Almeida Prado, Travessa do Biênio, 83, Butantã, São Paulo, SP, Brasil.
Caio Rubens Gonçalves Santos (caiorubens@planservi.com.br)
Planservi Engenharia, Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1461, conjunto 181, Jardim Paulistano, São Paulo, SP, Brasil.
Flaviane Melo Lopes Vallejo (flaviane.vallejo@maua.br)
Planservi Engenharia, Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1461, conjunto 181, Jardim Paulistano, São Paulo, SP, Brasil.
Instituto Mauá de Tecnologia, Praça Mauá, 1, São Caetano do Sul, SP, Brasil.
Thisbe Cordeiro Moreira Prates (thisbecordeiroprates@gmail.com)
Planservi Engenharia, Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1461, conjunto 181, Jardim Paulistano, São Paulo, SP, Brasil.
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Transportes, Avenida Professor Almeida Prado, Travessa do Biênio, 83, Butantã, São Paulo, SP, Brasil.

CORPOS DE PROVA VIRTUAIS 3D DE BGTC: ABORDAGEM DEM

Lethícia Raquel da Silva Gomes, Leandro Lima Rasmussen, Márcio Muniz de Farias
Universidade de Brasília

RESUMO
Materiais como a brita graduada tratada com cimento (BGTC) são amplamente utilizados em camadas de base de pavimentos devido à sua elevada rigidez e durabilidade. Este trabalho apresenta a criação de corpos de prova virtuais 3D de BGTC por meio do Método dos Elementos Discretos (DEM), utilizando o *software* PFC, com o objetivo de reproduzir o empacotamento granulométrico e a porosidade observados experimentalmente. Partículas virtuais foram desenvolvidas a partir de geometrias reais de britas e distribuídas em quatro faixas granulométricas, ajustando-se a proporção volumétrica para representar a curva obtida em ensaios físicos. Três corpos de prova cilíndricos foram gerados com porosidade entre 10% e 25%, controlando-se a aleatoriedade por meio da definição da semente do gerador de números aleatórios, o que garante reprodutibilidade. As partículas foram conectadas pelo modelo de contato *Linear Parallel Bond,* simulando a matriz cimentícia, e envolvidas por uma membrana flexível para representar o confinamento triaxial. Os resultados mostraram boa correspondência da porosidade simulada com valores experimentais, estabelecendo um procedimento para estudos micromecânicos futuros.

1. INTRODUÇÃO

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) é amplamente empregada como camada de base em pavimentos rodoviários pela sua elevada resistência e durabilidade, contribuindo para reduzir deformações permanentes e aumentar a vida útil do pavimento. Diversos estudos destacam que a adição de cimento à brita graduada melhora significativamente o módulo de resiliência, proporcionando um comportamento mecânico mais favorável sob cargas repetidas (Albuquerque Filho *et al.*, 2024; Lima, 2023). Ensaios laboratoriais e pistas experimentais mostram o desempenho superior da BGTC em relação a materiais não tratados, sobretudo quanto à menor suscetibilidade à umidade e ao ganho de rigidez advindo da matriz cimentícia (Albuquerque e Nascimento, 2018; Balbo, 2006).

A caracterização mecânica de materiais como a BGTC é, portanto, essencial para o projeto de bases e sub-bases de pavimentos. Ensaios como o triaxial cíclico são amplamente utilizados para avaliar deformação permanente e resiliência em diferentes condições de confinamento e carregamento, servindo de base para dimensionamento e análise estrutural (Medina e Motta, 2015).

A simulação desses ensaios é fundamental para compreender e prever o comportamento mecânico do material, permitindo investigar mecanismos internos e calibrar modelos de projeto com maior precisão. O Método dos Elementos Discretos (DEM), proposto por Cundall e Strack (1979), destaca-se por modelar explicitamente partículas e suas interações, viabilizando o estudo de redistribuições de tensões, formação de zonas de cisalhamento e evolução de micro danos (O'Sullivan, 2011). Essa abordagem pode ser usada para representar misturas cimentadas, pois pode representar simultaneamente o empacotamento granular e os efeitos das ligações coesivas, capturando a influência do teor de ligante, porosidade e confinamento na resposta mecânica. O uso do DEM em misturas cimentadas já é consolidado na engenharia geotécnica, empregando modelos com ligações coesivas para simular ensaios triaxiais (Li *et al.*, 2017; de Bono *et al.*, 2014).

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo gerar corpos de prova virtuais de BGTC a partir de dados granulométricos experimentais realizados por Carvalho (2025, no prelo), utilizando o DEM para reproduzir o empacotamento e a porosidade inicial do material. Essa etapa é crucial para assegurar representatividade micromecânica antes da aplicação de carregamentos simulados, servindo de base para calibrações futuras que alinhem os modelos numéricos aos resultados de laboratório. A utilização de *clumps* como representação de partículas não esféricas é uma prática já consolidada em simulações DEM, destacando-se pela capacidade de aproximar geometrias complexas (Kodicherla, 2023).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho utilizou o Método dos Elementos Discretos (DEM) para gerar corpos de prova virtuais de BGTC, baseados em dados granulométricos experimentais de Carvalho (2025, no prelo). A curva granulométrica foi discretizada para adequar-se aos tamanhos disponíveis e modelada no *software* PFC com *clumps* oriundos de geometrias escaneadas por Diógenes (2021), preservando a forma irregular das britas.

2.1. Dados experimentais de referência

Este estudo utilizou como base os ensaios conduzidos por Carvalho (2025, no prelo) na pista experimental construída pelo DNIT em Brasília. Nessa investigação foram caracterizados os materiais empregados nas diferentes camadas do pavimento, com destaque para a brita graduada simples tratada com cimento (BGTC) aplicada na camada de base. O material foi enquadrado na Faixa C da Especificação de Serviço 141 (DNIT, 2022) e submetido a ensaios granulométricos conforme o Método de Ensaio 083 (DNER, 1998) e de compactação segundo o Método de Ensaio 443 (DNIT, 2023), resultando em densidade seca máxima de 2,36 g/cm³ e umidade ótima de 5,4%. Os corpos de prova compactados foram ensaiados em triaxial cíclico de acordo com o Método de Ensaio 181 (DNIT, 2018), para determinação do módulo de resiliência. Ressalta-se que esta norma não contempla a avaliação da deformação permanente em materiais estabilizados quimicamente.

2.2. Criação de partículas virtuais de brita e Caracterização granulométrica

As partículas de brita foram representadas no *software* PFC (Particle Flow Code) da Itasca como *clumps*, formados por múltiplos *pebbles* interligados. As geometrias tridimensionais foram obtidas por escaneamento de partículas reais por Diógenes (2021), processadas no *software* MeshLab para reduzir a complexidade sem perder a forma essencial e exportadas em formato .stl. Foram gerados cinco *templates* geométricos distintos para cada faixa granulométrica (25 mm, 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm), totalizando 20 formas, calibradas via parâmetros *surfcalculate, bubblepack*, *ratio* e *distance* para garantir fidelidade morfológica e eficiência computacional.

A curva granulométrica experimental indicou um agregado bem graduado, variando de 25,4 mm a frações inferiores a 0,075 mm. Devido a restrições computacionais, procedeu-se à discretização dessa curva, agrupando as frações nas faixas compatíveis com os tamanhos disponíveis. As partículas menores que 9,5 mm foram representadas pelas de 9,5 mm. Para assegurar variabilidade morfológica e fechamento volumétrico em cada faixa, foi implementado um script no *software* PFC que sorteou, normalizou e ajustou as proporções entre as geometrias.

2.3. Geração do corpo de prova virtual

Os corpos de prova foram gerados com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, utilizando o comando *distribute* para posicionar os *clumps* conforme a distribuição granulométrica definida. Essas dimensões correspondem às dos ensaios laboratoriais de referência, garantindo a comparabilidade entre resultados numéricos e experimentais. A porosidade do material foi inicialmente estimada em cerca de 15%, valor compatível com os ensaios de compactação, a partir da densidade seca máxima (2,36 g/cm³) e da umidade ótima (5,4%).

Considerando as densidades dos constituintes (2,60 g/cm³ para a brita, 3,10 g/cm³ para o cimento e 1,00 g/cm³ para a água), obteve-se uma mistura volumétrica de aproximadamente 84–85% de brita, 4% de cimento e 12% de água, resultando em cerca de 15% de vazios. No modelo, entretanto, a porosidade foi variada entre 10% e 25%, abrangendo diferentes condições de compactação para avaliar seus efeitos na resposta mecânica. Como os vazios não são representados explicitamente, essa fração foi substituída por ligações coesivas que simulam a rigidez e a coesão da pasta de cimento e água. A membrana confinante foi modelada como uma estrutura flexível composta por pequenas partículas conectadas, reproduzindo o comportamento observado nos ensaios triaxiais. A aleatoriedade foi controlada pelo comando *model random*, assegurando a geração de corpos de prova estatisticamente equivalentes.

3. RESULTADOS

3.1. Partículas Virtuais

Foram gerados cinco *templates* geométricos distintos para cada faixa granulométrica (25 mm, 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm), totalizando 20 geometrias. Cada *template* foi convertido em *clump* composto por múltiplos *pebbles*, calibrados para manter formas representativas com quantidade otimizada de partículas. A Figura 1

mostra os *templates* criados de cada geometria escolhida.

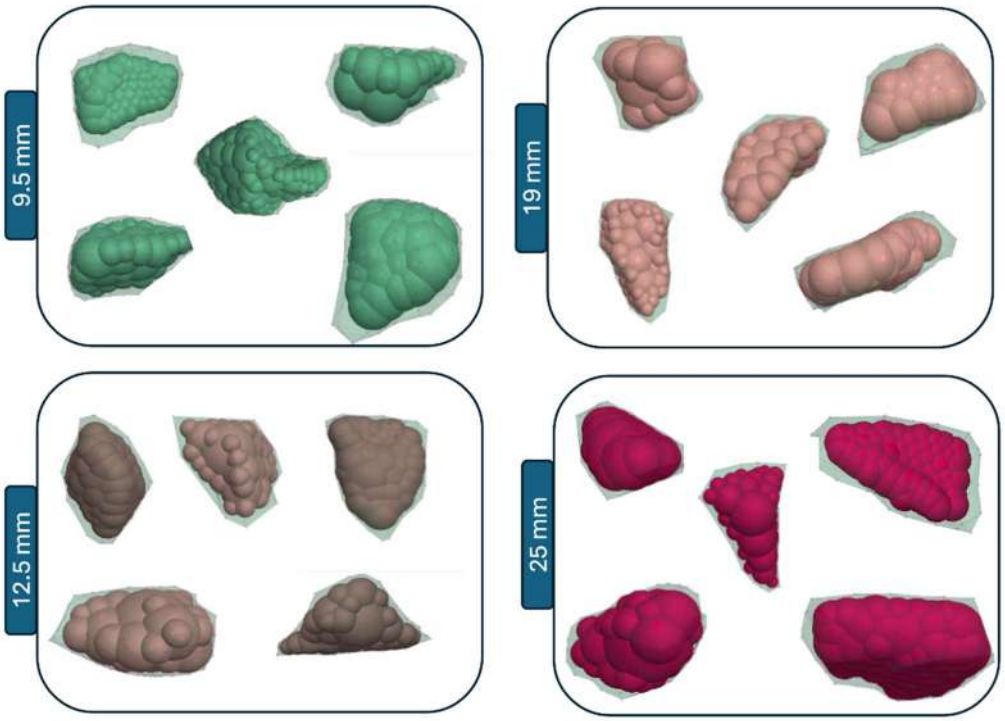


Figura 1: Britas virtuais em *clumps*

No *software* PFC, para a criação de *clumps*, o parâmetro *ratio* define a razão entre os diâmetros mínimo e máximo dos *pebbles* que compõem o *clump*, influenciando diretamente sua diversidade e robustez geométrica. O parâmetro *distance* controla o "grau de suavidade" da distribuição dos elementos na partícula rígida, em que valores maiores resultam em maior número de *pebbles* e representação de superfícies mais suaves. Já a quantidade de *pebbles* determina o número de esferas geradas por *clump*, impactando a fidelidade volumétrica do empacotamento.

Os valores de *ratio* variaram entre 0,20 e 0,65, promovendo uma ampla variedade de formatos, desde partículas alongadas até quase esféricas, o que favorece uma distribuição melhor de contatos. O *distance*, mantido entre 100 e 150, permitiu ajustar a densidade inicial do modelo: valores mais altos evitam sobreposição e aumentam a porosidade. Por fim, a quantidade de *pebbles* foi calibrada por faixa granulométrica, sendo maior para partículas de 25 mm (até 85) e menor para 19 mm (mínimo de 16).

3.2. Representação Granulométrica

Como resultado desse procedimento, obteve-se uma curva granulométrica simplificada, na qual cada faixa foi representada por um diâmetro característico e por um percentual volumétrico ajustado de forma iterativa. Nesse contexto, o percentual volumétrico corresponde à fração do volume total de agregados atribuída a cada classe granulométrica, determinada a partir da curva experimental e posteriormente ajustada no modelo até que a soma dos volumes de todas as faixas reproduzisse a proporção global do material real. Essa adaptação permitiu que a curva cumulativa simulada se aproximasse da curva experimental original, assegurando a manutenção da representatividade volumétrica do agregado no modelo numérico.

Ressalta-se que a simplificação das frações inferiores a 9,5 mm em uma única classe granulométrica constitui uma limitação do modelo, uma vez que essas partículas finas influenciam a matriz cimentícia e a distribuição de vazios. Contudo, esse efeito é parcialmente minimizado, já que no modelo DEM tais frações foram representadas pelas ligações coesivas. Os valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Representação granulométrica para o corpo de prova virtual

Faixa Granulométrica (mm)	Diâmetro representado (mm)	Percentual volumétrico (%)
19 – 25,4	25	15
12,5 - 19	19	30
9,5 – 12,5	12,5	35
< 9,5	9,5	20

3.3. Geração dos Corpos de Prova Virtuais

Foram gerados três corpos de prova virtuais (CP-1, CP-2 e CP-3) utilizando o *software* PFC, com dimensões internas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, respeitando as proporções granulométricas definidas na metodologia. A discretização da curva granulométrica experimental foi aplicada, considerando quatro diâmetros representativos das britas disponíveis (25 mm, 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm), com as porcentagens volumétricas ajustadas. Visando análises futuras da influência da porosidade no comportamento mecânico, foram obtidos valores distintos para cada corpo de prova: o CP-1 apresentou porosidade de 18,4%, o CP-2 de 22,5% e o CP-3 de 11,9%. A Figura 2 apresenta os corpos de prova virtuais com a quantidade de *clumps* de cada um deles e a membrana que foram criados.

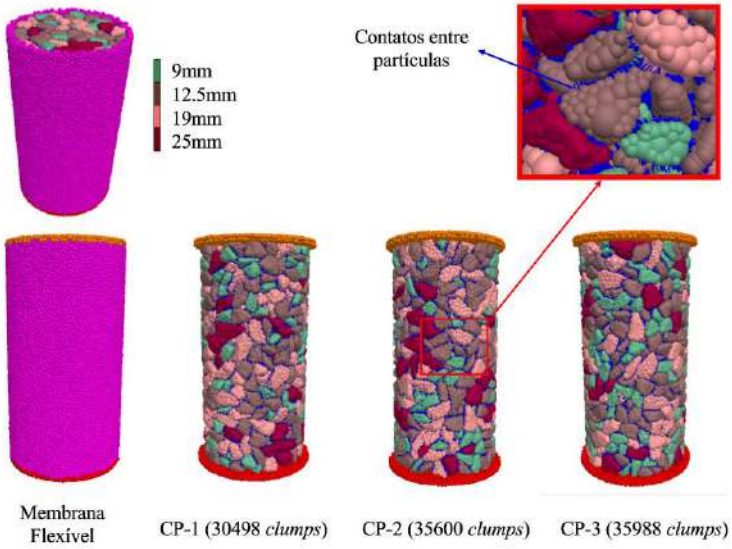


Figura 2: Corpos de prova virtuais criados

A geração dos corpos de prova virtuais, com geometria e porosidades específicas, constitui uma etapa fundamental para assegurar a representatividade micromecânica do material. Após essa construção, torna-se possível avançar para o processo de calibração dos parâmetros dos modelos de contato empregados no DEM, como rigidez normal e tangencial, resistências ao cisalhamento das ligações entre partículas. Esse ajuste é realizado de modo a reproduzir o comportamento global observado em ensaios físicos, garantindo que as respostas numéricas, em termos de curvas tensão-deformação e evolução de danos, sejam coerentes com os resultados experimentais para a BGTC. Assim, o procedimento consolida a base para análises posteriores sob diferentes condições de carregamento, permitindo investigações detalhadas dos mecanismos internos que governam a resposta estrutural das camadas cimentadas em pavimentos.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu corpos de prova virtuais de brita graduada tratada com cimento (BGTC) usando o Método dos Elementos Discretos (DEM), baseando-se em dados experimentais reais. A modelagem com *clumps* permitiu representar a geometria e o empacotamento das partículas, controlando a porosidade e a distribuição granulométrica. Os corpos de prova gerados possibilitam a calibração dos parâmetros de contato e ligações coesivas do modelo, alinhando as simulações numéricas aos ensaios triaxiais. Assim, o estudo avança na compreensão do comportamento mecânico da BGTC, fornecendo base para análises de deformação, resiliência e dano sob diferentes carregamentos. Em etapas futuras, pretende-se realizar a calibração dos parâmetros micromecânicos do modelo, de modo a alinhar a resposta numérica às curvas tensão-deformação

obtidas em ensaios triaxiais cíclicos. Essa validação permitirá avaliar, de forma integrada, o módulo de resiliência da BGTC, ampliando a aplicabilidade da metodologia proposta no dimensionamento de camadas de base de pavimentos.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, F. S. e R. da S. Nascimento (2018) Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. *Transportes*, v. 26, n. 1, p. 157–171. DOI: 10.14295/transportes.v26i1.1358

Albuquerque Filho, L. H.; M. D. T. Casagrande; M. S. de Souza Almeida; Í. M. M. Pereira e P. R. L. de Santana (2024) Efeitos da estabilização granulométrica e melhoramento químico na resistência mecânica do revestimento primário de uma estrada não pavimentada do Estado da Bahia. *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/679

Balbo, J. T. (2006) Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. *Transportes*, v. 14, n. 1. DOI: 10.14295/14i1.59

Carvalho, I. S. (2025, no prelo) Caracterização do comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga utilizando instrumentação e ensaios acelerados. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Cundall, P. A., e Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47–65. DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47

De Bono, J. P.; G. R. McDowell e D. Wanatowski (2014) DEM of triaxial tests on crushable cemented sand. *Granular Matter*, v. 16, p. 563–572. DOI: 10.1007/s10035-014-0502-8

Diógenes, D. F. (2021). Proposição de uma ferramenta para seleção de agregados aplicados em obras de infraestrutura de transportes: propriedades petrográficas, físicas e morfológicas. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

DNIT (2018) Norma DNIT 181/2018 – ME: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2022) Norma DNIT 141/2022 – ES: Pavimentação – Solos – Ensaios mecânicos e de compactação. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2023) Norma DNIT 443/2023 – ME: Pavimentação – Britas graduadas tratadas com cimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNER (1998) Norma DNER-ME 083/98: Pavimentação – Determinação da resistência mecânica à compressão diametral. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

Kodicherla, S. P. K. (2023) Discrete element modelling of granular materials incorporating realistic particle shapes. *Geo-Engineering*, v. 14, n. 15. DOI: 10.1186/s40703-023-00193-y

Li, Z.; Y. H. Wang; C. H. Ma e C. M. B. Mok (2017) Experimental characterization and 3D DEM simulation of bond breakages in artificially cemented sands with different bond strengths when subjected to triaxial shearing. *Acta Geotechnica*, v. 12, p. 987–1002. DOI: 10.1007/s11440-017-0593-6

Lima, R. M. (2023) Análise do comportamento mecânico de britas graduadas tratadas com cimento (BGTC). Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasília.

Medina, J. e L. M. G. Motta (2015) *Mecânica dos pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 570 p.

O'Sullivan, C. (2011) *Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective*. London: Taylor & Francis.

Lethícia Raquel da Silva Gomes (lethiciaraquel30@gmail.com)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Anexo SG-12, Universidade de Brasília CEP 70910-900 Brasília, DF, Brasil
Leandro Lima Rasmussen (leandro.lima@unb.br)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Anexo SG-12, Universidade de Brasília CEP 70910-900 Brasília, DF, Brasil
Márcio Muniz de Farias (muniz@unb.br)
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Anexo SG-12, Universidade de Brasília CEP 70910-900 Brasília, DF, Brasil

DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES EM CAMADAS DE BASE: UMA ABORDAGEM DE CLASSIFICAÇÃO

Bruno Cavalcante Mota[1], Mariluce de Oliveira Ubaldo[1], Caroline Dias Amancio de Lima[2], Francisco Thiago Sacramento Aragão[1], Luis Alberto Herrmann do Nascimento[3],
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Universidade Federal da Bahia, [3]Cenpes/Petrobras

RESUMO
Este artigo avalia a possibilidade de classificar solos e materiais granulares com base no desempenho mecânico e na deformação permanente. Para tal, foram realizados ensaios no equipamento triaxial de cargas repetidas e simulações computacionais com 13 cenários e dez materiais de base distintos. Os materiais apresentaram posições constantes no ranqueamento e os resultados viabilizaram a classificação segundo critérios de afundamento de trilha de roda e uma pré-seleção mais precisa. Ademais, verificou-se a sensibilidade dos solos do tipo NA à tensão confinante, destacando a importância do uso de modelos compostos de módulo de resiliência em análises mecanístico-empíricas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O dimensionamento de pavimentos considera variáveis como clima, tráfego, espessura das camadas e propriedades dos materiais. Em pavimentos flexíveis, a estrutura é geralmente composta por uma camada de revestimento asfáltico, seguida por camadas de base e sub-base, responsáveis por distribuir as cargas e proteger o subleito. Nas camadas de base e sub-base, são comumente utilizados solos ou materiais granulares. Embora esses materiais sejam frequentemente assumidos como elásticos para fins de modelagem, apresentam, na prática, uma parcela significativa de deformação não-recuperável. Huang (2004) investigou a contribuição de cada camada do pavimento na deformação permanente e identificou que a camada de base é responsável por aproximadamente 14% do total, enquanto a sub-base contribui com cerca de 45%. Esses dados evidenciam a importância da avaliação do comportamento mecânico dos materiais utilizados nessas camadas. O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), adotado no Brasil, estabelece limites máximos para o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) conforme o tipo de via. Para vias do sistema arterial principal, o limite é de 10 mm, enquanto para vias do sistema arterial primário, o limite é de 13 mm, considerando toda a estrutura do pavimento (DNIT, 2023).

No MeDiNa, a deformação permanente (DP) é avaliada por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, que recomenda a aplicação de nove pares de tensões confinante e desvio. Esse ensaio foi normatizado pela DNIT 179 (2018) e adota o modelo de Guimarães (2009) para previsão da DP, com recomendação de 150.000 ciclos por par de tensões. Estudos posteriores buscaram otimizar o procedimento: Lima (2020) propôs a redução de nove para seis pares de tensões; Mota et al. (2024) sugeriram o uso de curvas mestras para otimizar o ensaio, mantendo a acurácia dos resultados; e Araújo et al. (2024) aplicaram técnicas de inteligência artificial para estabelecer um critério de parada com base na análise do *shakedown* e na quantidade de ciclos por par de tensões. Com o ensaio de DP, é possível obter os parâmetros do modelo de Guimarães (2009) e utilizá-los em programas de dimensionamento mecanístico-empírico como o MeDiNa e o FlexPaveBR. O FlexPaveBR é uma adaptação da versão americana do FlexPave, desenvolvido pela North Carolina State University (NCSU) em parceria com a Coppe/UFRJ e o Cenpes/Petrobras. O modelo de Guimarães (2009) foi incluído na versão brasileira para a previsão do ATR. A partir das simulações mecanístico-empíricas, é possível obter o ATR médio para cada camada, a depender das condições de estrutura, tráfego e clima. Contudo, apenas esse valor pode não fornecer parâmetros suficientes para a seleção dos materiais granulares. Nesse sentido, este artigo propõe um método de classificação do ATR de camadas de base, baseado no parâmetro Rutting Strain Index (RSI), desenvolvido para misturas asfálticas por Ghanbari et al. (2020).

2. MÉTODO DE PESQUISA

Para esta pesquisa, foram analisados dez materiais com distintas características físicas e mecânicas, aplicados como camadas de base em 13 estruturas de pavimento. O software FlexPaveBR foi utilizado para realizar as simulações, na versão 2.1.5, desenvolvida pelo grupo da NCSU, pela parceria com o Cenpes e a Coppe/UFRJ. O nível de tráfego foi mantido constante em 5×10^7 repetições, simulando uma condição crítica de tráfego pesado para o pavimento, sendo as variações entre os cenários definidas por: (i) espessura da camada de base (15 cm e 30 cm); (ii) espessura da camada de revestimento asfáltico (5 cm, 10 cm e 15 cm); e (iii) MR do subleito (293 MPa, 193 MPa e 93 MPa). As simulações permitiram avaliar o comportamento frente à DP e ao potencial de ATR. Ao todo, foram realizadas simulações de 130 soluções de pavimentos. A Figura 1 apresenta

as estruturas de pavimento consideradas. O material de revestimento utilizado foi o *Surface_Mix_Regular*, caracterizado como concreto asfáltico típico com CAP 30/45 e faixa granulométrica de #12,5mm, proveniente do banco de dados do FlexPaveBR. Quanto aos materiais de sub-base e subleito (latossolo e argissolo, respectivamente), eles foram selecionados por já terem sido previamente aplicados em campo nessas respectivas camadas. A Tabela 1 apresenta as propriedades dos materiais das camadas granulares. Os dados incluem a granulometria, pela ABNT, o MR médio, as classificações MCT e AASHTO, a umidade ótima ($h_{ót}$) e a massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$).



Figura 1: Seções transversais das 13 estruturas simuladas para este trabalho

Tabela 1: Características dos materiais

ID	Granulometria (%) Argila/Silte/Areia/ Pedregulho	$MR_{médio}$ (MPa)	Classificação MCT	Classificação AASHTO	$MEAS_{máx}$ (g/cm³)	$h_{ót}$ (%)	Energia de compactação
S1N	16/8/76/0	301,41	NA	A-2-4	1,88	10,0	Normal
S2N	5/31/64/0	123,00	NS’	A-4	1,71	16,0	Normal
S3I	12/42/45/1	178,00	NS’	A-7	1,99	11,9	Intermediária
S4I	10/11/79/0	319,00	NA’	A-2-6	1,96	9,8	Intermediária
S5N	46/26/27/1	211,00	NG’	-	1,48	27,5	Normal
S6N	54/7/38/1	201,36	NG’	-	1,63	20,7	Normal
S7N	10/52/31/7	153,00	NG’	A-7-6	1,60	21,5	Normal
S8I	56/17/27/0	250,00	LG’	A-7-6	1,66	22,5	Intermediária
S9I	1/2/13/84	290,00	-	A-1-a	1,95	7,0	Intermediária
S10M	6/3/9/82	402,00	-	-	2,48	8,3	Modificada
Latossolo	66/14/20/0	275,00	-	A-7-5	1,65	22,1	Intermediária
Argissolo	40/23/37/0	293,00	-	A-7-6	1,67	19,6	Normal

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como esses materiais foram inicialmente ensaiados até 150.000 ciclos de carga, a primeira análise concentrou-

se nos valores finais de DP obtidos nos ensaios triaxiais de carga repetida aos 150.000 ciclos para cada par de tensões. Os parâmetros do modelo de Guimarães (2009) foram obtidos considerando as curvas mestras adotadas por Mota et al. (2024). A Tabela 2 apresenta a classificação de cada material para cada condição de tensão. A classificação varia conforme o par de tensões. No entanto, uma tendência consistente indica que o material S4I apresentou o melhor desempenho no ensaio triaxial, seguido pelo material S10M. O material S4I é classificado como NA', contendo 79% de areia e apresentando um MR médio elevado de 319 MPa. O material S10M, compactado com energia modificada, apresentou um MR médio ainda mais alto, de 402 MPa, e alto teor de pedregulho, de 82%. A Figura 2 mostra os resultados de ATR por material em cada um dos nove primeiros cenários.

Tabela 2: Ranqueamento dos ensaios triaxiais

Parâmetro	S1N	S2N	S3I	S4I	S5N	S6N	S7N	S8I	S9I	S10M
Coeficientes do modelo de DP										
ψ_1	0,048	0,473	0,216	0,177	1,364	0,048	0,333	0,579	0,047	0,142
ψ_2	-1,995	0,014	0,301	-0,121	0,161	-1,898	0,028	1,241	-0,629	0,340
ψ_3	2,821	1,093	1,261	1,161	1,272	4,212	1,102	0,540	1,859	0,891
ψ_4	0,082	0,041	0,060	0,043	0,088	0,078	0,044	0,063	0,101	0,042
Resultados de PD obtidos para 150,000 ciclos (mm)										
40/40	0,10	0,28	0,12	0,11	0,64	0,17	0,20	0,30	-	-
40/80	0,75	0,59	-	0,25	3,94	-	0,43	0,64	0,26	-
40/120	2,53	0,92	0,88	0,41	7,25	1,98	0,67	1,02	0,61	-
80/80	0,30	0,60	0,64	0,23	4,42	-	0,44	1,25	0,18	0,30
80/160	1,39	1,28	1,24	0,52	10,24	3,23	0,94	1,76	0,74	0,59
80/240	3,97	1,99	1,84	0,83	-	12,29	1,47	3,09	1,84	1,00
120/120	0,54	0,94	-	0,35	-	1,83	0,69	3,03	0,55	0,36
120/240	1,88	2,00	2,66	0,79	-	4,82	1,48	3,62	1,09	1,43
120/360	5,97	-	-	1,27	-	-	-	5,31	3,09	1,48
Ranqueamento dos ensaios triaxiais										
40/40	1	6	3	2	8	4	5	7	-	-
40/80	6	4	-	1	7	-	3	5	2	-
40/120	8	5	4	1	9	7	3	6	2	-
80/80	4	6	7	2	9	-	5	8	1	3
80/160	7	6	5	1	10	9	4	8	3	2
80/240	8	6	5	1	-	9	3	7	4	2
120/120	3	6	-	1	-	7	5	8	4	2
120/240	5	6	7	1	-	9	4	8	2	3
120/360	5	-	-	1	-	-	-	4	3	2

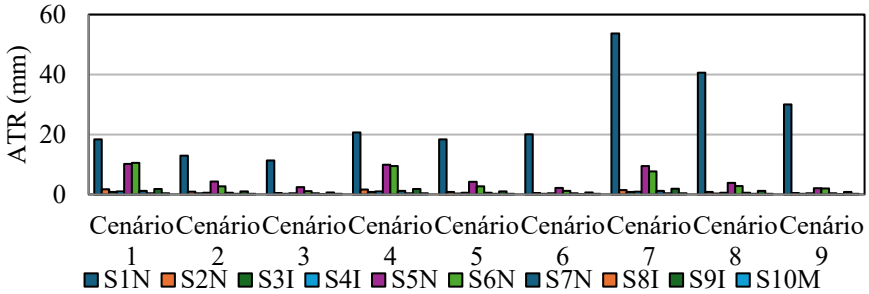


Figura 2: Resultados de ATR por cenário e material para a camada de base

Em relação aos parâmetros do modelo de Guimarães (2009), o material S6N apresentou a maior influência da tensão desviadora, com um valor de ψ_3 igual a 4,212. A dependência da tensão confinante foi mais acentuada no material S1N, que também resultou em valores de ATR mais elevados em comparação com os demais materiais. O material S1N demonstrou alta sensibilidade à tensão confinante, conforme indicado pelo seu parâmetro ψ_2 igual a -1,99. Essa característica impactou significativamente a análise de ATR. Embora o S1N tenha apresentado desempenho satisfatório em alguns pares de tensões durante os ensaios laboratoriais, conforme mostrado na Tabela 2, ele foi consistentemente classificado como o material de pior desempenho nos cenários simulados. Com relação à redução do MR do subleito, o material S1N foi significativamente impactado devido à sua alta sensibilidade à tensão confinante. No Cenário 1, com MR do subleito de 293 MPa,

o valor de ATR na camada de base foi de 18,4 mm. Quando o MR do subleito foi reduzido para 93 MPa, mantendo-se a configuração estrutural, o ATR aumentou para 53,7 mm, representando um acréscimo de 192%. Tendência semelhante foi observada quando a espessura da camada de base foi aumentada para 30 cm com MR do subleito de 293 MPa, resultando em 30,7 mm de ATR. Esse valor subiu para 72,9 mm quando o MR do subleito foi reduzido para 193 MPa. Para os demais materiais, as mudanças no MR do subleito não resultaram em variações substanciais no ATR. Em alguns casos, a redução do MR levou até mesmo a uma diminuição dos valores de ATR, em torno de 10%. A Tabela 3 apresenta os resultados de ATR para a camada de base e o ATR total, juntamente com a classificação para cada cenário simulado.

Tabela 3: Ranqueamento dos afundamentos de trilha de roda

Cenário	Parâmetro	S1N	S2N	S3I	S4I	S5N	S6N	S7N	S8I	S9I	S10M
1	ATR total (mm)	20,7	3,6	2,8	2,9	12,2	12,5	3,2	2,3	3,8	2,4
	ATR da base (mm)	18,4	1,7	0,8	1,0	10,2	10,5	1,2	0,4	1,8	0,4
	Ranqueamento	10	6	3	4	8	9	5	1	7	2
2	ATR total (mm)	16,5	4,1	3,7	3,9	7,7	6,1	4,0	3,5	4,3	3,6
	ATR da base (mm)	12,9	0,9	0,4	0,6	4,3	2,7	0,6	0,2	1,0	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
3	ATR total (mm)	16,4	5,3	5,0	5,2	7,2	5,9	5,2	4,9	5,5	5,0
	ATR da base (mm)	11,3	0,5	0,2	0,4	2,4	1,1	0,4	0,1	0,7	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
4	ATR total (mm)	23,3	3,5	2,8	3,0	12,6	11,6	3,2	2,4	3,9	2,4
	ATR da base (mm)	20,7	1,6	0,8	1,0	9,9	9,5	1,2	0,4	1,8	0,4
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
5	ATR total (mm)	22,4	4,1	3,7	4,0	7,6	6,1	4,0	3,5	4,4	3,6
	ATR da base (mm)	18,4	0,8	0,3	0,6	4,2	2,7	0,6	0,2	1,0	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
6	ATR total (mm)	25,6	5,3	5,0	5,3	7,1	6,1	5,2	4,9	5,6	5,0
	ATR da base (mm)	20,1	0,5	0,2	0,4	2,2	1,2	0,4	0,1	0,7	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	5	9	8	4	1	7	2
7	ATR total (mm)	58,7	3,6	2,9	3,1	11,8	9,9	3,3	2,5	4,1	2,5
	ATR da base (mm)	53,7	1,5	0,8	0,9	9,5	7,7	1,2	0,4	1,9	0,4
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
8	ATR total (mm)	45,2	4,2	3,8	4,0	7,4	6,3	4,0	3,6	4,6	3,8
	ATR da base (mm)	40,6	0,8	0,3	0,6	3,9	2,8	0,6	0,2	1,2	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
9	ATR total (mm)	35,6	5,3	5,1	5,3	7,0	6,9	5,3	5,0	5,7	5,0
	ATR da base (mm)	30,0	0,5	0,2	0,4	2,1	2,0	0,4	0,1	0,8	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	5	9	8	4	1	7	2
10	ATR total (mm)	42,9	4,3	2,9	3,3	15,2	17,8	3,6	2,3	4,6	2,4
	ATR da base (mm)	40,4	2,4	1,0	1,4	13,3	15,9	1,8	0,5	2,7	0,5
	Ranqueamento	10	6	3	4	8	9	5	1	7	2
11	ATR total (mm)	34,4	4,6	3,7	4,2	9,4	7,9	4,3	3,5	4,8	3,6
	ATR da base (mm)	30,7	1,3	0,5	0,9	6,1	4,6	1,0	0,2	1,6	0,3
	Ranqueamento	10	6	3	4	9	8	5	1	7	2
12	ATR total (mm)	33,6	5,6	5,0	5,4	8,2	6,8	5,4	4,9	5,9	5,0
	ATR da base (mm)	28,3	0,9	0,3	0,7	3,5	2,0	0,7	0,1	1,1	0,2
	Ranqueamento	10	6	3	5	9	8	4	1	7	2
13	ATR total (mm)	77,4	4,3	2,9	3,3	15,0	16,4	3,7	2,3	4,7	2,4
	ATR da base (mm)	72,9	2,4	1,0	1,4	13,0	14,5	1,7	0,5	2,8	0,5
	Ranqueamento	10	6	3	4	8	9	5	1	7	2

Observou-se também que os materiais classificados nas posições críticas estavam na energia normal, com exceção do material S9I. Geralmente, para a camada de base, compacta-se o material na energia modificada ou intermediária. Contudo, foram testados materiais nas diferentes energias para ressaltar a importância da estabilização mecânica na composição da camada de base. E, apesar de haver materiais em diferentes energias

de compactação, quando se comparam os materiais em uma única energia, a classificação entre eles se mantém em todos os cenários simulados. Com relação à variação na espessura da camada asfáltica, o valor de ATR na camada de base diminui à medida que a espessura da camada de revestimento aumenta. No entanto, o ATR total se eleva devido à inclusão da deformação na própria camada asfáltica, conforme contabilizado no modelo FlexPaveBR. Quando a espessura da base aumenta de 15 cm para 30 cm, observa-se um aumento geral no ATR, para as situações de MR igual a 293 MPa. Para o material S1N, esse acréscimo chega a 119%, atribuído à sua alta sensibilidade ao confinamento e ao MR médio adotado. Em contraste, para materiais como o S8I, o aumento foi limitado a 25%, representando a menor variação entre os materiais analisados. Ressalta-se que, embora a espessura da base tenha dobrado, o aumento correspondente no ATR não seguiu a mesma proporção. As variações estruturais e mudanças nos módulos de resiliência do subleito resultaram em classificações praticamente idênticas para os dez materiais na maioria dos cenários simulados. Essa consistência sugere que, independentemente das condições estruturais ou do subleito, os materiais com desempenho inferior tendem a manter classificações mais baixas em comparação aos demais. Nos casos em que houve variação de posição no ranqueamento, essa mudança foi limitada a uma posição, acima ou abaixo, indicando que o comportamento mecânico intrínseco de cada material permanece dominante mesmo em diferentes configurações de pavimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa investigou a viabilidade de classificar solos e materiais granulares com base em seu desempenho mecânico e na resposta à deformação permanente. Os resultados das simulações realizadas reforçam a necessidade de considerar o MR como uma função das tensões desviadora e confinante, e não como um valor constante. A adoção de um MR médio fixo pode conduzir a resultados inconsistentes, especialmente para materiais com elevada sensibilidade a componentes específicos de tensão no modelo de DP. Observou-se que, independentemente da estrutura do pavimento, materiais com desempenho insatisfatório na camada de base tendem a apresentar valores elevados de ATR em diferentes cenários. Dessa forma, é possível estabelecer um critério de seleção com base no valor médio de ATR, permitindo gerar um ranqueamento confiável entre os materiais. Ainda, é necessário realizar outros estudos, como a variação do tráfego e de outros tipos de materiais. Este estudo está em fase de aprimoramento e futuramente será analisado o comportamento para os materiais de sub-base, com validação a partir da aplicação de materiais em pistas experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Chamada Universal 01/2023, da Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio da Fapesp, processo n° 2024/11269-5, e do Cenpes/Petrobras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo. M.J.R.; Barroso, S.H.A.; Ribeiro, A.J.A.; Vieira, F.A.F. (2024) Definition of new stopping criteria for the characterization of permanent deformation of granular materials. Transportation Geotechnics, v. 44, p. 101159.

DNIT (2018) 179/2018-IE Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.

DNIT (2023) Manual de Ajuda: Programa MeDiNa, versão 1.1.6. Rio de Janeiro: IPR.

Ghanbari, A.; Underwood, B.S.; Kim, Y.R. (2020) Development of a rutting index parameter based on the stress sweep rutting test and permanent deformation shift model. International Journal of Pavement Engineering, v. 23, n. 2, pp. 387-399.

Guimarães, A. CR. (2009) Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Huang, Y. H. (2004) Pavement analysis and design. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.

Lima, C.D.A. (2020) Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Mota, B.C.; Ubaldo, M.O.; Lima, C.D.A.; Nascimento, L.A.H.; Aragão, F.T.S. (2024) Optimized characterization of the permanent deformation of unbound soils and granular materials considering the master curve concept. Transportation Geotechnics, v. 47, p. 101291.

bruno.mota@coc.ufrj.br; mariluce_ubaldo@yahoo.com.br; carolinedal@ufba.br; fthiago@coc.ufrj.br; luisnascimento@petrobras.com.br.

INTER-RELAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADE E RIGIDEZ DINÂMICA EM CAMADA POROSA DE ATRITO: SIMULAÇÃO NUMÉRICA E FUNDAMENTOS EXPERIMENTAIS

Mauro José da Silva Filho[1], Eulália Romão Barbosa[1], Aislan Nogueira Dutra[1], Paulo Regis Medeiros Passos[1], Iuri Sidney Bessa[1], Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos[1], Juceline Batista dos Santos Bastos[2], Jorge Barbosa Soares[1]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

RESUMO
A Camada Porosa de Atrito (CPA) é um tipo de revestimento superficial, caracterizado por sua estrutura permeável, que favorece o desempenho funcional. Este artigo analisou os efeitos da colmatação progressiva e das variações de temperatura no comportamento hidráulico e mecânico da CPA. Utilizou-se o Método dos Elementos Finitos para simular diferentes graus de obstrução dos poros e gradientes térmicos, calculando-se a velocidade de escoamento. A permeabilidade foi determinada com base na Lei de Darcy sob distintas condições. Complementarmente, a rigidez dinâmica foi avaliada por meio do ensaio de Ressonância por Impacto, considerando as temperaturas de 4,4; 20,0 e 38,8 °C. Os resultados demostraram que a colmatação reduz a permeabilidade, enquanto o aumento da temperatura contribui para a maior percolação e velocidade de fluxo. Observou-se relação inversa entre rigidez e permeabilidade. Os achados permitem uma avaliação integrada do comportamento termo-hidromecânico da CPA, auxiliando no aprimoramento de projetos e estratégias de manutenção.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Camada Porosa de Atrito (CPA) é um tipo de mistura asfáltica para revestimento de pavimentos de caráter multifuncional, composta predominantemente por agregados de granulometria aberta e baixa presença de finos. Essa configuração promove altos volumes de vazios (entre 18 e 25%), permitindo a drenagem da água superficial. Além disso, a CPA melhora a aderência pneu-pavimento, diminui o risco de aquaplanagem e contribui para a atenuação de ruídos, além de auxiliar na mitigação da ilha de calor urbano (De Pascale *et al.*, 2023). No entanto, essa capacidade funcional pode ser comprometida ao longo do tempo com a colmatação dos vazios, processo resultante da deposição de partículas sólidas, sedimentos e deformações (Chen *et al.*, 2015), constituindo-se, portanto, no principal gargalo para o uso mais difundido desse tipo de revestimento (Zhang *et al.,* 2017). Com o avanço das pesquisas, o problema da obstrução dos vazios deixou de ser analisado apenas em escala macroscópica e passou a ser investigado também ao nível microestrutural (Shi *et al.*, 2024). Estudos recentes têm recorrido à Tomografia Computadorizada para examinar a microestrutura dos vazios, quanto à distribuição, conectividade e uniformidade (Chen *et al.*, 2020). Apesar desses avanços, ainda persistem desafios quanto à compreensão dos mecanismos de colmatação, especialmente no que tange à busca pela inter-relação entre um parâmetro estrutural (e.g., rigidez) e as propriedades funcionais do pavimento poroso. Esse aspecto torna-se ainda mais relevante quando se considera que a rigidez das misturas varia de acordo com a temperatura, que também influencia no desempenho hidráulico dessas misturas.

A consideração da temperatura na modelagem numérica do escoamento em pavimentos porosos é fundamental, uma vez que esse parâmetro afeta diretamente tanto as propriedades do fluido quanto o comportamento mecânico da mistura asfáltica. Em particular, a viscosidade dinâmica da água (parâmetro na Lei de Darcy) apresenta forte dependência da temperatura, influenciando diretamente a velocidade de escoamento e, consequentemente, a eficiência do processo de drenagem em estruturas porosas (Kaviany, 2012). Além disso, o módulo de rigidez dinâmica das misturas asfálticas é sensível às variações térmicas, o que pode alterar a configuração interna dos poros, a conectividade da matriz granular e o desempenho mecânico da camada porosa ao longo do tempo (Barbosa *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2024). Considerando que os pavimentos em campo estão sujeitos a condições climáticas variáveis, a incorporação do efeito térmico na simulação numérica permite uma avaliação mais realista e robusta do desempenho hidromecânico do sistema.

Diante desse cenário, este artigo objetiva integrar a modelagem numérica do escoamento em misturas asfálticas porosas, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), à avaliação experimental da rigidez dinâmica, obtida por meio do ensaio de Ressonância por Impacto (RI) (Carret e Babadopulos, 2025). A modelagem buscou simular diferentes níveis de obstrução dos poros, analisando suas implicações no fluxo hidráulico interno da mistura (conforme indicado pela velocidade do fluxo calculada). A análise conjunta do comportamento hidráulico e mecânico visa representar, de forma mais realista, o comportamento da CPA em condições de campo e contribuir para o aprimoramento das estratégias de projeto e manutenção dos pavimentos

porosos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção dos valores de velocidade de escoamento em simulações, buscou-se estabelecer uma relação qualitativa desta velocidade com a rigidez do material, medida experimentalmente por meio do ensaio de RI para um corpo de prova de CPA produzido com 4,5% de ligante asfalto borracha (AB08) e moldado com 57,5 mm de altura x 100,2 mm de diâmetro), denominado de CPA1. As informações volumétricas do CPA1 constam na Tabela 1. A viscosidade dinâmica da água foi modificada a depender da temperatura de teste, com valores de 1,518 × 10^{-3} Pa.s para 4,4 °C, 1,002 × 10^{-3} Pa.s para 20,0 °C e 0,653 × 10^{-3} Pa.s para 37,8 °C. A massa específica da água é constante de 1.000 kg/m³.

Tabela 1: Propriedades da mistura asfáltica

Descrição	Valor
Volume de vazios (%)	23,0
Massa específica (kg/m³)	1.803,0

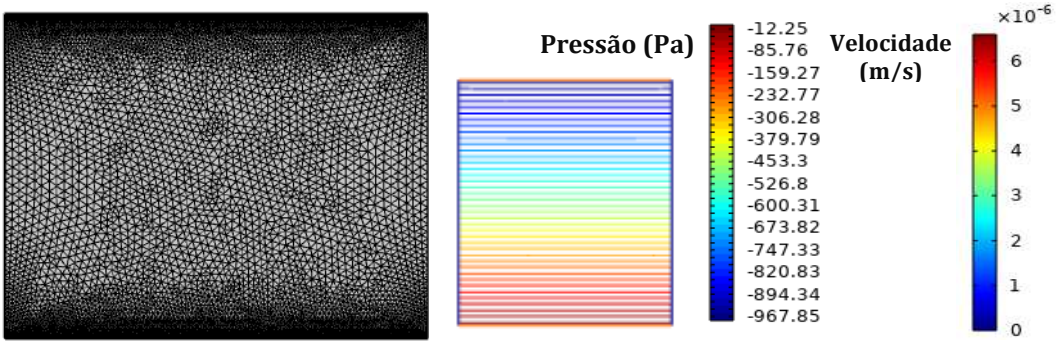
2.1. Modelagem no COMSOL

Este estudo foi conduzido com base em modelagem numérica computacional utilizando o software COMSOL Multiphysics®, com o objetivo de investigar o comportamento do escoamento de água em um corpo de prova de CPA submetido a diferentes graus de colmatação (Tabela 2). Os valores utilizados nas simulações estão coerentes com os observados por Akhtar *et al.* (2021) e Shi *et al.* (2024).

Tabela 2: Coeficiente de permeabilidade de acordo com os graus de colmatação

Graus de Colmatação	Permeabilidade intrínseca, k (m^2)
Sem colmatação	4,09E-11
Leve	2,05E-11
Moderada	1,02E-11
Intensa	5,12E-12
Severa	1,02E-12

Foi considerada uma geometria bidimensional representativa da CPA1 (Figura 1). A física aplicada foi a Lei de Darcy (fluxo de um fluido através de um meio poroso), com entrada de fluido pela face superior do domínio e saída pela face inferior. As demais bordas foram tratadas com condição de contorno tipo livre, sem restrições de fluxo (exceto em testes comparativos onde se aplicou a condição "*No Flow*"). A malha usada nas simulações foi definida como extrafina, garantindo maior precisão na solução do campo de fluxo no meio poroso.



(a) (b)

Figura 1: (a) Malha extrafina utilizada e (b) perfil de distribuição de pressão e velocidade na modelagem

Nesta modelagem, a colmatação foi imposta de forma homogênea em todo o domínio poroso, alterando-se o valor da permeabilidade para representar diferentes estágios de obstrução interna (Tabela 2). Embora essa abordagem resulte em uma condição idealizada, permitiu analisar o comportamento do escoamento sob diferentes níveis de colmatação, temperaturas e viscosidade da água de acordo com as condições de simulação. As análises foram realizadas inicialmente em regime estacionário, com posterior comparação com simulações

dependentes do tempo. A pressão aplicada no topo da amostra foi de 980 Pa, equivalente a uma coluna de água de 10 cm. Foram avaliados os campos de pressão e magnitude da velocidade de Darcy em diferentes temperaturas (4,4; 20,0; 37,8 °C) e condições de colmatação. O uso do MEF foi fundamental para visualizar o campo de velocidades internas e os efeitos acoplados da variação térmica e da viscosidade da água no interior da estrutura porosa.

2.2. Ressonância por impacto (RI)

O ensaio de RI (Figura 2a) mostra o equipamento utilizado nesta pesquisa e tem como base as pesquisas de Carret *et al.* (2018); Bezerra *et al.* (2022) e Silva Filho *et al.* (2024). A medição da rigidez do material se dá colocando inicialmente as amostras sobre uma espuma, com suas faces retificadas para melhor posicionamento do acelerômetro e impacto do martelo. A ação mecânica do martelo consiste em realizar cinco impactos que excitam a amostra no sentido longitudinal em direção ao acelerômetro, com a intensidade da força sendo medida no domínio do tempo (Figura 2b). Cada golpe tem aproximadamente 300 ms e são aferidos os resultados do sinal de saída do acelerômetro, no domínio do tempo (Figura 2c). Ambos os dados do domínio do tempo são convertidos para o domínio da frequência (Figuras 2d e 2e) através de uma Transformada Rápida de Fourier (TRF). Com os dados medidos, é feita uma razão entre os dados de saída pelos dados de entrada e se obtém uma Função de Resposta de Frequência (FRF), como a mostrada na Figura 2f. Para as misturas analisadas, o teste de ressonância por impacto foi efetuado em três temperaturas: 4,4; 20,0 e 37,8 °C.

A obtenção do módulo de rigidez dinâmica das misturas asfálticas porosas necessitou também do auxílio de um software de elementos finitos para realização de uma modelagem para obtenção da FRF otimizada a partir da variação de parâmetros do modelo reológico 2S2P1D (Di Benedetto *et al.,* 2004; Gudmarsson *et al*., 2012; Carret *et al.,* 2018; Bezerra *et al*., 2022; Barbosa *et al.,* 2024).

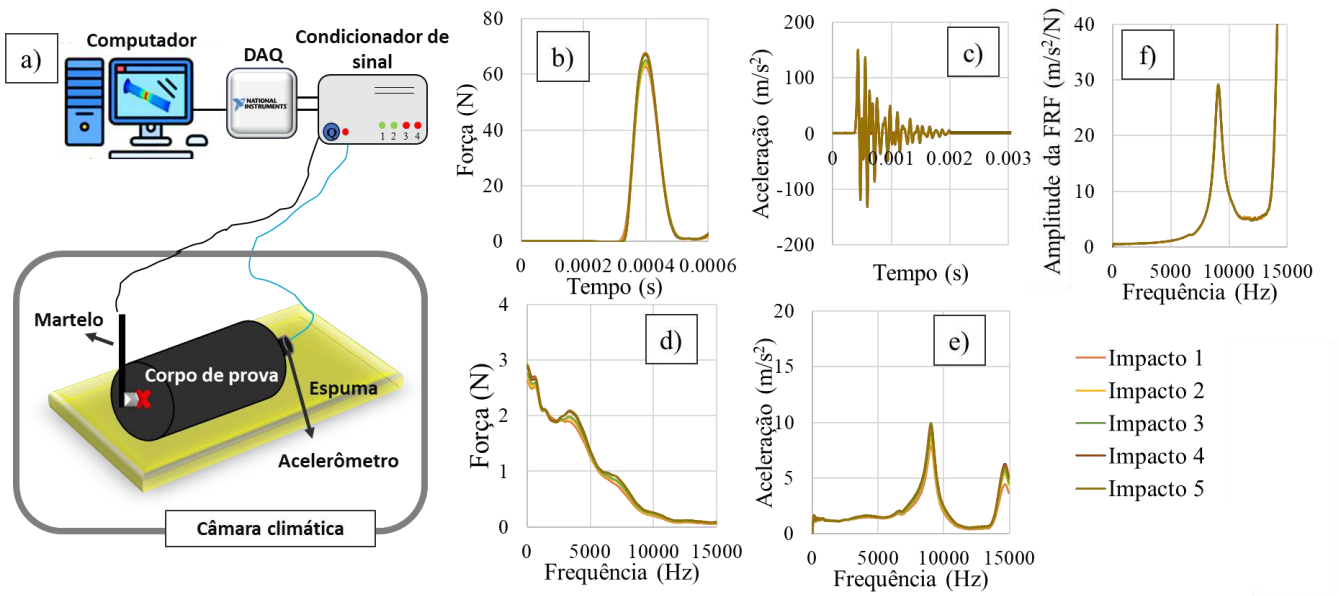


Figura 2: a) Esquema do ensaio de RI; b) Sinal de força medido no martelo no domínio do tempo; c) Leitura da aceleração do sistema com o acelerômetro no domínio do tempo; d) TRF do sinal do martelo; e) TRF do acelerômetro; f) FRF

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA ANÁLISE TERMOHIDROMECÂNICA DA COLMATAÇÃO PROGRESSIVA EM CPA COM BASE NA RIGIDEZ E NA TEMPERATURA

Com a adoção de diferentes valores de permeabilidade correspondentes aos graus de colmatação, observou-se, na Figura 3a uma redução progressiva da velocidade de infiltração. Para cada nível de obstrução, verificou-se que o aumento da temperatura promove maiores velocidades de escoamento, sendo esse efeito mais pronunciado na condição sem colmatação. Nessa situação, a velocidade superou 4,71 × 10^{-4} m/s a 37,8 ºC enquanto a 4,4 °C permaneceu abaixo de 2,02 × 10^{-4} m/s. Tal comportamento pode ser atribuído à redução da viscosidade do fluido em temperaturas elevadas, além da redução da rigidez da mistura asfáltica, conforme

indicado na Figura 3b, o que favorece o escoamento através da estrutura porosa. Contudo, mesmo sob temperaturas elevadas, os estados de colmatação intensa e severa resultam em velocidades próximas a zero, evidenciando uma perda da capacidade drenante. Resultados semelhantes foram reportados por Akhtar *et al.* (2025), que observaram uma redução de permeabilidade de 0,394 cm/s para 0,245 cm/s ao longo de um ano sob efeitos ambientais e do tráfego. Isso indica que a obstrução progressiva dos vazios compromete a funcionalidade hidráulica das camadas porosas, ressaltando a importância de estratégias preventivas de manutenção, especialmente em contextos climáticos variáveis, nos quais a temperatura influencia diretamente o comportamento funcional do sistema.

Valores obtidos neste artigo são consistentes com os reportados por Barbosa *et al.* (2024), que identificaram módulos típicos de rigidez dinâmica para misturas do tipo CPA variando entre 5.000 MPa a 37,8 °C e 10.000 MPa a 4,4 °C evidenciando uma queda acentuada da rigidez com o aumento da temperatura. É importante ressaltar que os valores de rigidez calculados utilizaram os valores obtidos de frequência ressonante e amplitude da FRF com ajuste de parâmetros no modelo reológico 2S2P1D. Além disso, na situação descrita, os valores são obtidos experimentalmente e associados aos dados simulados, então o estágio de colmatação no corpo de prova recém-moldado foi assumido como sem colmatação (0%). Esses resultados corroboram a sensibilidade térmica das misturas asfálticas, que no caso específico da CPA podem ter maior influência sobre o comportamento hidráulico. Conforme ilustrado na Figura 3b, observa-se uma redução da velocidade da permeabilidade da água à medida que a rigidez aumenta, efeito associado à diminuição da temperatura.

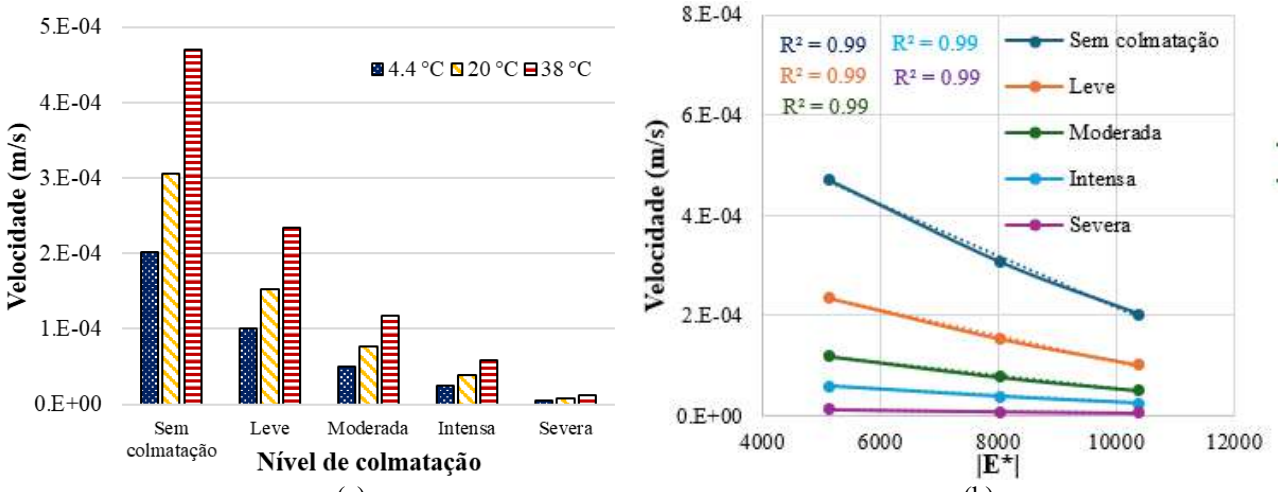


Figura 3: Velocidade de escoamento em diferentes níveis de: (a) colmatação e temperatura e (b) colmatação e rigidez

4. CONCLUSÕES

Investigou-se por meio de modelagem numérica no COMSOL Multiphysics os efeitos da colmatação progressiva e da variação da temperatura sobre a eficiência hidráulica de mistura asfáltica do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA). Os resultados indicaram que o aumento do nível de colmatação compromete significativamente a permeabilidade, enquanto a elevação da temperatura favorece o escoamento, atribuída à redução da viscosidade dinâmica da água. Adicionalmente, observou-se uma correlação inversa entre o módulo de rigidez dinâmica, obtido experimentalmente por meio de ensaio de Ressonância por Impacto, e a velocidade de infiltração, evidenciando que a colmatação pode afetar simultaneamente o comportamento funcional e mecânico da mistura.

Essa interação entre propriedades funcionais (permeabilidade e escoamento) e estruturais (rigidez dinâmica) reforça a necessidade de se considerar efeitos termo-hidromecânicos na análise, no dimensionamento e na gestão de pavimentos com camadas porosas. Embora os resultados tenham sido obtidos em ambiente controlado, apresentam concordância com a literatura e oferecem subsídios para o aprimoramento de projeto e estratégias de manutenção, especialmente em contextos sujeitos a variações térmicas significativas ou à obstrução progressiva dos vazios.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto 405958/2023-4, e ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) pelo apoio aos autores por meio de bolsas de pesquisa e subsídios. Agradecem também ao projeto Cientista Chefe em Infraestrutura Viária do Tribunal de Contas do Estado do Ceará (TCE-CE) pelo apoio institucional e técnico, viabilizando parte das simulações e análises aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akhtar, M. N.; O. Albatayneh.; J, N. Akhtar e S. Koting. (2025) Porous asphalt pavement design by incorporating recycled coarse aggregate for sustainable urban drainage: An experimental study. *Results in Engineering*, v. 25, p. 103751. Doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103751.

Akhtar, M. N.; A. M. Al-Shamrani.; M. Jameel.; N. A. Khan.; Z. Ibrahim e J. N. Akhtar. (2021) Stability and permeability characteristics of porous asphalt pavement: an experimental case study. *Case Studies In Construction Materials*, v. 15, p. 591. Doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00591.

Barbosa, E.; L, Lira.; M. Silva Filho.; L. Babadopulos.; J. Soares.; G. Santos e J. Bastos. (2024) Mechanical Analysis through Non-Destructive Testing of Recycled Porous Friction Course Asphalt Mixture. *Buildings*, v. 14, n. 9, p. 2907–2907. Doi.org/10.3390/buildings14092907.

Bezerra, A. K. L.; N. C. Monteiro.; C. C. Amaral.; A. Augusto da P. Coelho.; J. A. N. Silveira.; L. F. de A. L. Babadopulos e J. B. Soares. (2022) Desenvolvimento de ensaio de ressonância por impacto para determinação de rigidez de diferentes materiais. *Revista Transportes*, v. 30, n. 3, p. 2757. Doi.org/10.14295/transportes.v30i3.2757.

Carret, J-C e L. F. de A. L. Babadopulos. (2025) Opening letter of RILEM TC MWP: Mechanical wave propagation to characterize bituminous mixtures. RILEM Tech Lett 10:15–21. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2025.211.

Carret, J. C.; A. Pedroza.; H. D. Benedetto e C. Sauzeat. (2018) Comparison of the 3-dim linear viscoelastic behavior of asphalt mixes determined with tension-compression and dynamic tests. *Construction and Building Materials,* v. 174, n. 20 p. 529-536. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.156.

Chen, J.; H. Li.; X. Huang e J. Wu. (2015) Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering,* v. 27, n. 11, p. 04015023. Doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001282.

Chen, J.; J. Wang.; H. Wang.; P. Xie e L. Guo. (2020) Analysis of Pore Characteristics and Flow Pattern of Open Graded Asphalt Mixture in Different Directions. *Journal of Materials in Civil Engineering,* v. 32, n. 9, p. 04020256. Doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003342.

Di Benedetto, H.; F. Olard.; C. Sauzéat e B. Delaporte. (2004) Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: from binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, London, v. 5, n. 1, p. 163–202.

De Pascale, B.; P. Tataranni.; C, Lantieri.; A, Bonoli e V, Vignali. (2023). Mechanical performance and environmental assessment of porous asphalt mixtures produced with EAF steel slags and RAP aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 400, n. 12, p. 132889–132889. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132889.

Gudmarsson, A.; N. Ryden.; B. Birgisson. (2012) Characterizing the low strain complex modulus of asphalt concrete specimens through optimization of frequency response functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Melville,* v. 132, n. 4, p. 2304–2312, DOI 10.1121/1.4747016.

Kaviany, M. (2012) *Principles of Heat Transfer in Porous Media* (2nd ed.). Springer.

Silva Filho, M. J.; L. F. de A. L. Babadopulos.; J. C. Carret e J. B. Soares. (2024) influence of test configuration parameters on the results of impact resonance tests for stiffness determination. In anais do 38° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Florianópolis, SC). ANPET, vol. 3, p. 311605.

Shi, Y., H. Zhang e S. Zhao. (2024) Evolution of microstructural characteristics of porous asphalt mixture under progressive clogging and its effect on drainage performance. *Construction and Building Materials*, v. 441, n. 30, p. 137572–137572. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137572.

Shi, Y. X.; X. Chen.; B. Huang e Y. Zhang. (2024) Investigation of microstructural clogging mechanisms in porous asphalt pavement using X-ray CT and numerical simulations. *Construction and Building Materials*, v. 406, p. 132535. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137572.

Zhang, J.; X. Cui.; L. Li e D. Huang. (2017) Sediment transport and pore clogging of a porous pavement under surface runoff. *Road Materials and Pavement Design,* 18(sup3), 240–248. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1329878.

Mauro José da Silva Filho (mauro.silva@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia dos Transportes, Av. Humberto Monte, SN, Pici, Fortaleza, CE, Brasil.

METODOLOGIA PARA TRADE-OFF NA OTIMIZAÇÃO DE PAVIMENTOS FERROVIÁRIOS UTILIZANDO SOFTWARE SYSTRAIN

A.C. Guimarães[1], G. Nascimento[2], D. F. Pires [3], J. D. Azevedo[3], K. A. Costa[3], P. F. Macedo[3], R. C. Virgílio[3]
[1]Instituto Militar de Engenharia (IME), [2]Universidade Federal Fluminense (UFF), [3]Vale S.A.

RESUMO
Este trabalho apresenta uma metodologia de otimização estrutural de pavimentos ferroviários voltada para contextos tropicais, com ênfase na análise de *trade-offs* por meio do *software* SysTrain. A abordagem considera variáveis críticas em projetos conceituais da via permanente, como espaçamento entre dormentes, espessuras de lastro e sublastro, entre outros, incorporando as particularidades geotécnicas dos solos tropicais. Reconhecendo as limitações da equação clássica de Heukelom e Klomp (1962) na estimativa de tensões admissíveis, adotou-se a formulação proposta por Folly (2025). O SysTrain foi aprimorado para integrar essa nova modelagem e permitir análises paramétricas robustas, simulando múltiplos cenários de projeto. A metodologia de *trade-off* proposta visa apoiar decisões técnicas quanto à seleção de materiais e premissas de dimensionamento, promovendo maior precisão e aderência às condições locais. Os resultados demonstram ganhos significativos em acurácia, flexibilidade e aplicabilidade, contribuindo para soluções ferroviárias mais eficientes, sustentáveis e economicamente otimizadas.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento estrutural de pavimentos ferroviários em contextos tropicais exige abordagens que considerem as complexidades tanto da superestrutura e da infraestrutura ferroviária. Nesse cenário, a tomada de decisão nas fases iniciais do projeto torna-se crítica, especialmente diante da necessidade de avaliar múltiplas combinações de parâmetros como espaçamento entre dormentes, espessuras de lastro e sublastro, e características do subleito. A análise paramétrica surge como ferramenta estratégica para explorar cenários alternativos e compreender os *trade-offs* estruturais envolvidos, permitindo ao projetista identificar soluções mais eficientes e adaptadas às condições locais.

Outro aspecto fundamental na análise paramétrica de pavimentos ferroviários é a capacidade de suporte do subleito, diretamente relacionada à resposta mecânica dos solos sob carregamentos repetitivos. Em regiões tropicais como o Brasil, predominam solos com comportamento não linear, elevada variabilidade geotécnica e presença de materiais lateríticos, o que impõe desafios adicionais ao dimensionamento estrutural da via permanente. Estudos como o de Sousa et al. (2021) evidenciam que, em diversos solos brasileiros, o módulo resiliente tende a diminuir com o aumento das tensões aplicadas, indicando sensibilidade à magnitude dos carregamentos. Essa característica pode resultar em deformações excessivas sob tráfego ferroviário de alta carga, como neste estudo, exigindo intervenções frequentes de manutenção, como ciclos de socaria para restabelecimento do nivelamento da linha.

A equação de Heukelom e Klomp (1962), tradicionalmente utilizada para estimar tensões admissíveis, foi desenvolvida para solos de regiões temperadas e apresenta limitações significativas quando aplicada a solos tropicais, que exibem elevada rigidez e comportamento não linear sob carregamentos repetidos. Diante dessas limitações, este estudo aplicou nas análises paramétricas a abordagem da equação empírica de Folly (2025), que relaciona tensão admissível ao limite de deformação via regressão não linear, considerando classificações geotécnicas (MCT, SUCS, HRB e lateritas). Essa equação foi integrada ao SysTrain, que simula o comportamento estrutural da via por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Dessa forma, este estudo propõe uma metodologia baseada em simulações paramétricas utilizando o *software* SysTrain, aprimorado para incorporar a equação empírica de Folly (2025), voltada à estimativa de tensões admissíveis em solos tropicais. A integração dessa formulação ao modelo estrutural, aliado à capacidade de simular múltiplos cenários, viabiliza uma análise sistemática dos impactos de diferentes premissas de projeto. A abordagem permite maior precisão no dimensionamento da via permanente, promovendo decisões técnicas mais robustas e alinhadas à sustentabilidade, eficiência operacional e realidade geotécnica brasileira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Banco de Dados

Nesta etapa objetivou-se descrever de forma breve o procedimento para formação e ampliação do banco de dados de ensaios de módulo de resiliência e de deformação permanente em solos, para fins de disponibilização dos dados no *software* SysTrain.

O banco de dados utilizado baseia-se na tese de doutorado de Lima (2020), complementado por ensaios realizados pelos autores desse trabalho. A base contempla a caracterização tradicional de solos, a classificação MCT (d', e',c' e Pi), parâmetros k_1, k_2 e k_3 do ensaio de módulo resiliente e constantes ψ_1, ψ_2, ψ_3 e ψ_4, bem como o coeficiente de determinação (R^2) para ensaio de deformação permanente. Para organização dos dados, adotaram-se os sistemas MCT (solos finos, com base em Nogami e Villibor (1995), SUCS e HRB (solos granulares) e, para lateritas, a classificação de Guimarães et al. (2024). O conjunto inclui 64 materiais: 37 solos finos, 15 britas graduadas, além de saibro, solo-brita e escória de aciaria. As britas são graníticas, com variações em MEAS e compactação. Para lateritas, a referência utilizada foi Guimarães et al (2024), levando em conta 8 tipos, embora apenas uma classificação tenha sido implementada até o momento. Para materiais sem sistema específico, a classificação foi feita segundo o HRB.

2.2. Equação Admissível

Os projetos de pavimentos ferroviários atuais adotam como referência para tensões admissíveis nas camadas de solos do pavimento a equação de Heukelon e Klomp, que data de um artigo publicado em 1962. Tal equação é dada pela expressão (1) abaixo.

$$\sigma_{v,m\acute{a}} = \frac{0{,}006MR}{1+0{,}7\log(N)} \quad (1)$$

Onde: σ = tensão vertical admissível; MR = resiliência; N= número de ciclos de carga.

Na equação tradicional, os parâmetros MR (módulo de resiliência) e N (número de ciclos de carga) não são bem definidos, o que pode gerar inconsistências nos projetos. O ponto crítico está no valor de MR, que em solos tropicais — especialmente lateritas — pode atingir até 650 MPa, resultando em tensões admissíveis superestimadas, superiores àquelas observadas em laboratório. Isso ocorre porque a equação de Heukelom foi desenvolvida com base em solos britânicos, de menor rigidez. Além disso, o valor de N refere-se à repetição de uma carga padrão rodoviária (8,2 tf), inexistente no contexto ferroviário. Como não há uma carga padrão para trilhos, não é possível converter adequadamente para ciclos de carga ferroviários. Essa limitação pode levar ao superdimensionamento em vias com cargas leves e ao subdimensionamento em ferrovias do tipo *heavy haul*.

Este estudo seguiu o normativo interno da Vale S.A. para determinação do número N, apresentado na equação (2) abaixo:

$$N = [(Lxe_l) + (Vx1_v)]xCxDxA \quad (2)$$

Onde: N = nº de ciclos de carga; L = nº de locomotivas por composição; e_l = nº de eixos por locomotiva; V = nº de vagões por composição; e_v = nº de eixos por vagão; C = nº de composições diárias (carregada + descarregada); D = nº de dias trabalhados por dia; A = período de projeto (30 anos).

Sendo assim, este trabalho buscou utilizar a equação (3) discutida e apresentada por Folly (2025) e apresentada no estudo de Folly e Guimarães (2025) para incorporação no *software* Systrain. Esta equação define tensões admissíveis para 2 e 5 mm de deformação em um corpo de prova de 200 mm. Para este estudo foi utilizado o valor de tensão admissível para 5 mm.

$$\frac{\sigma_d^{solo}}{\rho_0} = k_1 \cdot {\varepsilon_p}^{k_2} \quad (3)$$

Onde: σ_d = tensão desvio; ρ_0 = tensão de referência (1 kgf/cm²); ε_p = deformação permanente; k_1 e k_2 = constantes empíricas ajustadas experimentalmente para a tensão admissível em solos, conforme a classificação MCT.

2.3. Systrain

O SysTrain 2.0 é uma ferramenta computacional para dimensionamento de pavimentos ferroviários, baseada em *Computer Aided Engineering (CAE)* e no Método dos Elementos Finitos (MEF), que simula o comportamento estrutural sob cargas de vagões, incluindo trilhos, dormentes e camadas. A versão utilizada nesse estudo foi a 2.04 incorpora análise de shakedown (acomodamento de deformações permanentes), cálculo de tensão admissível segundo Heukelom e Klomp (1962) e Folly (2025), banco de dados de solos e recursos de análise paramétrica, aplicáveis desde anteprojetos até projetos executivos.

2.4. Análise Paramétrica

Na versão 2.0 do SysTrain, cada cenário era simulado e avaliado separadamente. O presente estudo, visando facilitar análises preliminares (como *trade-offs* e anteprojetos), foi implementado um recurso que permite simular múltiplos cenários de forma integrada, com entrada e análise simplificadas dos parâmetros variáveis. Entre os parâmetros ajustáveis estão o perfil do trilho, alturas de lastro, sublastro e reforço, além do espaçamento e geometria dos dormentes. A análise paramétrica é realizada conforme os seguintes passos:

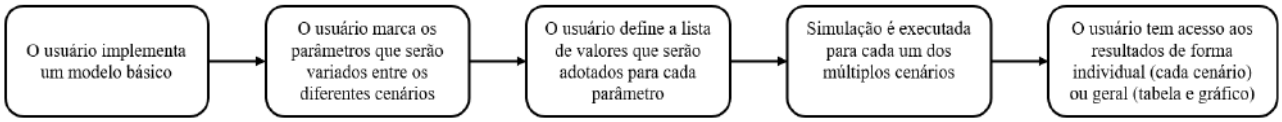


Figura 1: Etapas para realização da análise paramétrica (Autores, 2025).

Após as simulações o usuário do *software* poderá acessar os resultados de 3 formas distintas: (i) cenário específico, ou seja, após a análise paramétrica o usuário pode escolher um cenário para análise individual, acessando os resultados por meio da interface padrão, como gráficos 3D, gráficos de dispersão com abcissas e ordenadas escolhidas e resumos; (ii) tabela comparativa dos resultados da simulação paramétrica apresentado a tensão máxima no trilho, deflexão no trilho, tensão máxima na interface dormente-lastro, tensão desviatória máxima, razão entre tensão desviatória máxima e o limite admissível com base nos critérios disponíveis, ou seja, Heukelom-Klomp, *Shakedown* e/ou Folly (2025); (iii) gráficos de dispersão com abcissas e ordenadas escolhidas, relacionando um ou mais dos resultados com um dos parâmetros variados.

2.5. Características Técnicas

Os dados selecionados para a análise paramétrica foram obtidos por meio de um projeto *greenfield* da Vale S.A. para uma ferrovia tipo *heavy haul* no estado do Espírito Santo e são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Premissas de Operação

Item	Alça
Velocidade Máxima Operacional	65 km/h
Trem Tipo	3 locomotivas + 172 vagões
Vagão	Gôndola
Locomotiva	DASH-9 (GE)
Número trens/dia	9 pares
Dias de operação por ano	365
Período do Projeto	30

Tabela 2: Premissas de Superestrutura

Item	Alça
Bitola	Métrica
Trilho	TR-68
Comprimento dos Trilhos (TLS)	216 m
Dormentes	Monobloco de Concreto
Espaçamento entre Dormentes	54, 55, 57, 60, 62 e 65 cm
Dimensões Dormente (comp. x larg. sup. x alt.)	220 x 19 x 25 cm
Fixação	Elástica (Fast Clip)
AMV's	1:20 1:10
Altura Lastro	30 e 25 cm
Ombro Lastro	40 cm

Item	Alça
Altura Sublastro	30 e 20 cm
Ombro Sublastro	100 cm

As locomotivas utilizadas são do tipo DASH-9 (GE) com 4 eixos e os vagões tipo Gôndola (2 eixos) com 2 truques subsequentes representando a situação mais desfavorável à via. O número N foi calculado por meio da equação (2) é $N = 1,4 \times 10^8$, a carga simulada foi de 27,5 t por eixo, e o coeficiente dinâmico $C_d = 1,45$. As simulações no software utilizam nas análises os coeficientes k_1, k_2 e k_3 do ensaio de MR, bem como os ψ_1, ψ_2, ψ_3 e ψ_4 do ensaio de DP por meio do banco de dados incorporado. O solo utilizado para as análises do sublastro foi o Laterítico Arenoso - LA' do banco de dados incorporado enquanto o subleito utilizou o Não Laterítico Siltoso - NS' por meio de um ensaio realizado em determinado projeto da Vale S.A. Foram simuladas na análise paramétrica as variações de espessuras de lastro (30 e 25 cm), sublastro (20 e 30 cm) e espaçamento de dormente (60 e 65), os cenários para cada combinação de análise estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Cenários da análise paramétrica

Cenário	Espaçamento de dormentes (cm)	Altura do lastro (cm)	Altura do sublastro (cm)
1	60	25	20
2	60	30	20
3	65	25	20
4	65	30	20
5	60	25	30
6	60	30	30
7	65	25	30
8	65	30	30

3. RESULTADOS

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para o cenário no centro do dormente, para cada análise realizada, para cada cenário. Neste estudo, foram avaliados a tensão e deslocamento no trilho, pressão de contato entre dormente e lastro, tensão desviatória máxima (S_d) e tensões admissíveis (S_{adm}) por Heukelom-Klomp e Folly (2025), sendo as tensões de compressão representadas por valores negativos.

Tabela 4: Resultados da análise paramétrica

Cenário	Trilho Máx. Tensão (MPa)	Trilho Máx. Desloc. (mm)	Lastro Máx. Press. (kPa)	Lastro Máx. Sd (kPa)	Sublastro Máx. S_d (kPa)	Sublastro Máx S_{adm} Heukelom (kPa)	Sublastro Máx Sd/Sadm Folly 2025 (kPa)	Subleito Máx Sd (kPa)	Subleito Sadm Heukelom (kPa)	Subleito Máx Sadm Folly 2025 (kPa)
1	-133,65	3,40	165,51	-140,63	-73,68	-263,14	-566,77	-67,36	-53,46	-396,02
2	-133,31	3,38	153,92	-132,98	-71,72	-265,63	-551,69	-66,01	-53,67	-369,06
3	-126,10	3,51	167,07	-142,39	-74,67	-266,68	-574,38	-67,88	-53,03	-377,77
4	-126,00	3,49	155,14	-134,42	-72,23	-267,52	-555,62	-66,50	-53,63	-374,82
5	-132,97	3,35	161,39	-138,10	-75,03	-267,96	-577,15	-64,78	-53,98	-353,35
6	-132,67	3,33	150,31	-130,59	-72,97	-270,26	-561,31	-63,49	-54,73	-350,71
7	-125,92	3,46	162,70	-139,46	-77,16	-257,20	-551,14	-65,21	-53,89	-358,66
8	-125,83	3,44	151,43	-131,69	-74,41	-265,75	-572,38	-63,88	-54,60	-339,73

É possível observar que os valores em todos os cenários variados ficaram abaixo dos limites admissíveis disponíveis em normas. O deslocamento máximo no trilho observado foi de 3,51mm para o cenário 3 e o limite admissível conforme AREMA (2013) é 6,35 mm. O maior valor de pressão de contato dormente-lastro encontrado foi de 167,07 kPa, e o limite admissível conforme AREMA (2007) é de 586 kPa. Considerando as tensões nas camadas da infraestrutura ferroviária, é possível observar que para o subleito os valores de tensão admissível por Heukelom e Klomp (1962) foram, em todos os cenários analisados, menores que as tensões atuantes na ordem de S_d/S_{adm} de 1,22 e neste caso demandando uma camada de reforço para o subleito, enquanto para Folly (2025) a razão S_d/S_{adm} ficou na ordem de 0,22, ou seja, esta camada de reforço não é necessária.

Também é possível notar nos resultados obtidos dos diversos cenários analisados que variar a estrutura do pavimento não trouxe diferenças significativas na pressão dormente lastro, bem como nas tensões sobre as camadas de sublastro e lastro, o que permite ao projetista realizar otimizações já na fase de anteprojeto como por exemplo a redução na taxa de dormentes aplicados, diminuição do volume de lastro e de sublastro.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta neste estudo demonstrou-se eficaz na otimização de pavimentos ferroviários. A análise paramétrica permitiu simular múltiplos cenários de projeto, promovendo maior flexibilidade e precisão no dimensionamento estrutural da via permanente para projetos conceituais. Os resultados obtidos indicaram que as variações entre os diferentes cenários analisados foram pouco significativas, o que permite certa liberdade na escolha de componentes da superestrutura.

Em relação às tensões sobre a infraestrutura, percebeu-se que ao incorporar a equação de tensão admissível de Folly (2025) ao *software* SysTrain, a partir de um banco de dados robusto com 64 materiais que inclui solos finos, britas e lateritas, foi possível calibrar modelos mais representativos das condições geotécnicas brasileiras. Essa abordagem representa um avanço tendo em vista que esta equação leva em consideração os dados dos ensaios para cada tipo de solo da classificação MCT. Cabe ressaltar que os valores de tensões admissíveis obtidas pela equação de Folly (2025) a partir dos solos incorporados no banco de dados podem ser relativamente altas para um solo tipo NS'. Para ajuste desta equação em trabalhos futuros é necessário maior incorporação de solos e ensaios de MR e DP de variados tipos de solos brasileiros no banco de dados. Os resultados aqui apresentados contribuem para soluções mais econômicas e adaptadas às realidades locais, mantendo os critérios de segurança e durabilidade exigidos para ferrovias de carga pesada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREMA – American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. *Manual for Railway Engineering*. Volume 1: Track. Landover, MD: AREMA, 2007.

AREMA, American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. *Manual for Railway Engineering*. Volume 1: Track. Landover, MD: AREMA, 2013.

Folly, P.O. Considerações Sobre as Tensões Admissíveis em Solos Constituintes de Pavimentos Ferroviários. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2025.

Folly, P.O & Guimarães, A. C. R. Considerações sobre as tensões admissíveis em solos constituintes de subleitos de pavimentos ferroviários. Revista de Gestão e Secretariado – GeSec, V. 16, N. 1, P. 01-14, 2025 1 São José dos Pinhais, Paraná, Brasil. 2025. DOI: http://doi.org/10.7769/gesec.v16i1.4518.

Guimarães, A. C. R., Almeida, B. D., SOARES, J. S. Uma Proposta de Classificação de Lateritas Considerando Resultados de Ensaios de Deformação Permanente e Módulo de Resiliência. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2024, Balneário Camboriú/SC. Anais do XXI do COBRAMSEG, 2024.

Heukelom, W. & Klomp, A.J.G. 1962. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. In Proceedings of the 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, USA.

Lima, C. D. A. Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Tese de Doutorado Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Villibor, 1995

Sousa, M. A. S, Guimarães, A. C. R., Castro. C. D. Características Geotécnicas e Resilientes de Solos de Taludes ao Longo do Traçado da Estrada de Ferro Carajás Para Fins De Utilização em Infraestrutura de Transportes. Geosul, Florianópolis, v. 36, n. 80, p. 119-144, set./dez. 2021. https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e76654.

[1]*Antônio Carlos Rodrigues Guimarães* (cap-guimaraes@hotmail.com)
Instituto Militar de Engenharia, IME, Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha, Urca, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
[2]*Gabriel Nascimento* (gabrielcn@elgayer.com.br)
Universidade Federal Fluminense, UFF, Rua Passo da Pátria, 156, Bloco D (Escola de Engenharia), Sala 235, São Domingos, Niterói - RJ, Brasil.
[3]*Dalila Carvalho de Almeida Filippetto Pires (dalila.filippetto@vale.com), Jorge D. Azevedo (Jorge.Azevedo2@vale.com), Kíssyla Ávila Costa* (*kissyla.costa@vale.com*), *Patrick Douglas Freitas Macedo (Patrick.Macedo@vale.com) e Raiane Costa Virgílio (Raiane.Virgilio@vale.com)*
VALE S.A, Avenida Doutor Marco Paulo Simon Jardim, 3580, Prédio 4, Mina de Águas Claras, Nova Lima - MG, Brasil.

Dimensionamento e Modelagem Computacional de Pavimentos

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

PREDIÇÃO ESPACIAL DE COEFICIENTES DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM SOLOS CEARENSES PARA PAVIMENTAÇÃO

Mateus Marcial Magalhães Cavalcante, Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
O método de dimensionamento nacional, MeDiNa, adota o Módulo de Resiliência (MR) como parâmetro de rigidez na fundação de pavimentos. Dada o tempo de execução e onerosidade dos ensaios triaxiais, modelos preditivos podem guiar estudos de viabilidade e complementar amostras sondadas. Contudo, a não-linearidade do MR dificulta a definição de trechos homogêneos e sua predição espacial. Neste trabalho, busca-se modelar os coeficientes de MR em função da caracterização geotécnica e pedológica de solos cearenses. Através da integração de bancos de dados de pesquisas laboratoriais complementado com estudos de subleitos de projetos rodoviários, busca-se especificar variogramas para auxiliar na demarcação de trechos homogêneos e identificar espaçamento máximo entre sondagens para as amostras de MR. Espera-se, assim, produzir mapas de coeficientes de MR para o Ceará, bem como guiar o tratamento de dados funcionais sob a ótica da geoestatística na engenharia civil e de transportes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, o dimensionamento de pavimentos é tipicamente realizado pelo método empírico, que mede indiretamente a capacidade de suporte em sua fundação pelo Índice de Suporte Califórnia. Em contrapartida, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) utiliza como parâmetros de rigidez e afundamento o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP) para o dimensionamento mecanístico-empírico do pavimentos (DNIT, 2018a, DNIT, 2018b, DNIT, 2018c). Devido ao comportamento não-linear da tensão-deformação dos materiais não consolidados das camadas de fundação, esses parâmetros foram definidos como modelos constitutivos, ensaiados com prensas triaxiais de cargas cíclicas (Dunlap, 1962; Lentz, 1979).

A capacitação técnica necessária e a adoção ainda limitada de prensas triaxiais restringem a realização em larga escala desses ensaios e, portanto, a difusão inicial do dimensionamento mecanístico-empírico. A predição desses parâmetros surge, então, como alternativa atraente para complementar um número reduzido de amostras e conduzir estudos de viabilidade. Entretanto, em contraste aos valores individuais de CBR, disponibilizar e representar esses dados funcionais espacialmente traz alguns desafios. Médias pontuais, por exemplo, não distinguem a sensibilidade às tensões aplicadas com a heterogeneidade do material em si. Consequentemente, a superposição dessas fontes de variabilidade ao longo da via dificulta a delimitação de trechos homogêneos após a sondagem. A escassez de dados regionais sobre esses parâmetros, por sua vez, limita a capacidade dos órgãos normativos de estabelecer tolerâncias e requisitos mínimos de amostragem para esses ensaios.

Diante disso, esse trabalho busca avaliar se o comportamento funcional do MR pode ser reproduzido pela caracterização geotécnica e pedológica nos solos do estado do Ceará sob a ótica da geoestatística. Fundamentado pelos ensaios tradicionais de caracterização geotécnica, busca-se especificar variogramas dos coeficientes que guiem o espaçamento máximo entre amostras coletadas de MR. Esse processo visa também desenvolver uma metodologia geral para tratar dados geoestatísticos funcionais com fontes diretas e indiretas de dados na engenharia civil e de transportes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Amostragem e definição de segmentos homogêneos de parâmetros de rigidez em subleitos

Para projetos de implantação baseados no método MeDiNa, estabelece-se um espaçamento máximo de 500 metros entre furos de sondagem de subleitos (DNIT, 2018). Em cada furo deve ser feito um ensaio de MR e, em 10% das coletas, um ensaio de DP. Segmentos homogêneos são definidos pelo coeficiente de variação do MR médio de até 20%, onde cada segmento exige um mínimo de 3 amostras de DP. No entanto, a suposição de um material elástico linear de um MR médio pode superestimar a rigidez das camadas tal como na origem do ensaio (Dunlap, 1962). Além disso, a variabilidade do material não é distinguida da sensibilidade aos pares de tensão aplicados. Dessa forma, tais segmentos podem não ser homogêneos. Além disso, o controle de qualidade e aceitação de lotes ainda não é aplicada para esses ensaios (DNER, 1997). Embora o MR possa ser aferido com correlações em ensaios *in-situ* e parâmetros do solo (Kim e Siddiki, 2006; Riad *et al.*, 2023), sua não-linearidade não é considerada para a definição de segmentos homogêneos quanto aos modelos.

2.2. Modelos de parâmetros de rigidez em subleitos

Os modelos de MR são subdivididos entre modelos descritivos que incluem apenas os dados do ensaio (Chowdhury, 2021) e modelos preditivos com o uso de outros parâmetros geotécnicos do solo para um valor médio ou pares de tensão. De modo geral, modelos a partir de redes neurais e *support vector machine* possuem uma maior capacidade preditiva comparado à modelos estatísticos análogos (Ribeiro, 2016; Rodgher, 2002; Viana, 2007). Em contrapartida, modelos baseados na regressão de coeficientes (Nazzal e Tatari, 2013; Titi e Matar, 2018; Yau e Von Quintus, 2002) possuem uma interpretação mais direta e uma aplicabilidade direta em programas de dimensionamento como o MeDiNa comparado a outros modelos preditivos baseados nos pares de tensão.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Esse trabalho se baseia em um banco de dados de 107 amostras (1829 pares de tensão) ensaiadas e georreferenciadas de MR de solos destinados à pavimentação no estado do Ceará. Esse banco de dados é complementado por dados extraídos de estudos geotécnicos para subleitos e empréstimos de 47 projetos federais e 22 projetos estaduais no estado do Ceará (9446 pontos sondados; 6359 georreferenciados). A partir de um modelo estatístico para coeficientes e um modelo geral, por algoritmos de *random forest* e *support vector machine*, observações auxiliares previstas com um grau de incerteza complementam o banco de dados original. A união dessas observações, bem como os resultados esperados, está resumida na Figura 1.

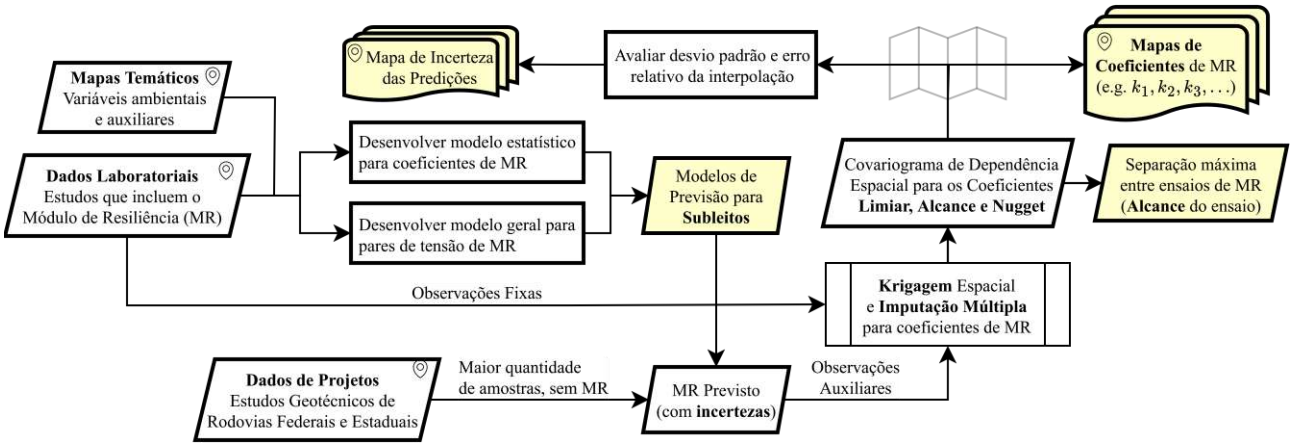


Figura 1: Método de pesquisa com resultados esperados na previsão dos coeficientes de MR.

Para identificar a capacidade da segmentação de trechos homogêneos com ensaios de caracterização, diferentes funções de covariância em krigagem com regressão serão avaliados para modelar a variação espacial do MR, gerando mapas de coeficientes e identificando o alcance usual do ensaio de MR. A integração das observações auxiliares será realizada com técnicas de imputação múltipla, incluindo os erros nas observações sintéticas previstas (Erten e Deutsch, 2024; Horák *et al.*, 2024; Soares *et al.*, 2017). Como predições espaciais de recursos naturais possuem múltiplas fontes de erro, a incerteza e a capacidade de extrapolação dessa modelagem será avaliada na correlação espacial de seus resíduos e na predição distribucional de sua variabilidade (Takoutsing e Heuvelink, 2022).

4. RESULTADOS ESPERADOS

A partir dos modelos escolhidos e das técnicas de integração utilizadas, busca-se gerar mapas de coeficientes para solos de subleito no estado do Ceará. A disponibilização de modelos completos por coordenadas geográficas, que podem ser aplicados diretamente em programas de dimensionamento como o MeDiNa, busca facilitar a implementação de estudos de viabilidade. A partir da dependência espacial modelada, será também possível indicar intervalos ideais de espaçamento para sondagens de MR em subleitos, guiando o número adequado de amostras na metodologia MeDiNa. A covariância encontrada e os modelos de predição também podem delimitar e complementar amostras em trechos homogêneos. Enfim, busca-se delinear uma estratégia geral de integração de fontes diretas e indiretas de dados com base na análise geoestatística para outras problemas similares de predição de dados funcionais na engenharia civil e de transportes.

Agradecimentos
Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento e apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chowdhury, S. M. R. M. (2021) Evaluation of resilient modulus constitutive equations for unbound coarse materials. *Construction and Building Materials*, v. 296, no. 123688. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123688

DNER. (1997) *DNER-PRO 277/97: Metodologia para Controle Estatístico de Obras e Serviços*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT. (2018a) *IS-247: Estudos para elaboração de projetos de implantação usando o método de dimensionamento nacional – MeDiNa*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT. (2018b) *DNIT 134/2018-ME Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT. (2018c) *DNIT 179/2018-IE Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Dunlap, W. A. (1962) *A Report on a Mathematical Model Describing the Deformation Characteristics ofGranular Materials*. College Station: Texas Transportation Institute. Disponível em: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/84411 (acesso em 18/03/2025)

Erten, O.; e Deutsch, C. V. (2024) Importance of Parameter Uncertainty in the Modeling of Geological Variables. *Natural Resources Research*, v. 33, n. 4, p. 1529–1547. DOI: 10.1007/s11053-024-10363-z

Horák, J.; Hewitt, R.; Thiesson, J.; Křivánek, R.; Danielisová, A.; e Janovský, M. (2024) Multiscalar Integration of Dense and Sparse Spatial Data: an Archaeological Case Study with Magnetometry and Geochemistry. *Surveys in Geophysics*. DOI: 10.1007/s10712-024-09834-y

Kim, D.; e Siddiki, N. (2006) *Simplification of Resilient Modulus Testing for Subgrades*. West Lafayette: Purdue University. DOI: 10.5703/1288284313388

Lentz, R. W. (1979) *Permanent deformation of cohesionless subgrade material under cyclic loading*. Tese (doutorado). Michigan: Michigan State University, United States. Disponível em: https://d.lib.msu.edu/etd/41915 (acesso em 18/03/2025).

Nazzal, M. D.; e Tatari, O. (2013) Evaluating the use of neural networks and genetic algorithms for prediction of subgrade resilient modulus. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 14, n. 4, p. 364–373. DOI: 10.1080/10298436.2012.671944

Riad, B.; Zhang, X.; Liu, J.; e Wang, Y. D. (2023) Compaction Quality Assurance Specifications of Unbound Materials. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 149, n. 1, no. 03122003. DOI: 10.1061/JPEODX.0000403

Ribeiro, A. J. A. (2016) *Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do ceará para fins de pavimentação*. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/18958/1/2016_tese_ajaribeiro.pdf (acesso em 27/03/2025)

Rodgher, S. F. (2002) *Aplicação de redes neurais artificiais para previsão de propriedades dos solos tropicais*. Tese (doutorado). São Carlos: Universidade de São Paulo. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-11072017-112543/ (acesso em 27/03/2025)

Soares, A.; Nunes, R.; e Azevedo, L. (2017) Integration of Uncertain Data in Geostatistical Modelling. *Mathematical Geosciences*, v. 49, n. 2, p. 253–273. DOI:10.1007/s11004-016-9667-5

Takoutsing, B.; e Heuvelink, G. B. M. (2022) Comparing the prediction performance, uncertainty quantification and extrapolation potential of regression kriging and random forest while accounting for soil measurement errors. *Geoderma*, v. 428, no. 116192. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116192

Titi, H. H.; e Matar, M. G. (2018) Estimating resilient modulus of base aggregates for mechanistic-empirical pavement design and performance evaluation. *Transportation Geotechnics*, v. 17, p. 141–153. DOI: 10.1016/j.trgeo.2018.09.014

Viana, H. M. F. (2007) *Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo*. Tese (doutorado). São Carlos: Universidade de São Paulo. Obtido de https://repositorio.usp.br/item/001639526 (acesso em 27/03/2025)

Yau, A., e Von Quintus, H. L. (2002) *Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics*. Austin: Federal Highway Administration. Obtido de https://infopave.fhwa.dot.gov/InfoPave_Repository/Reports/C30/C30_20/02051a.pdf (acesso em 27/03/2025)

Mateus Marcial Magalhães Cavalcante (mateus.cavalcante@det.ufc.br)
Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Rua Prof. Armando Farias, Bloco 703, Fortaleza-CE.

SIMPLIFICAÇÃO DA ANÁLISE DO TRINCAMENTO POR FADIGA NO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO BRASILEIRO

Suzane Nogueira da Silva, **Iuri Sidney Bessa**
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) representa um avanço para o dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. Todavia, a transição do método empírico para o mecanístico-empírico apresenta resistências, sobretudo no contexto da análise do trincamento por fadiga, que exige ensaios laboratoriais complexos e onerosos. Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo simplificar a análise do trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos. Para tanto, foi considerado um banco de dados original a partir de simulações realizadas no *software* MeDiNa, sobre o qual se aplicaram análises exploratórias preliminares, vinculadas ao objetivo A da pesquisa. Os resultados indicam que, para tráfegos com número N menor ou igual a 1×10^6, não há comprometimento estrutural por fadiga significativo. Ao final, espera-se que o estudo contribua para a redução de custos, tempo e complexidade no processo da análise da fadiga em pavimentos asfálticos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos evoluíram significativamente com o tempo, passando de abordagens empíricas para metodologias mecanístico-empíricas. No Brasil, essa evolução resultou no desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), reunindo dados referentes aos materiais e ao tráfego de pistas projetadas e construídas pelo país (Fritzen, 2016; Silva, 2018; Franco *et al*., 2020). Contudo, a transição do método puramente empírico, baseado no CBR (*California Bearing Ratio*), para o MeDiNa enfrenta resistências, sobretudo devido à maior complexidade técnica e à necessidade de equipamentos e ensaios laboratoriais mais sofisticados. Essa dificuldade é especialmente evidente na análise do trincamento por fadiga, cuja execução exige elevado custo e expertise, configurando um dos principais entraves à ampla adoção do MeDiNa no país (Oliveira *et al.,* 2023).

A modelagem do trincamento por fadiga no MeDiNa ocorre em função do ensaio de Compressão Diametral à Tensão Controlada (IDT). Esse ensaio exige infraestrutura avançada, profissionais capacitados e longos tempos de execução, tornando sua aplicação restrita a poucos centros de pesquisa (DNIT, 2018b). Ademais, sua aplicação requer operadores experientes, capazes de conduzir o ensaio e interpretar os dados com rigor técnico. Esses fatores tornam a estimativa da vida de fadiga ainda pouco acessível (Oliveira, 2020). Diante das limitações apontadas, a comunidade científica tem investigado soluções complementares visando aprimorar continuamente os sistemas de dimensionamento mecanístico-empíricos (Santiago *et al*., 2020; Soares, 2020; Sudarsanan *et al*., 2022; Ali *et al*., 2023). Acredita-se que a simplificação da análise do trincamento por fadiga, no âmbito do método mecanístico-empírico nacional, possa favorecer a inserção gradual do Brasil às práticas mecanicistas. Essa simplificação tende a reduzir custos, a racionalizar aas etapas de projeto e a facilitar o tratamento de dados complexos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

A presente pesquisa busca simplificar a análise do trincamento por fadiga em pavimentos asfálticos, no contexto do método de dimensionamento mecanístico-empírico.

1.1.2. Objetivos específicos

- **Objetivo A:** Identificar se existem valores de tráfego abaixo dos quais não há comprometimento estrutural por fadiga;
- **Objetivo B:** Avaliar se há a possibilidade de estimar a porcentagem de área trincada por fadiga (%AT) por meio de modelos de aprendizado de máquina (ML) treinados com variáveis de fácil obtenção;
- **Objetivo C:** Analisar se é possível determinar limites de deformação de tração no fundo do revestimento asfáltico que garantam um desempenho satisfatório à fadiga pelo período de 10 anos.

2. MÉTODO DE PESQUISA

A fim de se alcançar os objetivos propostos, a metodologia preliminar da pesquisa foi estruturada em três

etapas principais. A primeira consistiu na elaboração de um banco de dados contendo 6.426 simulações geradas no *software* MeDiNa, abrangendo todas as misturas asfálticas, convencionais e modificadas, do próprio *dataset* do programa, diferentes espessuras de revestimento e níveis de tráfego. A partir dos dados gerados, iniciaram-se as primeiras análises exploratórias, com foco na limpeza, padronização e descrição estatística do conjunto. A terceira etapa, foram conduzidas análises preliminares vinculadas ao objetivo A da pesquisa, envolvendo a seleção do pior cenário do banco de dados, correspondente à espessura mínima de revestimento (5 cm) e o agrupamento dos dados por faixa de tráfego. A partir do qual se investigou o comportamento da porcentagem de área trincada em função do tráfego, com vistas à identificação de tendências estruturais relevantes.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

3.1. Análise associada ao objetivo A

As Figuras 1 e 2 apresentam a distribuição da %AT ao fim de 10 anos para o pior cenário do banco de dados (espessura de 5 cm). A análise sugere que, para tráfegos com número N ≤ 1×10^6, não há comprometimento estrutural por fadiga significativo, com a maioria dos valores de %AT inferiores a 10% ao fim do período de projeto. Esse comportamento indica que, para faixas de tráfego mais leve, a realização do ensaio de fadiga pode não ser necessária, uma vez que a ocorrência do defeito é improvável. Além disso, a adoção de revestimentos em concreto asfáltico pode ser tecnicamente desnecessária nesse contexto, sendo plausível o uso de soluções mais econômicas, como tratamentos superficiais. Por outro lado, a partir de níveis de tráfego com número N > 1×10^6, observa-se um crescimento acentuado da %AT, evidenciando maior solicitação estrutural e necessidade de critérios mais rigorosos de dimensionamento. Essa tendência é consistente tanto para misturas asfálticas convencionais quanto para as modificadas.

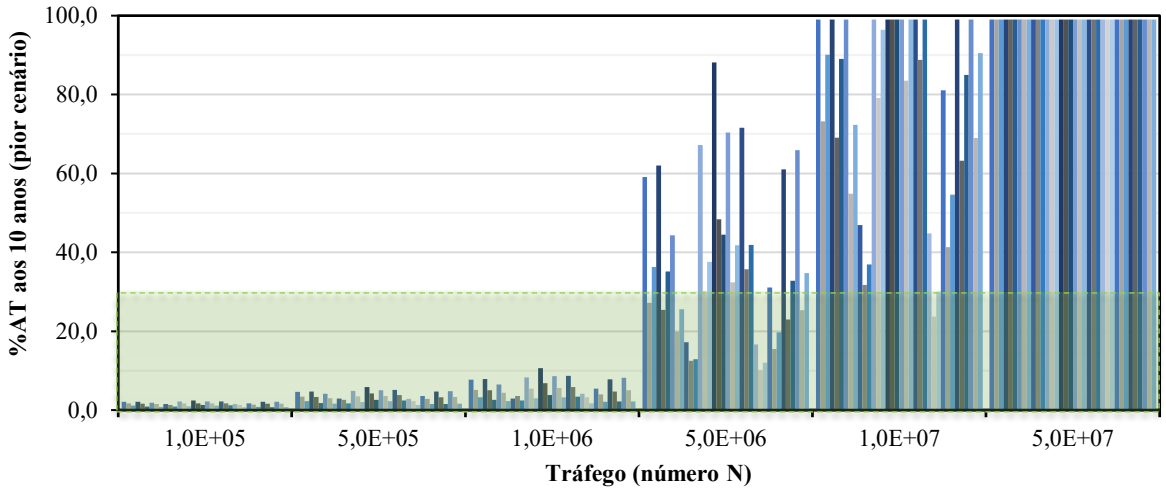


Figura 1: Distribuição da %AT no pior cenário de espessura em função do tráfego (misturas asfálticas convencionais)

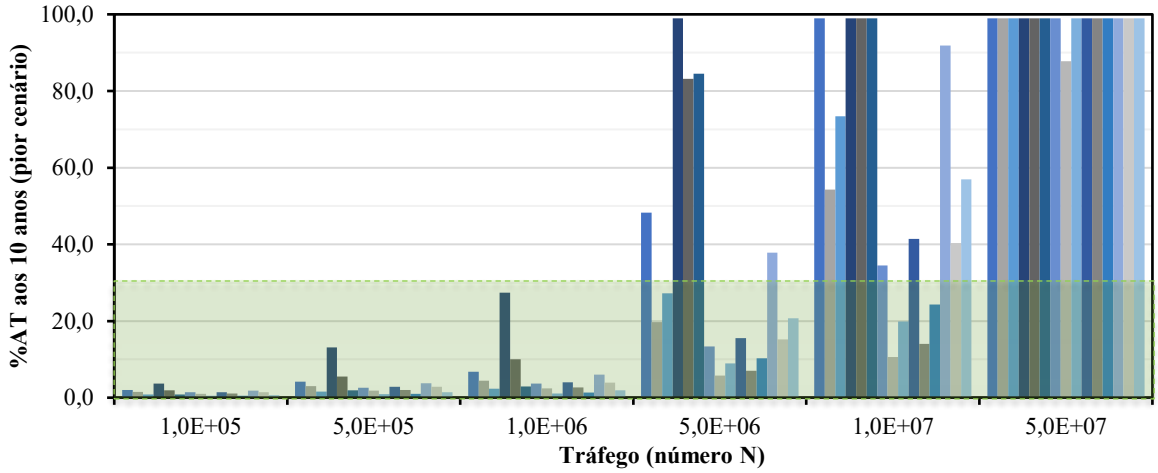


Figura 2: Distribuição da %AT no pior cenário de espessura em função do tráfego (misturas asfálticas modificadas)

4. RESULTADOS ESPERADOS

Diante das considerações apresentadas, espera-se alcançar os seguintes resultados ao final da pesquisa de mestrado:

- Proposta de um modelo simplificado para estimar a área trincada por fadiga em pavimentos asfálticos brasileiros, com base em parâmetros de fácil obtenção, dispensando ensaios laboratoriais;
- Definição de limites admissíveis de deformação de tração no fundo do revestimento, garantindo desempenho à fadiga por 10 anos;
- Simplificação da análise da fadiga em revestimentos, com foco na melhoria do dimensionamento e da avaliação estrutural;
- Contribuição para o aprimoramento contínuo e otimização de sistemas de dimensionamento de pavimentos asfálticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento de bolsa e ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, A. e A. Milad (2023) Application of machine learning techniques for asphalt pavement performance prediction. *Journal of Pure and Applied Sciences*, v. 22, n. 3, p .35–40. DOI: 10.51984/jopas.v22i3.2733

Franco, F. A. C. P. e L. M. G. Motta (2020) Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa: Apresentação dos programas. Rio de Janeiro: COPPE/IPR.

Fritzen, M. A. (2016) *Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão de dano por fadiga em pavimentos asfálticos*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Oliveira, J. A.; J. B. Soares; L. F. A. L. Babadopulos e J. L. O. Lucas Junior (2023) Fundamentos de mecânica do dano e de viscoelasticidade para prever desempenho de misturas asfálticas quanto à fadiga. *Transportes*, v. 31, n. 3, e2745. DOI: 10.58922/transportes.v31i3.2745

Oliveira, M. S. (2020) *Análise da fadiga em misturas asfálticas recicladas a quente*. Dissertação (mestrado). Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília.

Santiago, L. S.; L. F. A. L. Babadopulos e J. B. Soares (2020) Desenvolvimento de função de transferência para previsão de área trincada em pavimentos asfálticos por meio da simulação do dano por fadiga utilizando modelo S-VECD e análises elásticas. *Transportes*, v. 28, n. 2, p. 50–59. DOI: 10.14295/transportes.v28i3.1900

Silva, J.P. (2018). *Análise comparativa do dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo método do DNER e o método mecanístico-empírico MeDiNa em um trecho da BR-101/AL*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL.

Soares, J. B. (2020) Reflexões sobre um programa de pesquisa científica para a infraestrutura viária do Brasil. *Transportes*, v. 28, n. 5), p. 154–168. DOI: 10.14295/transportes.v28i5.2174

Sudarsanan, N. e Y. R. Kim. (2022) A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 9, n. 5, p. 808–835. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.05.003

Suzane Nogueira da Silva (suzane.nogueira@det.ufc.br)
Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, Brasil.

Materiais Alternativos

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO ÓLEO DE LINHAÇA PARA UTILIZAÇÃO COMO AGENTE REJUVENESCEDOR DE ASFALTOS ENVELHECIDOS

Maurício Tonial, Vitória Vicente Coltri, Liseane Padilha Thives, Luciana Rohde
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
A crescente utilização do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) em misturas asfálticas recicladas proporciona uma alternativa de destinação aos resíduos provenientes de revestimentos asfálticos fresados. Este estudo buscou analisar o uso do óleo de linhaça como agente rejuvenescedor para recuperação de asfaltos envelhecidos do RAP. Amostras de CAP 50/70 foram envelhecidas em laboratório em longo prazo e após, rejuvenescidas com óleo de linhaça nas proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em massa do asfalto. Os efeitos do rejuvenescimento foram avaliados através de parâmetros reológicos (PG e MSCR). Os mesmos ensaios foram conduzidos no CAP 50/70 nas condições virgem e envelhecida. O teor ideal do óleo de linhaça foi estabelecido através dos parâmetros reológicos obtidos nos ensaios entre o asfalto envelhecido e os rejuvenescidos com óleo de linhaça. Como resultado, verificou-se que o óleo de linhaça tem potencial para ser utilizado como agente rejuvenescedor, cujo teor ideal foi de 3,15%.

1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis na pavimentação tem estimulado a pesquisa e o uso de materiais reciclados, como o *Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP (Bonfim, 2021). Para recuperar as propriedades do asfalto envelhecido do RAP ao longo da vida de serviço, uma alternativa promissora é o uso de óleos vegetais como agentes rejuvenescedores, destacando-se, entre outros, o óleo de canola (Chen *et al*., 2024), o óleo de palma (Rabelo, 2023) e o óleo de linhaça (Cavalcante, 2016).

O óleo de linhaça, extraído da semente do linho (*Linum usitatissimum*), é rico em ácidos graxos e proteínas, e apresenta propriedades antioxidantes significativas (Silva, 2022). No Brasil, o estado do Rio Grande do Sul responde por cerca de 100% da produção nacional de linhaça. Em 2023 foram produzidas 4.460 t de linhaça no país, com um rendimento médio de 748 kg/ha (IBGE, 2023). Apesar de limitado, há potencial de cultivo em outros estados da federação (Velho e Lúcio, 2021).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é investigar o uso do óleo de linhaça como agente rejuvenescedor de um asfalto convencional do tipo CAP 50/70 envelhecido em laboratório, com base na avaliação de parâmetros reológicos. Espera-se contribuir para a ampliação do uso de óleos vegetais como alternativa sustentável aos materiais de origem não renovável e estimular o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na pavimentação asfáltica.

2. MATERIAIS

Os materiais utilizados para a realização deste estudo foram um asfalto convencional CAP 50/70, o óleo de linhaça e asfaltos rejuvenescidos com o óleo. O CAP 50/70 é oriundo de uma distribuidora de asfaltos do estado do Paraná, com ponto de amolecimento (ASTM, 2020a) de 53ºC e penetração (ASTM, 2020b) de 59 (0,1 mm) e está enquadrado na especificação brasileira DNIT 095 (DNIT, 2006). A amostra de óleo de linhaça foi obtida no comércio local em Florianópolis (Santa Catarina) e em temperatura ambiente, se apresenta no estado líquido, possuindo cor alaranjada.

Para a produção dos asfaltos rejuvenescidos, o óleo de linhaça foi incorporado ao CAP 50/70 envelhecido em laboratório nas proporções de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em relação à massa do asfalto. O procedimento de incorporação seguiu as seguintes etapas: (i) o CAP 50/70 foi envelhecido em longo prazo no *Rolling Thin-Film Oven* (RTFOT), adotando-se o tempo de 300 minutos como a equivalência entre o tempo para o ensaio de envelhecimento no RTFOT (curto prazo) e o tempo do método normatizado de envelhecimento para vida de serviço do pavimento – PAV (longo prazo), conforme procedimento adotado por Nagabhushanarao e Vijayakumar (2021) e Oliveira (2022); (ii) a adição do óleo de linhaça ocorreu manualmente, conforme preconiza a norma ASTMD 4887 (ASTM, 2016). O rejuvenescedor foi adicionado à amostra envelhecida e o conjunto (asfalto e óleo) mantido em estufa a 135ºC por 30 minutos, sendo agitado com uma haste de vidro por um (1) minuto a cada intervalo de 5 minutos; (iii) o procedimento foi finalizado até se obter uma homogeneidade do asfalto rejuvenescido (conjunto).

3. METODOLOGIA

Os efeitos do rejuvenescimento foram mensurados por meio dos seguintes parâmetros reológicos: PG – *Performance Grade* e obtidos no MSCR – *Multiple Stress Creep and Recovery Test*. O teor ideal de óleo de linhaça foi definido com base no comparativo entre os resultados dos ensaios reológicos do asfalto envelhecido em longo prazo e dos rejuvenescidos com óleo de linhaça. As duas etapas do programa experimental estão detalhadas a seguir.

3.1 Grau de Desempenho (PG) em Elevada Temperatura

A determinação do PG de elevada temperatura foi realizada de acordo com a norma ASTM D 7175 (ASTM, 2020c), utilizando-se um reômetro híbrido da *TA Instruments*, modelo *Discovery HR-2* e realizada nos asfaltos virgem (referência), envelhecido e rejuvenescidos com óleo de linhaça. No DSR, foram ensaiadas duas amostras por tipo de material, com diâmetro de 25 mm e 1 mm de espessura (*gap*). A determinação do PG foi definida por meio de uma varredura de temperatura na faixa de 52ºC a 76ºC, com variações de 6ºC em 6ºC, na frequência de 10 rad/s e amplitude de deformação de 12% para a amostra virgem e 10% para as amostras envelhecidas e rejuvenescidas. O PG foi estabelecido por meio do parâmetro G*/senδ a partir dos limites da especificação Superpave preconizado pela ASTM D 6373 (ASTM, 2021).

3.2 Suscetibilidade dos Asfaltos Rejuvenescidos à Deformação Permanente e Seleção de um Teor Ideal

O MSCR seguiu o procedimento da norma ASTM D 7405 (ASTM, 2020d) e os ensaios foram conduzidos em um reômetro híbrido da *TA Instruments*, modelo *Discovery HR-2*. Os parâmetros reológicos medidos foram o percentual de recuperação elástica (%R) e a compliância não-recuperável (J_{nr}). As amostras (duas por material) usadas no ensaio foram produzidas com diâmetro de 25 mm e *gap* de 1 mm. Os parâmetros reológicos do ensaio (J_{nr} e %R) foram medidos considerando a tensão de ensaio de 3,2 kPa, na temperatura elevada (PG) obtida no item 3.1. Os asfaltos rejuvenescidos foram classificados com base no nível de tráfego: padrão (S – *Standard*), pesado (H – *Heavy*), muito pesado (V – *Very Heavy*) e extremamente pesado (E – *Extreme*), conforme a norma AASHTO M 332 (AASHTO, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Grau de Desempenho (PG) em Elevada Temperatura

A Figura 1 apresenta, em (a), os resultados do módulo complexo (G*) e, em (b), o ângulo de fase (δ), em altas temperaturas (52ºC a 76ºC), dos asfaltos avaliados.

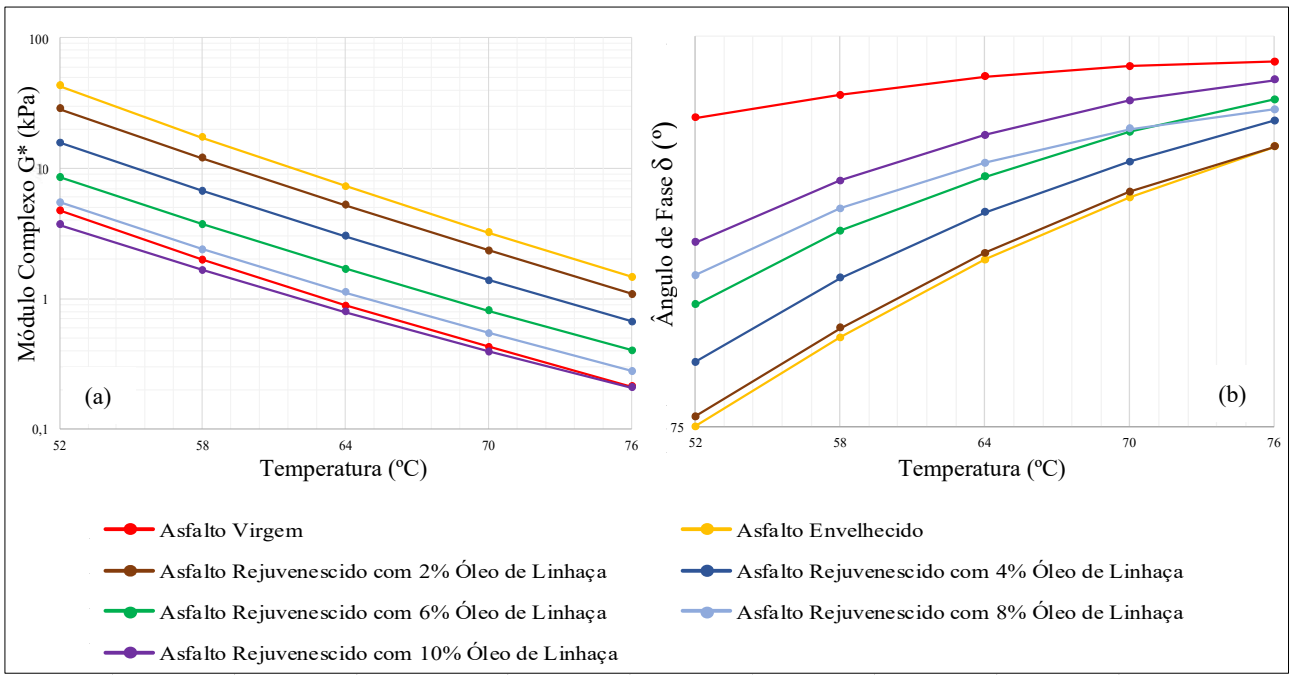


Figura 1: (a) Módulo complexo (G*) em altas temperaturas e (b) ângulo de fase (δ) do asfalto virgem, do envelhecido em longo prazo e dos asfaltos rejuvenescidos com diferentes teores de óleo de linhaça.

Com base na Figura 1, observa-se que, após envelhecimento, o asfalto envelhecido apresentou módulo complexo mais elevado e o ângulo de fase menor, tornando-se mais rígido e menos elástico, conforme o esperado. De maneira geral, com o acréscimo do óleo de linhaça, pode-se notar que ocorreu um retorno gradativo das variáveis G* e δ ao estado virgem (referência), especialmente nas proporções de 8% e 10% de incorporação.

A partir dos valores de G* e de δ, a Figura 2 apresenta o parâmetro de predição de desempenho Superpave (G*/senδ) para o asfalto virgem, o envelhecido em longo prazo e os rejuvenescidos com diferentes teores de óleo de linhaça. Com base na especificação Superpave, o CAP 50/70 obteve PG 58-XX.

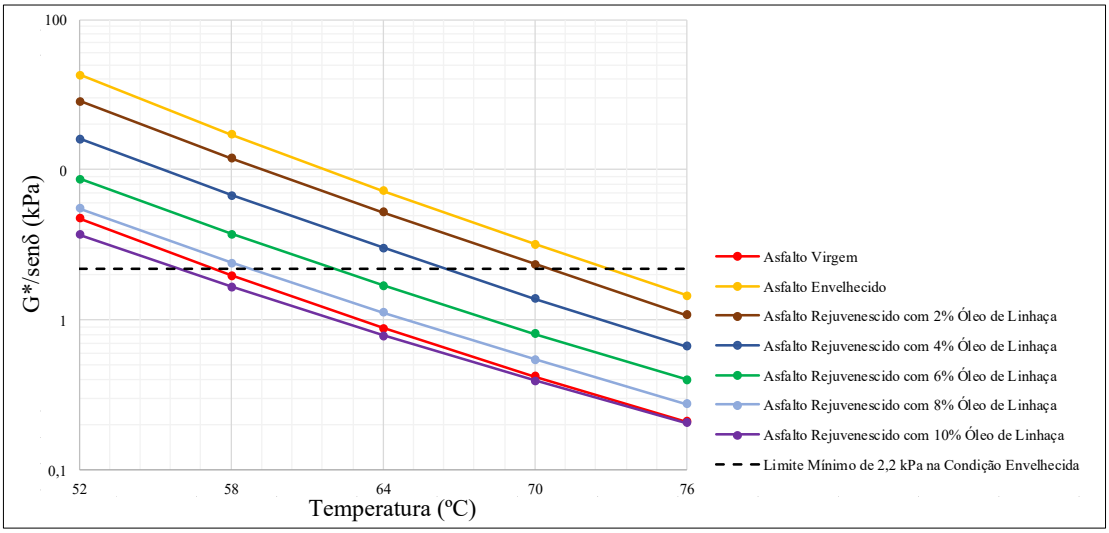


Figura 2: Parâmetro G*/senδ do asfalto virgem, do envelhecido em longo prazo e dos rejuvenescidos com diferentes teores de óleo de linhaça.

A partir dos resultados apresentados na Figura 2, percebeu-se que, com o aumento do teor de óleo de linhaça, o asfalto rejuvenescido tende a ficar mais próximo do seu estado virgem. Ainda, observou-se que se o teor de óleo for 10% ou mais, o asfalto perde rigidez (amolece) demasiadamente, resultando em valores do parâmetro de deformação permanente (G*/senδ) inferior à condição virgem.

4.2 Suscetibilidade dos Asfaltos Rejuvenescidos à Deformação Permanente e Seleção de um Teor Ideal

Os ensaios MSCR foram conduzidos na temperatura de 58ºC, conforme obtido. A Figura 3 apresenta os resultados do percentual de recuperação (%R), na tensão de 3,2 kPa, para o asfalto envelhecido em longo prazo (teor 0%) e os rejuvenescidos. Observa-se, portanto, que os valores de %R diminuem com o aumento do teor de óleo de linhaça, tendo melhores resultados para concentrações inferiores a 4% de óleo.

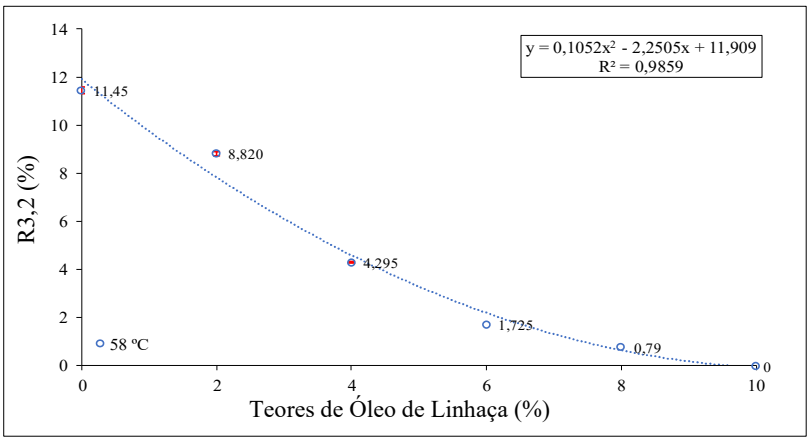


Figura 3: Percentual de recuperação (%R), a 3,2 kPa e temperatura de 58ºC, para o asfalto envelhecido em longo prazo (teor 0%) e os rejuvenescidos com óleo de linhaça.

A Figura 4a apresenta os resultados para o parâmetro da compliância não-recuperável (J_{nr}) do asfalto envelhecido em longo prazo (teor 0%) e dos rejuvenescidos com óleo, enquanto que a Figura 4b apresenta a classificação com base no nível de tráfego, conforme AASHTO M 332 (AASHTO, 2020).

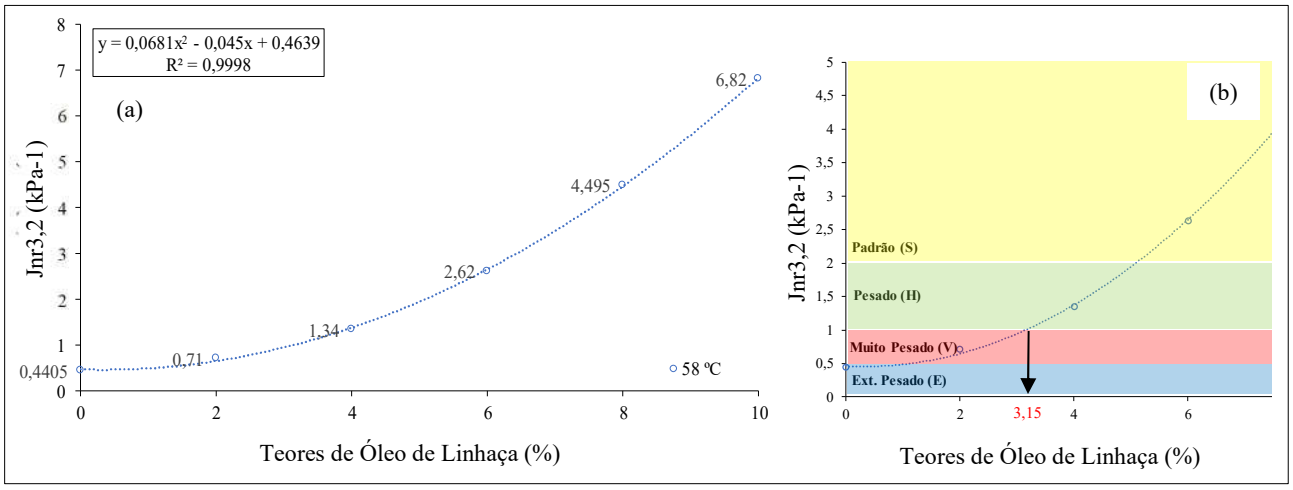


Figura 4: (a) Parâmetro de compliância não-recuperável (J_{nr}) a 3,2 kPa e temperatura de 58ºC e (b) classificação quanto ao nível de tráfego para o asfalto envelhecido em longo prazo (teor 0%) e os rejuvenescidos com óleo de linhaça.

Na Figura 4a, observa-se um aumento do parâmetro de compliância não-recuperável (J_{nr}) com o aumento do teor de óleo de linhaça, sendo um indicativo, portanto, de maior suscetibilidade do asfalto à deformação permanente. Logo, o asfalto envelhecido (teor 0%) e o asfalto rejuvenescido com 2% de óleo de linhaça são os que apresentaram melhores resultados ao parâmetro J_{nr}, dado o ganho de rigidez proporcionado pelo processo de envelhecimento.

Ainda, de acordo com a Figura 4b, é possível observar que, na temperatura de ensaio de 58ºC, o asfalto envelhecido (teor 0%) atingiu a classificação "Extremamente pesado – E", enquanto que o asfalto rejuvenescido com 2% e 4% de óleo de linhaça foi classificado como "Muito pesado – V" e "Pesado – H", respectivamente. Para teores acima de 6%, os asfaltos rejuvenescidos ficaram na classificação "Padrão – S".

Logo, aferiu-se que os parâmetros $J_{nr3,2}$ e $\%R_{3,2}$ do ensaio de MSCR indicam que os asfaltos rejuvenescidos com teores inferiores a 4% conferem à matriz asfáltica um melhor desempenho à deformação permanente em altas temperaturas.

Para a seleção do teor ideal de óleo de linhaça para atuar como agente rejuvenescedor, analisou-se, inicialmente, a classificação dos níveis de tráfego apresentada na Figura 4b. De maneira geral, tem-se um melhor comportamento do material para teores de até 4%, dado o enquadramento entre "Muito pesado – V" e "Pesado – H". Diante desse panorama, definiu-se como modificador o teor ideal de 3,15% de óleo de linhaça, estando em consonância com valores apresentados em pesquisas como a de Cavalcante (2016), e por apresentar um bom percentual de recuperação (5,86%), além de oportunizar um bom desempenho à deformação permanente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o comportamento reológico dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de linhaça em relação ao asfalto envelhecido e à matriz asfáltica original (CAP 50/70). Para tal objetivo, foram investigadas as incorporações de 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de óleo de linhaça no asfalto envelhecido a longo prazo. Dessa forma, as principais análises do estudo permitem concluir que:

- A adição do óleo de linhaça como agente rejuvenescedor do asfalto envelhecido provocou um retorno gradativo do módulo complexo (G*) e do ângulo de fase (δ) ao estado virgem do asfalto;
- Observou-se que para teores maiores ou iguais a 10%, o parâmetro de deformação permanente (G*/senδ) apresenta um comportamento inferior ao asfalto virgem;
- Os parâmetros de compliância não-recuperável ($J_{nr3,2}$) e percentual de recuperação ($\%R_{3,2}$) do ensaio

de MSCR indicam que os asfaltos rejuvenescidos com teores inferiores a 4% conferem à matriz asfáltica um melhor desempenho à deformação permanente em altas temperaturas, dado o ganho de rigidez oriundo do processo de envelhecimento da matriz asfáltica.

- O teor de 3,15% de óleo de linhaça foi considerado ideal para atuar como agente rejuvenescedor em asfaltos envelhecidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Pavimentação (LABPAV/ECV/UFSC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2022) Norma AASHTO M 332: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC.

ASTM (2016) Norma D 4887-11: Standard Pratice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken.

ASTM (2020a) Norma D 3625: Effect of Water on Asphalt-Coated Aggregate Using Boiling Water. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken.

ASTM (2020b) Norma D5/D5M: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken.

ASTM (2020c) Norma D 7175: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken.

ASTM (2020d) Norma D 7405: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken.

ASTM (2021) Norma D 6373: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. West Conshohocken.

Bonfim, V. (2021) *Pavimento Sustentável* (1ª. ed.). São Paulo: Exceção.

Cavalcante, F. P. (2016) *Efeito da Adição dos Óleos de Ricinus Communis e Linus usitatissimum nas Propriedades Reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo Puro e Modificado.* Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Disponível em http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1373 (acesso em 01/07/2025).

Chen, C. *et al*. (2024) Laboratory evaluation of canola oil modified hard asphalt binders with different oleic acid contents: Rheological properties and microscopic characteristics. *Journal of molecular liquids*, [s.l.], v. 413, p. 125927. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125927 (acesso em 06/07/2025).

DNIT (2006) Norma DNIT 095/2006 – EM: Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Nagabhushanarao, S. S. e Vijayakumar, A. S. (2021) Chemical and rheological characteristics of accelerate aged asphalt binders using rolling thin film oven. *Construction and Building Materials,* v. 272. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121995 (acesso em 01/07/2025).

Oliveira, Y. M. M. (2022) *Reologia de Ligantes Asfálticos e suas Variações Frente à Incorporação de Polímeros e ao Envelhecimento Simplificado com RTFOT.* Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em https://tede.ufsc.br/teses/PECV1288-D.pdf (acesso em 01/07/2025).

Rabelo, R. S. (2023) *Aplicação do Óleo de Palma como Agente Rejuvenescedor de Asfaltos Envelhecidos.* Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em https://tede.ufsc.br/teses/PECV1330-D.pdf (acesso em 04/07/2025).

Silva, C. C. V. P. da *et al*. (2022) Evaluation of the rheological effect of asphalt binder modification using Linum usitatissimum oil. *Revista Matéria*, [s.l.], v. 27, n. 3. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0138 (acesso em 01/07/2025).

Velho, J.P. e Lúcio, A. D. (2021) *Linhaça: Perspectiva de Produção e Usos na Alimentação Humana e Animal.* Ponta Grossa: Atena Editora. DOI: 10.22533/at.ed.057212106 (acesso em 01/07/2025).

Maurício Tonial (mauricio.tonial@posgrad.ufsc.br)
Vitória Vicente Coltri (vitoria.coltri@posgrad.ufsc.br)
Liseane Padilha Thives (liseane.thives@ufsc.br)
Luciana Rohde (l.rohde@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte Silva, nº 205, Córrego Grande, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

ANÁLISE ESTRUTURAL DE CAMADAS DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO CONTENDO AREIA DE MINERAÇÃO, POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA

Ícaro Ferreira Araujo, Marconi Oliveira de Almeida, Carlos Augusto de Souza Oliveira, Roger Júnio Campos, Claudio Ernani Martins Oliveira, Sérgio Pacífico Soncim
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Campus Itabira

RESUMO
Este trabalho analisou o comportamento estrutural de camadas do pavimento ferroviário contendo areia de minério de ferro (AMF), com auxílio de modelagem numérica. Para isso, foram realizadas simulações computacionais de um trecho ferroviário, utilizando três configurações de sublastro. A primeira foi composta por materiais convencionais, empregados em ferrovias, enquanto a segunda configuração utilizou AMF, proveniente do tratamento de rejeitos da mineração de ferro. Já a terceira, foi composta pela AMF com adição de 4% de cimento Portland (CP). As simulações foram realizadas com o auxílio do software ABAQUS, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), tendo sido considerada uma carga de 380 kN por eixo. Foi analisado o comportamento de cada estrutura quanto à deformação vertical, comparando os resultados com estudos de outros pesquisadores. A Estrutura com adição de CP demonstrou desempenho mecânico superior, apresentando uma redução de 26% na deformação em comparação à estrutura da segunda configuração.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O uso de materiais alternativos na construção e manutenção da infraestrutura ferroviária pode se consolidar como uma estratégia eficaz para atender à crescente demanda global por soluções sustentáveis. Nesse cenário, o reaproveitamento de resíduos industriais e de mineração, como a areia do minério de ferro (AMF), surge como uma alternativa inovadora que não só pode aumentar a durabilidade e o desempenho das ferrovias, mas também mitigar os impactos ambientais associados à atividade mineradora, de acordo com Golev *et al.* (2022).

Neste sentido, pesquisadores tem estudado o efeito de adição de areias provenientes de rejeitos de mineração em camadas estruturais de pavimentos. Lara *et al.* (2018) investigaram o comportamento geotécnico de misturas de solo com rejeito de flotação de minério de ferro da Vale S.A., localizada em Itabira-MG. O estudo avaliou misturas de solo e rejeito nas proporções de 25%, 50% e 75%, em massa, comparando-as com o solo natural de jazida, visando seu uso em camadas de subleito, reforço de subleito e sub-base. Os resultados indicaram que a adição do rejeito de minério de ferro aumentou os valores de ISC do solo e reduziu sua expansão. Golev *et al.* (2022) exploraram a aplicação da AMF em diversos setores da engenharia civil. O estudo revelou que a AMF possui características que permitem seu uso como alternativa à areia natural em várias finalidades construtivas. Costa *et al.* (2023) realizaram uma pesquisa em laboratório com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico, em termos de resistência e módulo de resiliência, da AMF. O estudo incluiu a análise da AMF pura, da AMF estabilizada com solo laterítico e da AMF com adição de cimento Portland, visando sua aplicação como sublastro sustentável em uma ferrovia com tráfego pesado no Brasil.

Fernandes (2005) investigou a viabilidade do uso de solos finos naturais, resíduos de mineração e materiais sintéticos na construção da infraestrutura ferroviária. Para isso, foi construído um trecho experimental de 250 metros, dividido em sete seções com diferentes configurações de sublastro de 20 cm de espessura, incluindo algumas seções com o uso de geossintéticos. Esse trecho foi configurado com trilho TR-68, dormentes de aço de bitola métrica, lastro de escória aciaria com índice de Abrasão Los Angeles de 10,43%, subleito de solo granular com CBR de 12% e módulo de resiliência (MR) médio de 95 MPa. O carregamento foi imposto por uma locomotiva de 8 eixos, com um peso total de 1600 kN, resultando em aproximadamente 100 kN por roda. As deflexões medidas em campo variaram entre 0,92 mm e 4,08 mm, com uma média de 2,08 mm.

Associado a resultados de comportamento mecânico de laboratório e de campo, ferramentas de simulação na engenharia tem permitido otimizar projetos de infraestrutura, antecipando problemas que só seriam identificados durante a execução prática. Com o avanço constante dos recursos computacionais, ferramentas de Engenharia Auxiliada por Computador (EAC) tornam-se cada vez mais eficazes, possibilitando simulações precisas e validação de modelos físicos antes mesmo de sua implementação. No caso das ferrovias, que são estruturas lineares de grande extensão e exigem grandes volumes de materiais, a aplicação de simulações permite identificar os materiais mais adequados e as condições de operação ideais para cada cenário, otimizando tanto o projeto quanto a manutenção da via permanente. Isso resulta em uma redução significativa dos custos de implantação e operação, uma vez que as decisões são baseadas em análises detalhadas e previsões

realistas, evitando retrabalhos e desperdícios.

Autores têm pesquisado o comportamento de estruturas ferroviárias com o auxílio computacional. Rangel (2017), por exemplo, realizou em seu estudo um comparativo contendo 768 simulações de pavimentos ferroviários utilizando o método dos elementos finitos, sendo parametrizadas 48 configurações distintas de ferrovias. Ele adotou dois tipos de carregamento por eixo (250 kN e 400 kN), além de mudanças no módulo de elasticidade dos dormentes, lastro, sublastro e subleito. Os resultados mostraram que 74% das deflexões simuladas foram de até 3 mm e 91 % até 4 mm.

Castro *et al.* (2023) desenvolveram dois modelos computacionais de via férrea para simular o comportamento sob cargas de 32 toneladas (313,81 kN) e 40 toneladas (392,27 kN) por eixo, variando as configurações de módulo de elasticidade do sublastro e do subleito, além de testar diferentes materiais para os trilhos. Os dados foram obtidos a partir de trechos da Estrada de Ferro Carajás (EFC), localizada no Norte do Brasil. A primeira configuração adotou módulo de elasticidade de 100 MPa para o sublastro e 30 MPa para o subleito, enquanto as configurações seguintes aumentaram gradativamente esses valores, chegando a 500 MPa para o sublastro e 100 MPa para o subleito. As deflexões máximas observadas na ferrovia variaram entre 2,27 mm e 6,40 mm para a carga de 32 toneladas, com média de 3,64 mm. Para a carga de 40 toneladas, as deflexões variaram entre 2,79 mm e 7,10 mm, com média de 4,95 mm.

Dentro deste contexto, este estudo investigou o comportamento mecânico da camada do sublastro ferroviário, tendo em sua constituição a AMF, por meio de simulações computacionais utilizando o método dos elementos finitos, com o auxílio do software ABAQUS. O ABAQUS é um pacote de software comercial para análise por elementos finitos desenvolvido originalmente pela HKS Inc de Rhode Island, Estados Unidos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada a modelagem computacional de uma estrutura ferroviária em 3D no software ABAQUS, utilizando o Método dos Elementos Finitos. A estrutura proposta representa um trecho ferroviário com 10 metros de comprimento. A exemplo de outros estudos na área, como os de Rangel (2017), Castro (2023) e El-Kady (2023), optou-se por adotar para os elementos o modelo elástico linear, a fim de representar o comportamento estrutural dos componentes da via permanente. O modelo elástico linear considera que os materiais respondem às cargas aplicadas de maneira proporcional e reversível, ou seja, não há deformações permanentes após a remoção da carga. Essa simplificação é amplamente utilizada em análises numéricas por sua eficiência computacional. Embora o solo e materiais semelhantes apresentem comportamento naturalmente não linear e dependente de outros fatores, conforme informa Rangel (2017), a adoção desse modelo justifica-se pela necessidade de simplificação computacional e pela natureza comparativa da análise, permitindo uma avaliação eficiente das deformações entre diferentes configurações de sublastro.

Como condições de contorno, foi assumida simetria na direção transversal da via, com o objetivo novamente de reduzir o esforço computacional, conforme recomendado por Profillidis (2006), que sugere a simulação de apenas um lado da via em modelos simétricos. Adicionalmente, foi adotado o engaste nas demais extremidades, restringindo locais onde se presume que as deformações sejam próximas de zero (Girardi, 2003 apud Profillidis, 2006). Para a montagem dos componentes e elementos na simulação, utilizaram-se elementos do tipo C3D8R (sólido com 8 nós e 3 graus de liberdade cada). Esse tipo de elemento foi escolhido por sua eficiência computacional em análises tridimensionais, permitindo simular grandes volumes de materiais com boa precisão e menor custo de processamento, sendo necessários aproximadamente 168.640 elementos, subdivididos em: 143.550 elementos para o subleito; 9.108 elementos para o sublastro; 7.524 elementos para o lastro; 96 elementos para cada dormente (12 dormentes), totalizando 1.152 elementos; 1.960 elementos para cada roda, totalizando 3.920 elementos; e 3.386 elementos para os trilhos. A Figura 1a ilustra a configuração geométrica, em 3D, para o MEF e a Figura 1b a representação da malha gerada para cada componente.

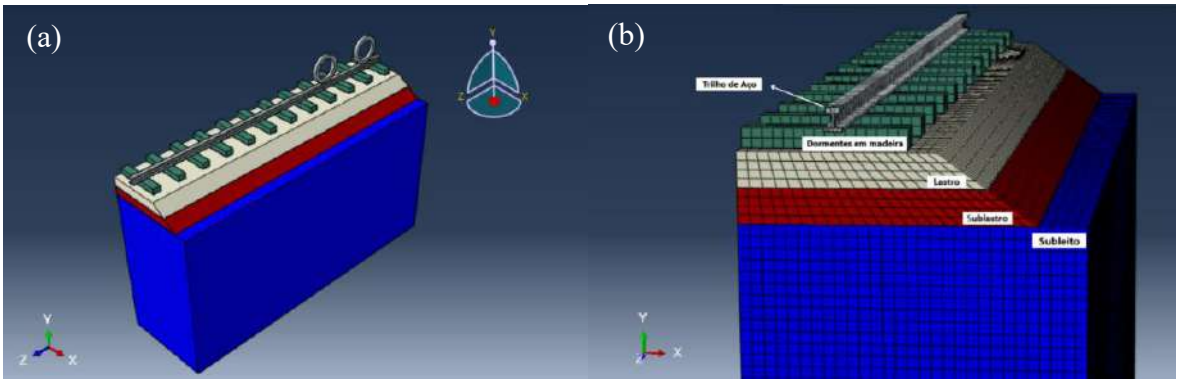


Figura 1: (a) Configuração Geométrica do Pavimento (3D) simulado em MEF; (b) Malha gerada para cada componente

A camada de subleito foi modelada simulando um material argiloso com características geotécnicas que atendam aos requisitos de suporte para a infraestrutura ferroviária, contribuindo para a estabilidade das camadas superiores. Esse tipo de subleito foi selecionado com a finalidade de minimizar as deformações excessivas e garantir durabilidade estrutural.

Para os três tipos de sublastro, foram utilizados como referência alguns materiais estudados por Costa *et al.* (2023). O primeiro sublastro consiste em um material convencional, representado por um solo arenoso (100S) com características de solos lateríticos, com propriedades adequadas à aplicação em subleitos e bases de pavimentos. Esse solo foi estudado pela equipe de pesquisadores da UNIFEI, em um projeto de parceria para pesquisa desenvolvido entre a Unifei, a USP e a Vale S.A.

O segundo sublastro foi constituído por AMF, um coproduto advindo do tratamento de rejeitos da mineração, proveniente da Mina Brucutu, situada em São Gonçalo do Rio Abaixo – MG. O terceiro sublastro foi composto pela mesma AMF, com adição de 4% de CP (CP III 32 RS), identificado como a mistura 96AMF + 4CP. A mistura foi definida com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do material para atender às condições das solicitações das cargas do transporte ferroviário. A escolha das misturas foi fundamentada no trabalho de Costa *et al.* (2023), cujos resultados de ensaios de laboratório demonstraram o potencial dessa mistura para uso como sublastro em ferrovias de transporte pesado.

Essas três configurações de sublastro foram inseridas no software ABAQUS para uma análise numérica, com parâmetros definidos como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, conforme descritos por Costa *et al.* (2023). Os valores adotados do Módulo de Resiliência (MR) para os três sublastros são uma média dos valores determinados pelos autores. A modelagem numérica permitiu simular o comportamento estrutural do sublastro em condições de carregamento constante, representando uma análise linear estática. Essa abordagem possibilitou a comparação direta entre o comportamento do solo, da AMF (100AMF) e da AMF estabilizada com cimento Portland (96AMF+4CP). Os valores utilizados nas simulações estão apresentados na Tabela 1. As simulações foram realizadas considerando uma carga de 380 kN por eixo, representando o peso operacional típico de um trem em serviço.

Tabela 1: Parâmetros dos componentes da via adotados para as simulações

Componentes do Pavimento	MR (MPa)	ν	γ_S(g/cm³)	Espessura (m)
Subleito	80,0	0,3	2,613	5,00
Lastro	300,0	0,2	2,700	0,30
Sublastro convencional (100S)	200,0	0,3	3,206	0,30
Sublastro 100AMF	150,0	0,3	2,850	0,30
Sublastro 96AMF+4CP	1000,0	0,3	2,853	0,30
Trilho TR-68	210000,0	0,3	-	-
Roda	210000,0	0,3	-	-
Dormente	13000,0	0,3	-	-

Após a definição das estruturas a serem modeladas no ABAQUS, foram gerados resultados relacionados a tensões, deformações e deslocamentos nas camadas e interfaces que compõem os pavimentos simulados. As simulações do comportamento do pavimento produziram gráficos tridimensionais (Figuras 2 (a) e 2 (b)),

permitindo a obtenção dos resultados das simulações propostas no estudo, além de proporcionar uma análise visual detalhada do comportamento entre as camadas da estrutura.

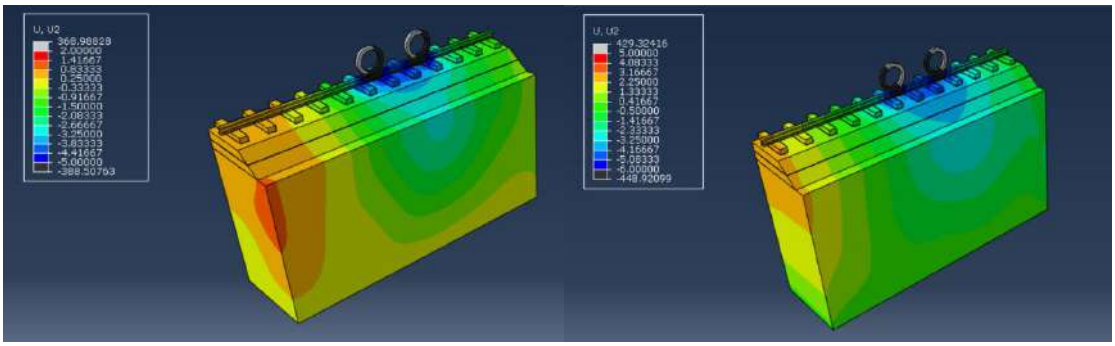


Figura 2: (a) Deslocamentos Verticais – Sublastro 100AMF; (b) Deslocamentos Verticais – Sublastro 96AMF+4CP

3. RESULTADOS

As bacias de deflexão das simulações são apresentadas na Figura 3 e os valores das deflexões obtidas são apresentados na Tabela 2.

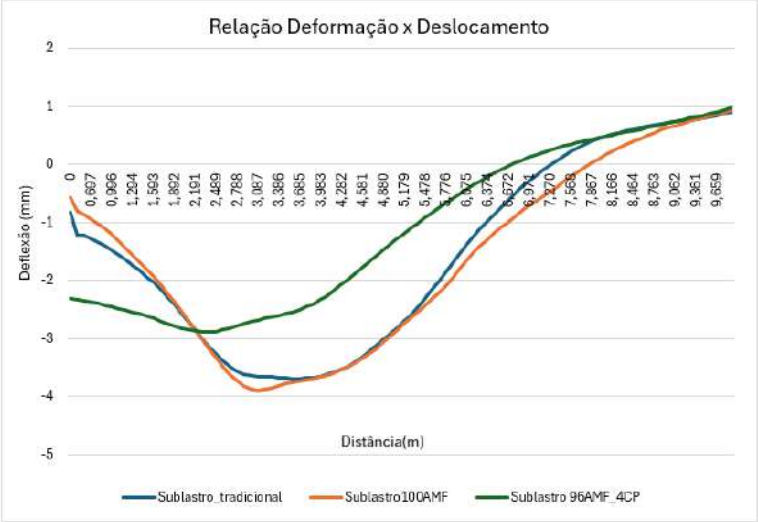


Figura 3: Bacias de Deflexão

Tabela 2: Resultados das simulações realizadas para as deflexões

Descrição	Sublastro 100S	Sublastro 100AMF	Sublastro 96AMF+4CP
Média (mm)	2,321	2,247	1,964
Desvio padrão (mm)	1,136	1,202	0,909
Máximo (mm)	3,696	3,904	2,889
Mínimo (mm)	0,832	0,572	0,038
Coef. de Variação (%)	48,118	52,982	46,434

Os resultados das simulações evidenciam diferenças significativas nos valores máximos de deflexão entre os tipos de sublastro analisados. O sublastro composto por 100S apresentou uma deflexão máxima de 3,696 mm, enquanto o sublastro composto por 100AMF registrou um aumento de 5,63%, atingindo 3,904 mm. Já o sublastro estabilizado com cimento (96AMF+4CP) demonstrou um desempenho superior, com uma redução de 21,86% na deflexão máxima em relação ao sublastro 100S e de 25,99% em relação ao 100AMF. Esse comportamento pode ser atribuído à maior rigidez proporcionada pela adição de cimento Portland, alterando a redistribuição de tensões e limitando as deformações verticais, em condições de carregamento. Comparando os dados deste estudo com os resultados das deflexões obtidas por Castro *et al.* (2023) (2,85 mm a 3,78 mm) e Costa (2016) (2,889 mm a 3,696 mm), pode-se notar que eles foram próximos.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível avaliar o comportamento das três configurações de sublastro, incluindo uma composição convencional e duas alternativas com a incorporação de Areia do Minério de Ferro, sendo uma delas com adição de 4% cimento Portland. A análise dos resultados indicou que o sublastro com AMF estabilizado com 4% de CP apresentou desempenho superior, com menores valores de deformação e maior estabilidade estrutural. Essa melhoria reforça o potencial do uso de AMF como alternativa sustentável ao sublastro construído com materiais convencionais, especialmente quando combinado com cimento Portland, o que contribui para o reaproveitamento de rejeitos e para a viabilidade econômica de materiais de baixo valor agregado.

A comparação entre os resultados das simulações com os de outros autores indicou uma boa consistência, fortalecendo a validade do modelo adotado e sugerindo que o sublastro com AMF pode ser aplicado de forma eficaz em estruturas ferroviárias, desde que se considere o controle de possíveis impactos ambientais e a conformidade com normas vigentes.

A adoção do modelo elástico linear nas simulações, apesar de simplificar o comportamento dos materiais, mostrou-se eficaz para uma análise comparativa entre as configurações de sublastro estudadas. Essa escolha permitiu avaliar de forma prática e objetiva a viabilidade do uso da AMF como substituto parcial ou total dos materiais convencionais, com o potencial de reduzir custos e impactos ambientais. Para futuras aplicações, recomenda-se a realização de ensaios complementares que envolvam modelos não lineares e análises de durabilidade a longo prazo, buscando validar e aprofundar os resultados obtidos neste estudo. Além disso criar uma rotina de monitoramento de campo de uma seção ferroviária reforçada com esses materiais (100AMF) e (96AMF+4CP) para avaliar de forma mais precisa o comportamento real dessas combinações de materiais.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá e à mineradora VALE S.A. pelo apoio a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro, G. B.; E. Moura; R. Costa; R. S. Motta; L. L. B. Bernucci; E. Fortunato e L. Oliveira (2023) Numerical analysis of a full-scale laboratory testing to simulate heavy haul railway tracks. In: *Proceedings Of The 12th International Heavy Haul Association Conference*, 27., 2023, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: IHHA, 2023. p. 31.

Costa, R.; E. Moura; L. L. B. Bernucci; B. Baschiera; S. P. Soncim; C. A. S. Oliveira; M. O. Almeida; R. J. Campos; L. Oliveira; L. R. Pereira; D. F. Carreco (2023) Study of mining co-product as a sustainable subballast for a heavy haul railway track in Brazil. In: *Proceedings of the 12th International Heavy Haul Association Conference 2023* (IHHA Rio 2023) Rio De Janeiro, Brazil, 27 to 31 August 2023.

El-Kady, M. S.; A. Azam; A. M. Yosri; M. Nabil (2024) Modelling of railway embankment stabilized with geotextile, geo-foam, and waste aggregates. Case Studies in Construction Materials, v. 18, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01800.

Fernandes, G. (2005) *Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos*. 2005. 253 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

Golev, A. (2022) Ore-sand: A potential new solution to the mine tailings and global sand sustainability crises. Brisbane: The University of Queensland.

Lara, L. L. D.; B. G. Queiroz; S. P. Soncim; M. O. Almeida; C. A. S. Oliveira; F. M. Belotti; E. H. Cavalcante; L. Resende (2018) Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos. In: *Congresso De Pesquisa e Ensino Em Transportes, XXXII, 2018, Gramado*. Anais... Gramado: ANPET, 2018. v. 1, p. 1966–1977.

Profillidis, V. A. (2006) Railway management and engineering. 3. ed. Burlington: Hampshire.

Rangel, G. (2017) *Um Método para a Estimativa da Deflexão do Pavimento Ferroviário Lastreado*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Ícaro Ferreira Araújo (icaroaraujo@unifei.edu.br)
Marconi Oliveira Almeida (marconi.almeida@unifei.edu.br)
Carlos Augusto de Souza Oliveira (carlosoliveira@unifei.edu.br)
Roger Júnio Campos (rogercampos@unifei.edu.br)
Cláudio Ernani Martins Oliveira (cemo@unifei.edu.br)
Sérgio Pacífico Soncim (sergiops@unifei.edu.br)
Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira, MG. CEP: 35903-087, Brasil.

ANÁLISE QUÍMICA POR FTIR DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM SEIVA *EUPHORBIA TIRUCALLI*

Leonardo Rodrigues Guedes, Lara Pereira Tavares Mendes, Ana Maria Gonçalves Duarte, Manoel Leandro Araújo e Farias, Jonny Dantas Patricio, John Kennedy Guedes Rodrigues, Arthur Nóbrega de Sousa, João Pedro Silveira Salustiano, Paulo Germano Tavares Marinho Filho, Ana Letícia Feitosa de Macêdo
Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO
Este estudo avaliou o efeito da adição da seiva de *Euphorbia Tirucalli,* coletada no Agreste paraibano, em ligante asfáltico CAP 50/70 como ligante de base, por meio da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Foram analisadas amostras contendo 5%, 7% e 10% de seiva desidratada, antes e após envelhecimento a curto prazo (RTFO). Os espectros revelaram que os grupos funcionais principais da matriz asfáltica foram preservados, indicando compatibilidade química entre os componentes. Alterações pontuais em bandas associadas à oxidação sugerem interações moleculares entre a seiva e o ligante asfáltico, com potencial influência na estabilidade química do material. A ausência de novos picos significativos indica que não ocorreram modificações estruturais intensas. Dessa forma, os resultados sugerem que a *Euphorbia Tirucalli* apresenta potencial como aditivo sustentável para modificação parcial de ligantes asfálticos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O ligante asfáltico, cuja principal função é proporcionar coesão à mistura asfáltica e adesão entre as partículas agregadas, é essencial para garantir resistência à deformação e à fissuração sob cargas de tráfego e tensões ambientais. No entanto, trata-se de um material sensível à temperatura, que tende a amolecer em altas temperaturas e se tornar quebradiço em baixas temperaturas (Yalcin *et al.*, 2024). Além disso, por ser um recurso não renovável derivado do petróleo e de elevado custo, torna-se cada vez mais relevante a busca por alternativas provenientes de fontes renováveis ou que reduzam os impactos ambientais.

Nesse contexto, pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais inovadores com comportamento semelhante ao do ligante asfáltico vêm ganhando destaque nas últimas décadas (Al-Khateeb *et al*., 2024). Entre as estratégias exploradas, destaca-se o uso de bioligantes — materiais de origem vegetal ou animal — que podem substituir parcial ou totalmente o ligante asfáltico convencional (Brito, 2022). Os principais objetivos do uso de bioligantes incluem a redução do consumo de ligante derivado de petróleo e da energia utilizada na construção de pavimentos (Ingrassia *et al*., 2019).

Manke *et al.* (2021) investigaram um bioligante derivado da química da seiva de pinho refinada, estabilizada com um polímero, e realizaram testes de desempenho em misturas asfálticas contendo 50% de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Os resultados indicaram que o bioligante apresentou desempenho superior ao de misturas convencionais produzidas com ligante CAP 50/70, especialmente em termos de resistência à fissuração térmica, atendendo satisfatoriamente aos requisitos para pavimentos com cargas de projeto de até 30 milhões de ESALs (Equivalent Single Axle Loads). Esse resultado é relevante, pois contribui para mitigar uma das principais deficiências do uso de RAP: o aumento da rigidez e fragilidade do ligante envelhecido em baixas temperaturas.

Gondim (2017), por sua vez, desenvolveu e analisou um bioligante formulado a partir da seiva da planta *Euphorbia Tirucalli* (aveloz), com o objetivo de substituir parcialmente o ligante asfáltico de petróleo em aplicações rodoviárias. Foram elaboradas formulações contendo de 3% a 30% de seiva, que foram avaliadas quanto às propriedades físicas, químicas, reológicas e à resistência ao envelhecimento oxidativo. Os resultados indicaram que a substituição de até 10% do ligante asfáltico pela seiva de aveloz não comprometeu significativamente as propriedades reológicas do material. A seiva exerceu efeito solvente sobre o ligante, resultando no aumento da penetração, redução do ponto de amolecimento, diminuição da viscosidade e do módulo complexo, além do aumento do ângulo de fase. O bioligante também demonstrou potencial para aplicação em imprimações betuminosas — quando diluído em querosene ou d-limoneno — e como agente rejuvenescedor, sendo capaz de recuperar propriedades de ligantes envelhecidos. Assim, o bio-ligante à base de seiva de aveloz mostrou-se uma alternativa técnica e ambientalmente viável para uso em pavimentação asfáltica.

Brito (2022) também estudou a aplicação da seiva da *Euphorbia Tirucalli* na pavimentação, desenvolvendo

uma bioemulsão asfáltica (ETPav) para uso em tratamentos superficiais por penetração. Os resultados mostraram que a emulsão apresentou propriedades reológicas adequadas, com redução do módulo complexo e aumento do ângulo de fase. Apesar de apresentar menor recuperação viscoelástica no ensaio MSCR em comparação à emulsão convencional, a ETPav demonstrou bom desempenho em adesividade e compatibilidade com agregados. O estudo indicou que a bioemulsão é promissora, desde que sejam realizados ajustes em seu mecanismo de ruptura para garantir a liberação ao tráfego em tempo compatível com emulsões comerciais.

Entretanto, apesar dos resultados promissores apresentados por Gondim (2017) e Brito (2022), não foram encontradas na literatura análises químicas detalhadas dos ligantes asfálticos modificados com diferentes teores da seiva de *Euphorbia Tirucalli*. Diante dessa lacuna, a presente pesquisa propõe realizar uma análise química, por meio de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), de ligante asfáltico modificado com teores crescentes de seiva (5%, 7% e 10%), com o objetivo de compreender as interações moleculares entre os componentes e os efeitos da adição da seiva sobre as características químicas do ligante.

Apesar do potencial identificado, a viabilidade em larga escala da *Euphorbia Tirucalli* depende da disponibilidade regional, visto que se trata de uma espécie cultivada em áreas específicas e com produção de seiva limitada. Assim, sua aplicação pode estar mais direcionada a soluções locais ou de pequena escala, em regiões com cultivo predominante da planta.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O ligante asfáltico empregado na pesquisa foi fornecido pela empresa JBR Engenharia LTDA, sendo classificado como CAP 50/70 convencional. Esta amostra foi identificada como "Ligante Puro". A seiva de *Euphorbia Tirucalli* foi coletada na cidade de Umbuzeiro - PB, situada no agreste paraibano.

2.2. Métodos

2.2.1. Coleta e preparação das amostras de seiva

O processo de extração da seiva da *Euphorbia Tirucalli* foi realizado por sangria, com a coleta sendo armazenada em recipientes devidamente protegidos da luz, do calor e de variações excessivas de umidade, conforme metodologia descrita por Gondim (2017). A seiva in natura apresenta aspecto leitoso e fluido devido ao elevado teor de água, o que exige sua desidratação para evitar interferências nas propriedades físico-químicas do ligante asfáltico. Durante os testes, verificou-se que a secagem em estufa resultava na liquefação da seiva, conferindo ao material um aspecto grudento e de difícil manuseio. Por essa razão, adotou-se a secagem ao ar livre, em ambiente ventilado e protegido, até que o material atingisse uma consistência sólida. Esse método permitiu a remoção gradual da umidade, resultando em um aspecto de goma elástica, indicativo da presença de compostos de natureza polimérica. Com o tempo, observou-se que a seiva desidratada se tornava mais rígida e quebradiça, formando grumos, o que se atribui à perda contínua de umidade residual. Ainda assim, um baixo teor de umidade, quando controlado, pode contribuir positivamente na modificação do ligante. Ressalta-se a importância do monitoramento do estado da seiva durante o armazenamento e antes de sua aplicação, garantindo a preservação de suas propriedades. Não foi realizada análise térmica (TGA/DSC) da seiva; recomenda-se em trabalhos futuros. A Figura 1 apresenta uma ilustração da seiva antes e após procedimento de desidratação.



(a) (b)

Figura 1: Aspectos da seiva (a) antes e (b) após processo de desidratação

Por fim, destaca-se que a seiva utilizada para o teor de 10% foi coletada em momento distinto daquela utilizada nos teores de 5% e 7%, o que pode impactar os resultados e deve ser considerado na análise dos dados. Essa diferença de coleta pode influenciar a composição química da seiva, uma vez que fatores como sazonalidade, idade da planta e condições ambientais impactam na concentração de compostos. Assim, os resultados devem ser interpretados considerando essa limitação.

2.2.2. Modificação de ligantes asfálticos

A preparação dos bio-ligantes foi realizada em misturador de baixo cisalhamento com manta aquecedora e controle de temperatura. As etapas realizadas foram: (i) aquecimento do ligante puro a 150°C por aproximadamente 1 hora e 30 minutos; (ii) adição gradual da seiva desidratada ao ligante asfáltico nos diferentes teores (5, 7 e 10%) em relação ao peso de ligante no misturador mecânico a uma temperatura de 160 ± 5 °C e rotação de 1500 rpm, durante 1 hora; (iii) ao final, observou-se homogeneidade visual nas amostras de ligante modificado, sem grumos, indicando compatibilidade entre os materiais

2.2.3. Fourier Transform Infrared – FTIR

A espectroscopia no infravermelho (FTIR) é uma técnica de absorção utilizada para identificar compostos e analisar a composição química de amostras, por meio da absorção de energia na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Neste estudo, a técnica foi aplicada a amostras de ligante asfáltico puro e modificado com adição de seiva desidratada de *Euphorbia Tirucalli* nos teores de 5%, 7% e 10% antes e após envelhecimento à curto prazo (RTFO), com o objetivo de verificar possíveis alterações na composição química do ligante após a incorporação do aditivo. Os ensaios foram realizados no CERTBIO – Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). As análises foram conduzidas com 16 varreduras espectrais, utilizando resolução de 4 cm^{-1}.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da espectroscopia do ligante asfáltico puro e modificado por *Euphorbia Tirucalli* nos teores de 5%, 7% e 10% por meio do ensaio de FTIR, foi realizada com o objetivo de caracterizar quimicamente as amostras através da identificação dos grupos funcionais presentes nos ligantes e investigar a ocorrência de alterações existentes nos compostos devido a adição do modificador. A Figura 2, apresenta os resultados obtidos para o ligante puro e modificado antes e após RTFO.

Os espectros obtidos por FTIR indicam que os ligantes modificados com seiva de *Euphorbia tirucalli*, antes e após o envelhecimento por RTFO, apresentam grupos funcionais semelhantes aos observados no CAP 50/70 puro, sem a formação de novos picos significativos. Isso sugere que, embora tenham ocorrido interações químicas entre a seiva e o ligante asfáltico, tais reações não promoveram modificações estruturais intensas na matriz do ligante.

As bandas características da matriz asfáltica, como os estiramentos C–H dos grupos metileno e metila (2917 e 2850 cm^{-1}), permanecem presentes com intensidade semelhante entre as amostras, indicando a manutenção da estrutura hidrocarbonada. Os picos em 1458 cm^{-1} (δCH_2) e 1375 cm^{-1} (δCH_3) reforçam essa constância.

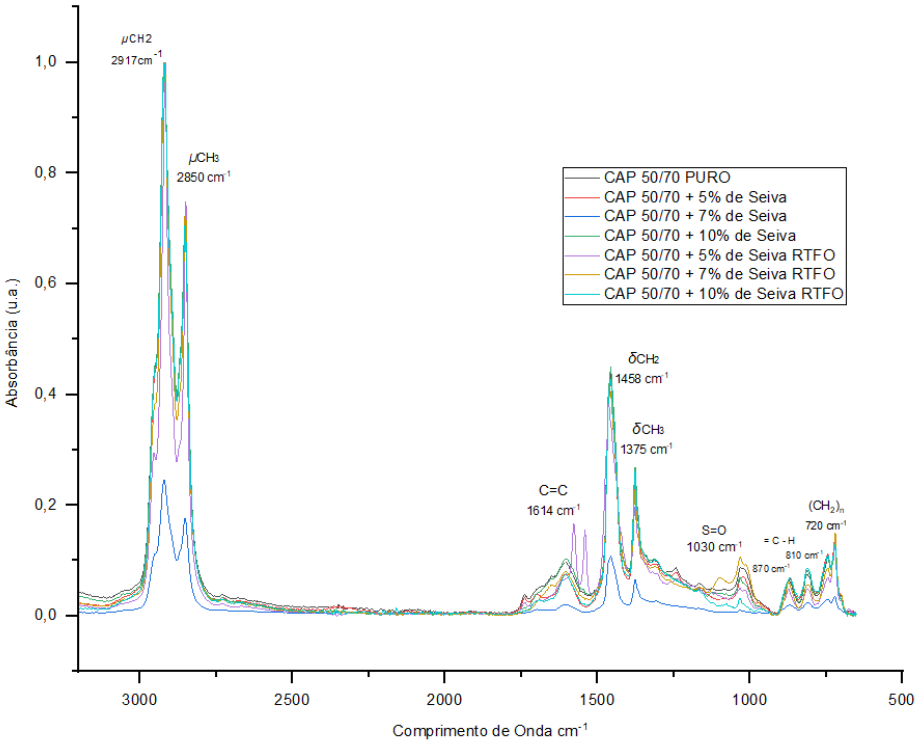


Figura 2: Espectro do ligante puro e modificado com seiva de *Euphorbia Tirucalli* nos teores de 5%, 7% e 10% antes e após envelhecimento a curto prazo

A banda em 1614 cm^{-1}, associada às ligações duplas C=C, apresentou variações de intensidade após o envelhecimento RTFO, especialmente nas amostras modificadas com seiva. Essa alteração pode refletir reorganizações estruturais ou oxidação parcial de compostos insaturados oriundos da seiva vegetal. Já o aumento da banda em 1030 cm^{-1}, correspondente ao grupo sulfóxido (S=O), confirma a ocorrência de oxidação, resultado coerente com estudos anteriores que associam o envelhecimento a um crescimento da concentração de grupos carbonilados e sulfurados (Qin et al., 2014; Nascimento, 2015). Observa-se que a intensidade dessa banda nas amostras modificadas com seiva foi menor em comparação à do ligante puro envelhecido, sugerindo menor formação de grupos oxidativos. Esse comportamento indica um possível efeito antioxidante da seiva. Gondim (2017) observou aumento da penetração retida após envelhecimento de curto prazo em ligantes modificados com *Euphorbia Tirucalli*, o que foi interpretado como um possível indício de ação antioxidante da seiva.

Não foram observadas bandas evidentes em torno de 1700–1730 cm^{-1}, típicas de carbonilas livres (C=O de ácidos, cetonas ou aldeídos), sugerindo que a oxidação foi limitada ou que os grupos formados estão envolvidos em interações mais complexas, como anéis condensados.

A análise da faixa de 720 cm^{-1}, associada às vibrações de cadeias $(CH_2)n$, e das bandas em 810 e 870 cm^{-1}, relacionadas a deformações fora do plano C–H, indica a preservação da estrutura de base dos asfaltenos. Os espectros das amostras envelhecidas apresentaram aumento geral da absorbância, o que, em conjunto com a ausência de novos picos, sugere concentração relativa de compostos mais pesados e polares, como os asfaltenos oxidados. Resultados semelhantes foram reportados em outros bioligantes de origem vegetal, como seiva de pinho (Manke et al., 2019) e bioemulsões de Euphorbia Tirucalli (Brito, 2022), que também indicaram alterações químicas pontuais sem formação de novos grupos funcionais relevantes. A convergência desses dados reforça o potencial de tais biomateriais como aditivos sustentáveis. Entretanto, diferenças na intensidade das bandas de oxidação observadas sugerem que a composição química específica de cada biomaterial pode impactar seu desempenho antioxidante.

Por fim, observou-se que o envelhecimento promoveu a redução da elasticidade dos ligantes, efeito geralmente associado à perda de maltenos (fração mais leve e flexível) e ao aumento relativo de asfaltenos oxidados. Contudo, ressalta-se que essa suposição não pode ser confirmada neste estudo, uma vez que não foram realizadas análises específicas de fracionamento, como a cromatografia SARA. Assim, a hipótese de variação

nas frações coloidais do ligante deve ser investigada em trabalhos futuros. Ainda assim, os efeitos observados na viscosidade e rigidez são compatíveis com os fenômenos esperados do envelhecimento térmico e oxidativo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise química dos ligantes asfálticos modificados com seiva de *Euphorbia Tirucalli*, por meio da espectroscopia FTIR, revelou que os grupos funcionais característicos da matriz asfáltica foram preservados, indicando compatibilidade entre os componentes e ausência de modificações estruturais intensas. Observou-se ainda o surgimento de bandas associadas à oxidação, especialmente após o envelhecimento térmico, sugerindo interações químicas que podem ter efeito estabilizador no ligante. Os resultados de FTIR sugerem que o envelhecimento está associado a aumento da rigidez e redução da elasticidade, provavelmente em função da perda de frações mais voláteis e da oxidação parcial dos compostos. Contudo, essa hipótese deve ser confirmada com análises reológicas e de fracionamento em estudos futuros. Os resultados sugerem que a seiva de *Euphorbia Tirucalli* apresenta potencial como aditivo renovável e sustentável para modificação parcial de ligantes asfálticos, com propriedades antioxidantes, sendo recomendados estudos complementares para aprofundar os mecanismos de interação e os efeitos sobre o desempenho reológico e físico-mecânico. Em termos econômicos, caso se considere a substituição de 10% do CAP 50/70 (R$ 4.715,00/t) por seiva de *Euphorbia tirucalli*, o custo do ligante poderia ser reduzido para aproximadamente R$ 4.243,50/t. Tal cenário sugeriria uma potencial economia financeira associada à diminuição do uso de recursos não renováveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Khateeb, G. G.; S. A. Alattieh; W. Zeiada e C. Castorena (2024) State-of-the-art review on the behavior of bio-asphalt binders and mixtures. *Molecules*, v. 29, n. 16, p. 3835. DOI: 10.3390/molecules29163835

Brito, M. S. (2022) *Análise do uso da seiva da Euphorbia Tirucalli na composição de uma emulsão asfáltica para tratamentos superficiais por penetração*. Dissertação (mestrado). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

Gondim, L. M. (2017) *Investigação sobre a formulação de um bio-ligante à base de Euphorbia Tirucalli para emprego na pavimentação*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

Ingrassia, L. P.; X. Lu; G. Ferrotti e F. Canestrari (2019) Renewable materials in bituminous binders and mixtures: speculative pretext or reliable opportunity?. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 144, p. 209–222. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.034.

Manke, N. D.; R. C. Williams; Z. Sotoodeh-Nia; E. W. Cochran; L. Porot; E. Chailleux; S. Pouget; F. Olard; A. J. D. Barco Carrion; J.-P. Planche e D. Lo Presti (2019) Performance of a sustainable asphalt mix incorporating high RAP content and novel bio-derived binder. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, n. 4, p. 812–834. DOI: 10.1080/14680629.2019.1643769

Yalcin, B. F.; E. Bakir; E. Yalcin e M. Yilmaz (2024) Composite modifiers to improve the rheological properties of asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 36, n. 6, p. 04024101. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-1752

Manke, N. D.; R. C. Williams; Z. Sotoodeh-Nia; E. W. Cochran; L. Porot; E. Chailleux; S. Pouget; F. Olard; A. J. D. Barco Carrion; J.-P. Planche e D. Lo Presti (2019) Performance of a sustainable asphalt mix incorporating high RAP content and novel bio-derived binder. Road Materials and Pavement Design, v. 22, n. 4, p. 812–834. DOI: 10.1080/14680629.2019.1643769

Brito, M. S. (2022) Análise do uso da seiva da Euphorbia Tirucalli na composição de uma emulsão asfáltica para tratamentos superficiais por penetração. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza.

Leonardo Rodrigues Guedes (leonardo.guedes@estudante.ufcg.edu.br)
Lara Pereira Tavares Mendes (lara.pereira@estudante.ufcg.edu.br)
Ana Maria Gonçalves Duarte (ana.duartemendonca@gmail.com)
Manoel Leandro Araújo e Farias (mlaf.engcivil@gmail.com)
Jonny Dantas Patricio (jonny_dantas@gmail.com)
John Kennedy Guedes Rodrigues (profkennedy@hotmail.com)
Arthur Nóbrega de Sousa (arthur_nobregas@hotmail.com)
João Pedro Silveira Salustiano (joao.silveira@estudante.ufcg.edu.br)
Paulo Germano Tavares Marinho Filho (marinho.paulo05@gmail.com)
Ana Letícia Feitosa de Macêdo (leticiamacedo.engcivil@gmail.com)
Universidade Federal de Campina Grande, CTRN, Engenharia Civil, Rua Aprigio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, Brasil.

AVALIAÇÃO DO USO DE GEOPOLÍMERO BASEADO EM CINZA VOLANTE PARA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE UM SOLO ARGILOSO

Adriano Jorge Sombra Júnior
Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)/Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Transportes (PETRAN)

RESUMO
Obras rodoviárias em geral demandam grandes volumes de materiais naturais, em especial solos para camadas granulares. Entretanto, os solos disponíveis nem sempre possuem propriedades adequadas, tornando necessária sua estabilização. O cimento e a cal são comumente usados, porém possuem alto custo e impactos ambientais devido as suas altas emissões de CO_2. Este estudo investigou o uso de geopolímeros, produzidos com cinzas volantes, como alternativa sustentável para estabilização química de solos. Após tratamento e ativação alcalina do precursor, aplicou-se o material sintetizado a um solo argiloso. Foram moldados corpos de prova para ensaios de compactação, resistência à compressão simples (RCS) e análise de retração e expansão, além de análises microestruturais do geopolímero. Os resultados mostraram incremento gradual da RCS. A pesquisa demonstrou o potencial dos geopolímeros em melhorar as propriedades dos solos para aplicação em subcamadas de pavimentos, contribuindo para a redução dos impactos ambientais em obras rodoviárias.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

No contexto das obras rodoviárias, os solos se apresentam como os materiais utilizados em camadas estruturais dos pavimentos (reforço do subleito, sub-base e base) que virão a receber ou não revestimento. Isso exige do solo estabilidade e resistência mecânica suficiente para suportar as demandas de tráfego do projeto e seus posteriores incrementos no decorrer da sua vida útil. Entretanto, na grande maioria dos casos, os solos naturais encontrados nas jazidas próximas as obras não se mostram economicamente ou estruturalmente viáveis para aplicação direta nas rodovias (Azevêdo, 2010).

Para compensar a falta de suporte dos solos naturais, técnicas de estabilização são empregadas com a finalidade de modificar suas características geotécnicas, tornando-os mecanicamente viáveis para utilização nas obras. Essas técnicas evitam a necessidade da substituição total ou parcial dos materiais locais por outros de maior qualidade (Daassi-gli, 2020). Devido sua facilidade de aplicação por meio de misturas em campo ou usinas, a estabilização química é uma forma de melhoramento de solo amplamente utilizada na engenharia. Nela, aglutinantes são incorporados aos solos em forma de pó, lama ou líquidos, e durante sua mistura e aplicação, sofrem reações químicas de cimentação e trocas iônicas, alterando assim as propriedades naturais das misturas ao preencher vazios preexistentes e estabelecer ligações químicas entre as partículas da mistura solo-aditivo (Puppala, 2016; Pinheiro, 2022).

Os aglomerantes mais aplicados na estabilização de solos para pavimentação são a cal e o cimento, porém, a cadeia produtiva de tais materiais além de apresentar uma alta dependência do consumo de recursos naturais, são responsáveis diretas por elevadas emissões de CO_2. Para Ping *et al*. (2020), cerca de 26% das emissões de gases do efeito estufa de todos os setores da indústria são provenientes da produção do cimento. As emissões diretas de CO_2 se dão 60% a partir da decomposição termoquímica do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) para o óxido de cálcio (CaO) e 40% para o aquecimento dos fornos que chegam até 1500 ºC e utilizam, em geral, combustíveis fósseis como fonte calorífica. Além disso, ocorrem emissões indiretas derivadas da operação das fábricas, consumo de energia elétrica e transportes de insumos/bens produzidos (Leão *et al.,* 2024).

Os efeitos das elevadas emissões de gases do efeito estufa se mostram cada vez mais comuns com a elevação na frequência de efeitos climáticos graves, consequência das atividades humanas no meio ambiente. Estima-se que cerca de 65% dos efeitos danosos decorrentes do aquecimento global são ligadas as emissões de CO_2 (Sharma e Kumar, 2020). A partir disso, pesquisas acerca de materiais alternativos que possam substituir parcial ou integralmente a cal e o cimento Portland tem recebido maior atenção nos últimos anos. Os geopolímeros se mostram como uma opção alternativa viável de substituição, pois são aglutinantes sintetizados em meio alcalino que utilizam como precursores materiais naturais ou resíduos industriais ricos em aluminossilicatos (Daassi-Gli, 2020; Chen *et al.*, 2020). Os geopolímeros podem ser definidos de acordo com Davidovits (1979) como polímeros inorgânicos de estruturas tridimensionais amorfas ou semicristalinas, formadas através da policondensação de aluminossilicatos em baixas temperaturas. Neles precursores amorfos com presença de silicato (SiO_3) e alumina (Al_2O_3) em sua composição, são ativados em meio alcalino com

soluções baseadas em sódio e potássio, sendo as mais usuais o hidróxido de sódio (NaOH), o silicato de sódio (Na_2SiO_3) ou sua combinação (Miraki *et al.*, 2022).

Uma das vantagens da ativação alcalina é a reutilização de resíduos industriais ricos em aluminossilicatos como precursores de geopolímeros, destinando materiais normalmente descartados no meio ambiente a aplicações mais nobres. Assim, o presente estudo tem por objetivo a utilização da cinza volante como precursora de um geopolímero aplicado para estabilização química de um solo argiloso. Para tanto, através de ensaios mecânicos e microestruturais foram testados os efeitos de melhoramento das propriedades mecânicas do solo através da estabilização química com geopolímero.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental se dividiu em duas etapas distintas como mostradas na Figura 1, onde na primeira etapa foi realizada a caracterização básica de uma amostra de solo nomeada como Solo Mombaça (SM) seguindo a classificação definida pela AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), que utiliza os resultados dos ensaios de granulometria (DNER-051/94), limite de liquidez (DNER-122/94) e limite de plasticidade (DNER-082/94). Além disso, o solo foi submetido aos ensaios de compactação (DNER-228/94), *California Bearing Ratio* (CBR) (DNIT-122/2016) e densidade real (DNER-093/94), permitindo a análise preliminar de suas características mecânicas.

A cinza volante (F), proveniente de usina termoelétrica, foi utilizada como precursora do geopolímero passando por um tratamento prévio para eliminação de sais solúveis que poderiam diminuir a qualidade do produto sintetizado. A cinza tratada foi ativada com a solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) 10M e aluminato de sódio ($NaAlO_2$), onde o produto gerado foi aplicado na estabilização do SM. O geopolímero produzido teve sua microestrutura investigada utilizando técnicas como Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX), Termogravimetria (TG) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

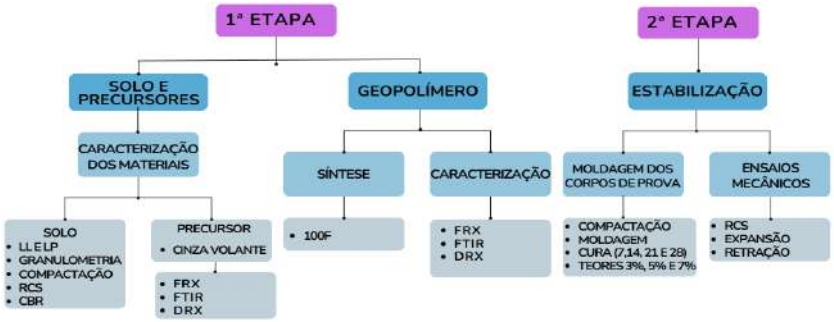


Figura 1: Programa experimental

Na segunda etapa do programa, o material sintetizado foi macerado e peneirado de forma a se tornar passante na peneira com malha de 0,075 mm de abertura. Após seu beneficiamento, o geopolímero em formato de pó seco foi aplicado como estabilizante nas proporções de 3%, 5% e 7% em percentual de massa na mistura solo-geopolímero. As amostras foram compactadas em equipamento miniatura (DNER-228/94) com energia intermediária de compactação produzindo Corpos de Prova (CP) com 50mm de diâmetro e altura de 50mm com variação de ± 1mm. Esses CP´s foram submetidos a dois tipos distintos de cura, sendo elas a cura úmida (CH) onde os CP's eram envoltos em filme plástico de modo a manter a umidade das amostras no decorrer do tempo, enquanto na cura seca (CS) os CP's se mantinham em contato com o ar atmosférico. As amostras estabilizadas foram mantidas em processos de cura nos períodos de 7, 14, 21 e 28 dias, onde após tais intervalos os corpos de prova foram rompidos em prensa hidráulica de forma a acompanhar os ganhos de resistência do solo no decorrer do tempo. Além disso, adaptando a norma DNER-228/94 foram executados ensaios de retração e expansão das amostras estudadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização geotécnica do solo

Os resultados de caracterização do solo obtidos através do programa experimental são apresentados na Tabela 1, onde a partir dela é possível perceber que o solo se classifica como um solo argiloso de classe A-6 com

elevado percentual de finos (49,76% de suas partículas passando na peneira de abertura nominal de 0,150 mm). A elevada presença de finos impactou diretamente nos resultados dos limites de consistência do solo (Limite de Liquidez - LL de 29%; Limite de Plasticidade – LP de 16% e Índice de Plasticidade – IP de 13%) que foram mais elevados em função do alto teor de argila em sua composição. Essas características, no caso do solo ser não laterítico, podem causar elevada deformabilidade e elevada sensibilidade às variações de umidade. É possível verificar esse comportamento, ao analisar o baixo valor de CBR de apenas 3%; a expansão de 0,30%; retração de 0,47%; bem como a RCS H de 0,45 MPa. De acordo com esses resultados, a amostra de solo natural não seria uma opção viável para emprego em subcamadas de pavimentos.

Tabela 1: Caracterização física e mecânica da amostra do Solo Mombaça (SM)

Amostra	Classif. AASHTO	Den. (g/cm3)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wót (%)	CBR (%)	Exp. (%)	Retr. (%)	RCS H (MPa)	RCS S (MPa)
SM	A-6	2,46	29	16	13	10,1	3,0	0,30	0,47	0,45	2,69

3.2 Caracterização microestrutural (solo, precursor e geopolímero) e ensaios mecânicos

Os resultados da análise de FRX dos precursores são mostrados na Tabela 2, onde a partir da concentração elementar é possível conhecer a composição química de cada amostra. Entende-se que tais elementos apresentam-se majoritariamente em forma de óxidos, logo, o FRX indica a presença de óxidos de silício e alumínio na composição da cinza volante, indicando o potencial dos materiais para síntese geopolimérica. Observou-se que o geopolímero apresenta composição semelhante à do precursor, onde os elementos de maior concentração identificados foram o ferro (Fe), o silício (Si), o alumínio (Al) e o cálcio (Ca).

Tabela 1: Resultados de FRX do solo, precursor tratado (T), precursor não tratado (NT) e geopolímero (100F)

	Elementos (%)									
AMOSTRA	Si	Fe	Al	Ca	K	P	Ti	S	OUTROS	TOTAL
SM	52,11	18,13	17,78	5,08	3,00	0,00	2,37	0,00	1,53	100,00
F-NT	38,67	25,12	10,62	14,45	4,62	1,64	2,31	1,86	0,70	100,00
F-T	42,18	24,02	12,28	8,03	4,90	2,42	2,18	0,87	3,12	100,00
100F	32,98	36,45	9,91	8,98	5,28	2,06	2,60	0,57	1,17	100,00

As Figuras 2-a e 2-b apresentam os difratogramas da cinza volante depois do tratamento (F-T), bem como após sua ativação alcalina (100F). Em ambas, observa-se a presença de quartzo (SiO_2, ICSD 062404), apresentando picos finos e intensos, característicos desse óxido, quando em forma de sílica amorfa, ele se manifesta como um halo de difração em 2θ entre 20º e 30º. Esse óxido é fundamental para a formação de géis do tipo N-A-S-H e C-A-S-H. A amostra não tratada apresenta óxido de ferro na forma de Fe_3O_4 que, durante o processo de tratamento, passa por oxidação e se transforma em hematita (Fe_2O_3, ICSD 033643) na amostra F-T. Para a amostra de geopolímero 100F (Figura 2-b), foram identificadas três fases cristalográficas. A primeira, é o quartzo (ICSD 027826). A segunda fase identificada é formada por um aluminossilicato de sódio, $Na_{3.68}Si_{8.40}O_{25.20}Al_{3.60}$ (96-152-9731). Em sua fase final, foi identificado o óxido de ferro Fe_3O_4 (ICSD 028664), reconhecido por seus picos localizados em ângulos 2θ específicos, em torno de 30,1°, 35,5°, 43,1° e 53,5°.

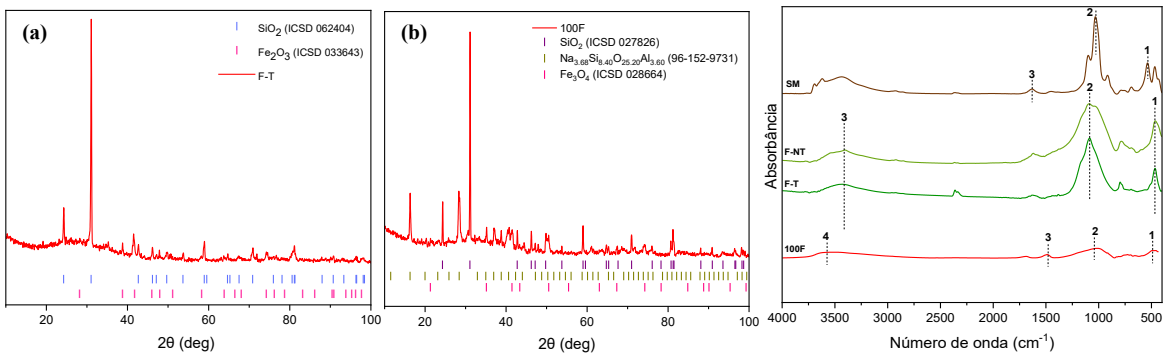


Figura 2: Difratogramas e espectros de FTIR do precursor e do geopolímero.

Os espectros apresentados na Figura 2-c mostram as bandas características presentes nas amostras estudadas, onde é possível observar que para a F, as bandas de absorção presentes próximas à região de 460 cm^{-1}, correspondem a deformações da ligação Si-O. Na região próxima à banda de 1040 cm^{-1}, pode-se definir como região característica do estiramento assimétrico do grupo T-O (T = Si ou Al). (Ahmaruzzaman, 2010; Li *et al.,* 2013). Para 100F, as bandas características presentes entre as zonas de 1000 a 1100 cm^{-1} são atribuídas às vibrações assimétricas das ligações T-O-Si (T = Al ou Si) no tetraedro SiO_4, sendo que tais bandas correspondem à formação de géis do tipo C-A-S-H e/ou N-A-S-H, indicadores de geopolimerização.

3.3 Ensaios mecânicos

As retrações e expansões após 24h de moldagem (adaptado de DNIT 254/2023) são apresentadas na Figura 3-a e 3-b, respectivamente. É possível perceber que a expansão diminuiu para todos os teores de aplicação dos geopolímeros em comparação a do solo natural. Com isso, todas as amostras apresentaram resultados menores que 0,5% valor limite indicado para bases de pavimentos. Villibor *et al.* (2009) indicam que a retração admissível para solos tropicais deve variar entre 0,1% e 0,5% para uso em bases. A partir disso, observa-se que tanto o solo natural quanto as amostras estabilizadas com 5% e 7% de 100F se mostraram dentro dos parâmetros aceitáveis.

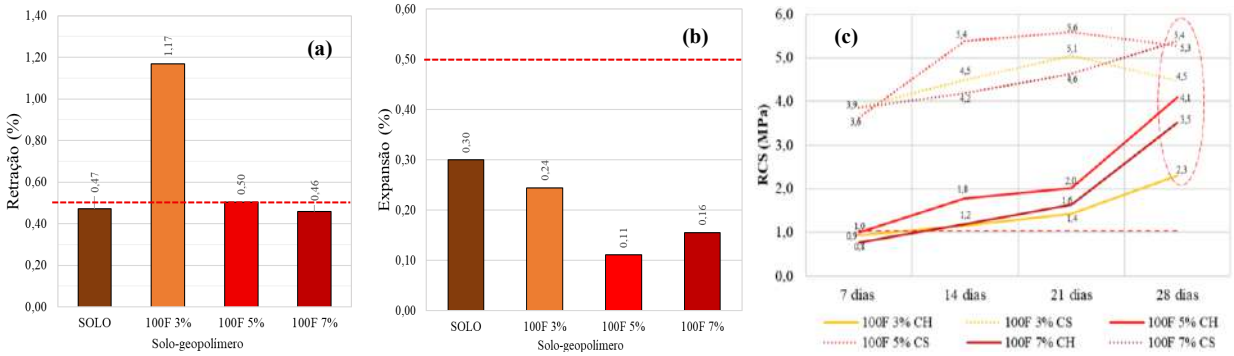


Figura 3: Resultados dos ensaios de expansão, retração e resistência à compressão simples (RCS)

O ensaio de RCS é apresentado na Figura 2-c. observa-se que aos 7 dias de cura, todas as amostras com cura seca (CS) superaram o mínimo exigido de resistência (1,034 MPa conforme Araújo (2009)) para bases de solo-cal, alcançando mais de 3,5 MPa em todos os teores. As amostras com cura úmida (CH) variaram entre 0,8 MPa a 1,0 MPa. Aos 14 dias, todas as amostras continuaram ganhando resistência, com destaque para a amostra 100F-5% - CS, que atingiu 5,4 MPa. As amostras com CH também passaram a atender ao mínimo exigido. Entre os 21 e 28 dias, as amostras 100F com 3% e 5% de CS em cura seca apresentaram leve queda na resistência, enquanto as de cura úmida mostraram aumentos significativos, especialmente com 5% de teor. Considerando a resistência, a retração e a expansão, os teores de 5% e 7% foram os mais adequados, sendo recomendado o uso da amostra 100F-5% pelo seu comportamento e menor quantidade de aplicação.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados, à luz dos ensaios empíricos já realizados, indicam que a aplicação de geopolímeros promoveu melhorias nas propriedades mecânicas do solo argiloso, indicando viabilidade técnica para sua utilização na estabilização de solos. No entanto, para análise mais avançada e aplicação em escala real, são necessárias investigações adicionais, como a análise mecanístico-empírica incluindo a realização dos ensaios de tração. Os resultados obtidos contribuem para o avanço dos conhecimentos acerca da estabilização de solos com materiais alternativos, especialmente em obras rodoviárias. A pesquisa também reforça o potencial do uso de resíduos industriais na pavimentação, aliando desempenho técnico à sustentabilidade ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro oferecido pela FUNCAP, CNPq, FINEP e ENEVA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, *36*(3), 327–363. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003

Araújo Jr, L. P. V. (2019). *Estudo sobre estabilização de solo com material fresado de pavimentação asfáltica* (p. 122) Tese de Doutorado. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Urbana. Universidade Federal De São Carlos.

Azevedo, A. G. de S., Strecker, K., Araújo Jr., A. G. de, & Silva, C. A. da. (2017). Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na2O e Na2SiO3. *Cerâmica*, *63*(366), 143–151. https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662078

Chen, R., Zhu, Y., Lai, H. peng, & Bao, W. (2020). Stabilization of soft soil using low-carbon alkali-activated binder. *Environmental Earth Sciences*, *79*(22). https://doi.org/10.1007/s12665-020-09259-x

Daassi-gli, C. A. P. (2020). *Estabilização de um Solo Granular com Misturas de Pó de Vidro – Cal de Carbureto – Hidróxido de Sódio (NaOH)*. Dissertação de Mestrado. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Davidovits, J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. *Geopolymer 2002 Conference*.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 051).

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – Compactação em equipamento miniatura. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 228).

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 093).

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 122).

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 082).

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 162).

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro: DNER, 1994. (Norma 180).

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2023. (Norma 254).

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro: DNIT, 2019. (Norma 122).

Leão, A., *et al.* (2024). ZeroCAL: Eliminating Carbon Dioxide Emissions from Limestone's Decomposition to Decarbonize Cement Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c03193

Li, X., *et al.* (2013). Cost, energy, and greenhouse gas analysis of fly ash stabilised cold in-place recycled asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, *14*(3), 537–550. https://doi.org/10.1080/14680629.2013.779302

Miraki, H., *et al.* (2022). Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *14*(2), 576–591. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.08.012

Ping, L., *et al.* (2020). Feasibility and Carbon Footprint Analysis of Lime-Dried Sludge for Cement Production. *Sustainability*, *12*(6), 2500. https://doi.org/10.3390/su12062500

Pinheiro, C. G. da S. (2022). *Estabilização de solo sedimentar contaminado através de cimentos alcalinos aplicados com recurso à técnica de Deep Soil Mixing* (p. 317). Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Puppala, A. J. (2016). Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. *Transportation Geotechnics*, *9*, 123–138. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.004

Sharma, K., & Kumar, A. (2020). Utilization of industrial waste—based geopolymers as a soil stabilizer—a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, *5*(3). https://doi.org/10.1007/s41062-020-00350-7

Villibor, D. F., *et al.* (2009). Pavimentos de Baixo Custo Para Vias Urbanas (2 ed., p. 196). Arte & Ciência.

Adriano Jorge Sombra Júnior (adriano.sombra.jr@det.ufc.br)
Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703. 60.455-760 – Fortaleza, CE

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM SEIVA DE *EUPHORBIA TIRUCALLI*

Leonardo Rodrigues Guedes[1], Lara Pereira Tavares Mendes[1], Ana Maria Gonçalves Duarte[1], Manoel Leandro Araújo e Farias[1], Jonny Dantas Patricio[1], John Kennedy Guedes Rodrigues[1], Arthur Nóbrega de Sousa[1], João Pedro Silveira Salustiano[1], Paulo Germano Tavares Marinho Filho[1], Ana Letícia Feitosa de Macêdo[1]
[1]Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO
Este estudo investiga o comportamento físico e reológico do ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) modificado com 7% de seiva de *Euphorbia tirucalli*, visando avaliar sua viabilidade como bio-modificador. Foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional (Brookfield), fluência e recuperação sob tensão (MSCR) e determinação do grau de desempenho (PG), tanto para a amostra original quanto para a envelhecida em RTFO. Os resultados indicaram que a adição da seiva proporcionou aumento da rigidez do ligante, melhora na recuperação elástica e resistência à deformação permanente em altas temperaturas. Conclui-se que a modificação com 7% de *Euphorbia Tirucalli* apresenta potencial para aplicação em regiões de clima quente e tráfego intenso.

1. INTRODUÇÃO

O ligante asfáltico é um dos componentes mais relevantes na composição das misturas utilizadas em pavimentação, sendo responsável por conferir coesão, flexibilidade e resistência à estrutura do revestimento. Contudo, os ligantes convencionais derivados do petróleo, como o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, apresentam sensibilidade significativa a variações térmicas e ao carregamento repetido, o que pode comprometer seu desempenho em serviço, sobretudo em regiões de clima quente e sob tráfego intenso (SILVA; SIQUEIRA; SEVERINO, 2016). Esse cenário tem impulsionado o desenvolvimento de ligantes modificados, com o objetivo de aprimorar suas propriedades físicas e reológicas, ampliando a durabilidade dos pavimentos e reduzindo os custos de manutenção.

Dentre as alternativas investigadas, os modificadores de origem vegetal têm se destacado por aliar desempenho técnico satisfatório a benefícios ambientais e econômicos. O uso de bio-aditivos obtidos a partir de extratos vegetais ou resíduos agroindustriais configura-se como uma abordagem promissora na engenharia de pavimentos, pois além de reduzir a dependência de insumos não renováveis, pode agregar valor a produtos naturais abundantes em determinadas regiões (PAIVA, 2017; CARVALHO, 2018). Nesse contexto, a planta *Euphorbia tirucalli*, conhecida popularmente como aveloz, tem sido objeto de interesse por sua seiva rica em compostos orgânicos com potencial para modificação de ligantes asfálticos (MARTINADO, 2021).

A literatura aponta que a incorporação de seiva de *Euphorbia tirucalli* ao CAP pode alterar suas propriedades viscoelásticas, influenciando diretamente a resistência à deformação permanente, o comportamento térmico e a capacidade de recuperação elástica. Tais modificações são especialmente relevantes no contexto da pavimentação moderna, que exige materiais capazes de suportar condições extremas de temperatura e tráfego, sem comprometer a funcionalidade do revestimento (GONDIM, 2017; NOGUEIRA, 2012).

Para avaliar a viabilidade técnica de modificadores como o aveloz, torna-se essencial a caracterização do ligante asfáltico, considerando tanto propriedades físicas quanto reológicas. A caracterização física envolve parâmetros como penetração, que avalia a consistência do material em temperatura padrão, e ponto de amolecimento, que indica a temperatura na qual o ligante passa do estado semissólido ao líquido, sendo ambos importantes para prever a trabalhabilidade e a resistência do material em campo (BERNUCCI et al., 2008; COSTA, 2021).

Já as propriedades reológicas dizem respeito ao comportamento do ligante sob diferentes condições de carga e temperatura. Dentre elas, destaca-se a viscosidade, que representa a resistência ao fluxo e é influenciada pela temperatura, sendo determinante para o controle das etapas de mistura, transporte e compactação (SILVA; SIQUEIRA; SEVERINO, 2016). Outras propriedades reológicas relevantes incluem o módulo de cisalhamento complexo (G)* e o ângulo de fase (δ), obtidos por meio de reômetros, conforme as diretrizes do sistema SUPERPAVE. Esses parâmetros permitem avaliar a capacidade do ligante de resistir à deformação permanente e à fadiga, contribuindo para a longevidade do pavimento (NETO, 2019).

Dessa forma, a investigação das características físicas e reológicas dos ligantes modificados com aditivos vegetais, como a seiva de *Euphorbia tirucalli*, constitui etapa fundamental na validação de soluções inovadoras e sustentáveis na pavimentação asfáltica. A análise criteriosa desses parâmetros, seguindo os métodos padronizados da ABNT e da ASTM, fornece subsídios técnicos para o uso racional e eficiente de bio-ligantes na engenharia rodoviária.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada, ilustrada na Figura 1, consistiu na modificação do ligante CAP 50/70 com 7% de seiva de *Euphorbia tirucalli* (aveloz), visando avaliar suas propriedades físicas e reológicas. Após a homogeneização do bio-modificador ao ligante, foram realizadas análises físicas (penetração, ponto de amolecimento) e reológicas (MSCR, PG e Viscosidade rotacional), considerando as condições antes e após envelhecimento por RTFO. Os ensaios seguiram normas técnicas específicas, permitindo avaliar a influência do aditivo no desempenho do ligante asfáltico.

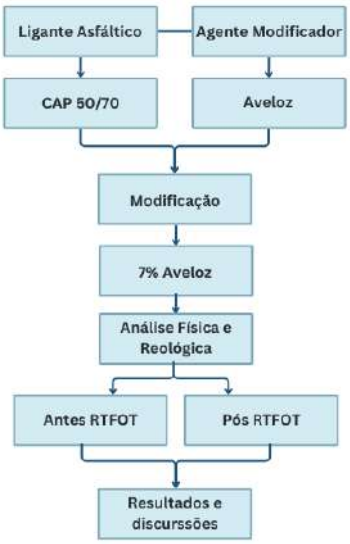


Figura 1: Fluxograma do trabalho.

A Tabela 1 apresenta os ensaios de caracterização realizados para o ligante asfáltico utilizado na pesquisa.

Tabela 1: Caracterização dos ligantes – Ensaios e Normas

Ensaio	Norma
Determinação da penetração	NBR 6576/2007
Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola	NBR 6560/2016
Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional (Brookfield)	NBR 15184/2021
Grau de desempenho de ligante asfáltico – Performance Graded Asphalt Binder	ASTM D6816-11
Fluência e recuperação de ligantes asfálticos determinados sob tensões múltiplas (MSCR)	ASTM D7405-15
Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional – RTFOT	NBR 15235/2009

2.1. Materiais

2.1.1. Seiva de Euphorbia tirucalli

A seiva de *Euphorbia tirucalli*, conhecida como aveloz, foi utilizada como material modificador do ligante asfáltico. A coleta foi realizada por meio de incisões nos ramos da planta, com posterior armazenamento do látex em recipientes limpos. Para aplicação, a seiva passou por um processo de desidratação em estufa ventilada a baixa temperatura, até atingir uma consistência pastosa e homogênea. Após o preparo, a seiva foi incorporada ao ligante asfáltico em proporções previamente definidas.



Figura 2: Seiva de aveloz desidratada

2.1.2. Ligante asfáltico CAP 50/70

Foi utilizado o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, com comportamento viscoelástico e aplicação comum em obras rodoviárias. O material passou por ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, sendo utilizado tanto na forma original quanto como base para modificação com seiva vegetal.

2.2. Métodos

2.2.1. Modificação do ligante asfáltico

Foram realizados testes com teores de 5% a 7% em massa de seiva desidratada de Euphorbia tirucalli adicionados ao CAP 50/70, sendo o teor de 7% o que apresentou melhor desempenho. A seiva foi incorporada gradualmente ao ligante aquecido, sob agitação constante a 160 °C (± 5 °C), em misturador mecânico de baixo cisalhamento a 1500 rpm, por aproximadamente 60 minutos, até a obtenção de uma mistura homogênea. O ligante modificado foi então armazenado em recipientes metálicos vedados até a etapa de caracterização.

3. RESULTADOS

3.1. Penetração

O ensaio de penetração foi realizado a 25 °C para avaliar a consistência dos ligantes antes e após o envelhecimento pelo método RTFOT. O ligante convencional (CAP 50/70) apresentou penetração de 57 (mm) na condição original e 46 (mm) após envelhecimento. Para o ligante modificado com 7% de seiva de *Euphorbia tirucalli*, os valores foram de 43,8 (mm) antes do envelhecimento e 33,3 (mm) após RTFOT.

A porcentagem de penetração retida (PPR), calculada como a razão entre os valores pós-RTFOT e originais, foi de 76% para o ligante modificado, valor superior ao limite mínimo de 55% estabelecido por normas técnicas. Esse resultado indica que o ligante manteve parte significativa de sua consistência após o envelhecimento.

3.2. Ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento foi determinado para os ligantes nas condições original e após envelhecimento em RTFOT. O ligante convencional (CAP 50/70) apresentou ponto de amolecimento de 48 °C antes do envelhecimento e 49 °C após o RTFOT. Para o ligante modificado com 7% de seiva de *Euphorbia tirucalli*, os valores obtidos foram de 50 °C na condição original e 52 °C após o envelhecimento.

Todos os ligantes avaliados atenderam ao valor mínimo de 46 °C estabelecido por norma técnica, mantendo desempenho satisfatório em temperaturas elevadas.

3.3. Viscosidade rotacional (BROOKFIELD)

A viscosidade dos ligantes foi determinada nas temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C, nas condições original e após envelhecimento em RTFOT. Antes do envelhecimento, o CAP 50/70 apresentou viscosidade de 388,28 cP a 135 °C, 196,23 cP a 150 °C e 72,54 cP a 177 °C. Para o ligante modificado com 7% de seiva de *Euphorbia tirucalli*, os valores foram de 457,5 cP, 226 cP e 81 cP para as respectivas temperaturas.

Após o envelhecimento, a viscosidade do ligante convencional aumentou para 525 cP (135 °C), 255 cP (150 °C) e 88,5 cP (177 °C). Já o ligante modificado apresentou viscosidades de 553,35 cP, 267,84 cP e 93,47 cP, respectivamente, nas mesmas temperaturas.

3.4. Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

O ensaio MSCR foi realizado em amostras de ligantes envelhecidos, submetidas a tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa, com o objetivo de avaliar a suscetibilidade à deformação permanente e a capacidade de recuperação elástica dos materiais. Quanto à compliância não recuperável (Jnr), o ligante convencional (CAP 50/70) apresentou valores de 3,8913 kPa^{-1} a 0,1 kPa e 4,1311 kPa^{-1} a 3,2 kPa. Para o ligante modificado com 7% de seiva, os valores obtidos foram de 3,7776 kPa^{-1} e 3,9940 kPa^{-1}, respectivamente. Apenas o ligante modificado atendeu ao limite de 4,0 kPa^{-1} estipulado pela AASHTO M320 para tráfego padrão.

No que se refere à porcentagem de recuperação elástica (%Rec), o CAP 50/70 apresentou valor de 1,57% a 0,1 kPa. Já o ligante com 7% de seiva obteve 0,74% a 0,1 kPa, indicando baixa recuperação elástica. A diferença percentual entre as compliâncias a 0,1 Kpa e 3,2 Kpa, calculada como a variação relativa entre os valores de Jnr nas duas tensões aplicadas, foi inferior ao limite máximo de 75% estabelecido pelas especificações, para todas as amostras avaliadas.

3.5. Performance Grade (PG)

O ensaio de Grau de Desempenho (PG) foi realizado para determinar a temperatura máxima em que os ligantes atendem aos critérios de desempenho estabelecidos pelas especificações SUPERPAVE, considerando os limites de G*/sen δ de 1,0 kPa para amostras não envelhecidas e 2,2 kPa para amostras envelhecidas.

Para o ligante modificado com 7% de seiva de *Euphorbia tirucalli*, a temperatura de falha estimada foi de 68,2 °C na condição não envelhecida e de 64,8 °C após o envelhecimento em RTFOT. O CAP 50/70 apresentou temperaturas de 66,1 °C (não envelhecido) e 64,8 °C (RTFOT).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa avaliou o desempenho físico e reológico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado com 7% de seiva de *Euphorbia Tirucalli*, com foco na viabilidade técnica e sustentabilidade da aplicação desses bioligantes na pavimentação asfáltica. Os resultados obtidos ao longo dos ensaios laboratoriais demonstraram que a adição do modificador vegetal alterou significativamente as propriedades do ligante original.

Nos ensaios físicos, observou-se redução nos valores de penetração, indicando aumento da rigidez do ligante, e elevação no ponto de amolecimento, o que sugere maior resistência às deformações em temperaturas elevadas. A viscosidade Brookfield também apresentou crescimento relevante, evidenciando que a modificação vegetal contribuiu para maior consistência do ligante, especialmente nas temperaturas operacionais de mistura e compactação.

As análises reológicas reforçaram esses resultados. No ensaio de grau de desempenho (PG), o ligante modificado apresentou temperatura de falha superior à do CAP original na condição não envelhecida, atendendo aos requisitos das especificações SUPERPAVE. No entanto, após o envelhecimento em RTFO, o ganho observado foi reduzido, indicando sensibilidade térmica do aditivo natural ao processo de oxidação acelerada.

No ensaio MSCR, os valores de compliância não recuperável (Jnr) para o ligante modificado permaneceram abaixo do limite estabelecido para tráfego padrão, e os valores de recuperação elástica foram compatíveis com os obtidos para o ligante convencional, demonstrando que a modificação não comprometeu significativamente o desempenho frente à deformação permanente.

Assim, os resultados obtidos evidenciam que a seiva de *Euphorbia Tirucalli* apresenta potencial como agente modificador de ligantes asfálticos, conferindo propriedades adequadas para aplicação em pavimentação, com benefícios associados à sustentabilidade ambiental. A utilização de recursos renováveis como este bioligante pode contribuir para a redução do uso de derivados de petróleo e para o desenvolvimento de tecnologias mais ecológicas na construção civil. Recomenda-se, contudo, a realização de estudos adicionais, incluindo avaliação do desempenho em misturas asfálticas e em campo, para consolidar sua aplicação prática.

5. REFERÊNCIAS

Bernucci, L. B.; J. Y. Motta; J. P. H. Ceratti; D. C. Soares e M. G. R. Leite (2008) *Pavimentação: treinamento para engenheiros*. São Paulo: PINI.

Calvin, M. (1980) *Petroleum plant research report*. University of California.

Costa, A. L. M. (2021) *Estudo reológico de ligantes asfálticos modificados*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br (acesso em 14/07/2025).

Dantas, E. F. (2025) *Desempenho de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por seiva de Euphorbia tirucalli*. Monografia (iniciação científica). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande. Disponível em: https://www.ufcg.edu.br (acesso em 14/07/2025).

Eshel, A.; Y. Zilberstein; M. Waisel; U. Kafkafi e Y. Ben-Hur (2010) Anatomical adaptations of *Euphorbia tirucalli* to arid environments. *Environmental and Experimental Botany*, v. 69, n. 1, p. 31–38. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.02.010.

Farias, P. V. R. (2024) *Avaliação das propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com seiva de Euphorbia tirucalli (Aveloz)*. Monografia (iniciação científica). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande. Disponível em: https://www.ufcg.edu.br (acesso em 14/07/2025).

Neto, A. C. F. (2019) *Propriedades viscoelásticas de ligantes asfálticos e análise do ensaio MSCR*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br (acesso em 14/07/2025).

Santos, C. M. e L. F. M. Sousa (2022) Tecnologias sustentáveis na pavimentação asfáltica. *Revista Científica de Engenharia*, v. 16, n. 2, p. 33–41. DOI: 10.12345/rce.v16n2.2022.

Silva, R. M.; L. M. Siqueira e D. A. Severino (2016) Propriedades físicas dos ligantes asfálticos e sua influência na pavimentação. *Revista Transportes*, v. 24, n. 1, p. 77–85. DOI: 10.14295/transportes.v24i1.1207.

ABNT (2007) *NBR 6576: Determinação da penetração em ligantes asfálticos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2016) *NBR 6560: Determinação do ponto de amolecimento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2009) *NBR 15235: Envelhecimento em estufa de filme fino rotativo*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2021) *NBR 15184: Medida de viscosidade rotacional com Brookfield*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM (2011) *ASTM D6816: Standard Test Method for Determining the PG of Modified Asphalt Binders*. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM (2015) *ASTM D7405: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*. West Conshohocken: ASTM International.

Leonardo Rodrigues Guedes (leonardo.guedes@estudante.ufcg.edu.br)
Lara Pereira Tavares Mendes (lara.pereira@estudante.ufcg.edu.br)
Ana Maria Gonçalves Duarte (ana.duartemendonca@gmail.com)
Manoel Leandro Araújo e Farias (mlaf.engcivil@gmail.com)
Jonny Dantas Patricio (jonny_dantas@gmail.com)
John Kennedy Guedes Rodrigues (profkennedy@hotmail.com)
Arthur Nóbrega de Sousa (arthur_nobregas@hotmail.com)
João Pedro Silveira Salustiano (joao.silveira@estudante.ufcg.edu.br)
Paulo Germano Tavares Marinho Filho (marinho.paulo05@gmail.com)
Ana Letícia Feitosa de Macêdo (leticiamacedo.engcivil@gmail.com)
Universidade Federal de Campina Grande, CTRN, Engenharia Civil, Rua Aprigio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, Brasil.

DESEMPENHO DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO

Larissa Santana Batista[1], **Adla Jamilly Vieira Felipe**[1], **Thayse Bezerra da Silva**[1], **Ana Leticia Ramos Bezerra**[2]
[1]Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), [2]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

RESUMO
A crescente geração de resíduos sólidos pela indústria de mineração exige soluções inovadoras para sua reutilização. Este artigo investiga o impacto da incorporação de dois tipos de resíduos da mineração, scheelita e Pó de Quartzito, nas propriedades de absorção de água de pavers de concreto. O estudo experimental envolveu a caracterização detalhada dos resíduos e a produção de misturas de concreto para pavers, em que o agregado miúdo convencional foi substituído pelos resíduos em diferentes proporções. Os materiais foram caracterizados conforme normas vigentes, e as misturas, curadas por 28 dias, foram submetidas a ensaios de absorção de água segundo a NBR 9781/2013. Todas as formulações apresentaram absorção média ≤ 6 % e individual ≤ 7 %. O pó de quartzito exibiu os menores índices de absorção, atribuídos à sua granulometria mais fina e morfologia. Os resultados confirmam a viabilidade técnica de utilização desses resíduos como substitutos do agregado miúdo convencional.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A rápida industrialização e urbanização geraram grandes volumes de resíduos industriais, que demandam grandes espaços para sua disposição. Conforme Gondim *et al.*, (2022), a destinação ambientalmente adequada dos resíduos da mineração representa um desafio tanto para os governos quanto para a indústria. Na gestão desses resíduos, o armazenamento, muitas vezes, realizado em grandes pilhas ou barragens de rejeitos, consiste em um dilema relacionado a questão ambiental bastante significativo para as empresas do setor de mineração. Atualmente, busca-se a utilização desses resíduos na construção civil como uma solução para os problemas ambientais. Ao empregar esses materiais em substituição aos convencionais, é possível reduzir a demanda por recursos naturais e os custos de projetos (Samantasinghar; Singh, 2023).

Essa perspectiva possibilita a incorporação de materiais alternativos à cadeia produtiva, a fim de alcançar o equilíbrio entre os aspectos econômicos, ambientais e tecnológicos. Dessa forma, promove a redução do quantitativo de resíduos que seria descartado no meio ambiente. Assim, a utilização de resíduos da mineração se apresenta como uma solução diante das demandas dos processos produtivos do setor de infraestrutura de transportes do país, tendo em vista a viabilidade de utilização desses resíduos como matéria-prima para o desenvolvimento de novos materiais com características semelhantes aos convencionais. Principalmente, no modal rodoviário, responsável por atividades de construção, manutenção e restauração de pavimentos que demandam um consumo expressivo de energia e recursos naturais (Celauro *et al.*, 2015).

Os pavers, representam uma área potencial para a aplicação de resíduos, dada a sua demanda por grandes volumes de agregados. A substituição parcial ou total de agregados naturais por resíduos pode trazer benefícios ambientais e econômicos, como a redução do consumo de recursos virgens e a diminuição da quantidade de material enviado para aterros. A norma brasileira NBR 9781/2013 trata das especificações e métodos de ensaio das peças de concreto para pavimentação, estabelecendo requisitos para certificação e aceitação das peças.

A busca por soluções mais sustentáveis tem impulsionado a pesquisa acadêmica na aplicação de resíduos da mineração em pavers. Diversos trabalhos já investigaram a incorporação desses materiais nas propriedades e no desempenho dos blocos de concreto, a exemplo de rejeito de minério de ferro, resíduo do polimento de porcelanato, resíduos de quartzito e resíduos de serragem de rochas ornamentais (Guerra, 2014; Nascimento, 2016; Júnior *et al.*, 2018; Bôsso *et al.*, 2021).

Nessa pespectiva, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da incorporação de resíduos de scheelita e Pó de Quartzito, provenientes de atividades mineradoras, nas propriedades de absorção de água em pavers de concreto. A absorção de água é uma propriedade fundamental que influencia diretamente a durabilidade do material, especialmente em ambientes sujeitos a ciclos de umidade e secagem. Sendo um fator que influencia na análise para aceitação das peças para pavimentação, sendo expressa em porcentagem e representando a porosidade do concreto, relacionando a penetração de água nos poros permeáveis e a massa em estado seco (SILVA, 2014). Segundo Tafarel et al. (2016), o aumento da absorção pelo concreto é um dos fatores que

causam a redução na resistência do mesmo. Ao investigar o comportamento de absorção, busca-se determinar a viabilidade técnica de utilização desses resíduos na produção de pavers, contribuindo para o avanço da pesquisa em materiais de construção sustentáveis.

2. METODOLOGIA

Para a realização do experimento do estudo foram seguidas as seguintes etapas: seleção e caracterização dos materiais, Definição do traço convencional, planejamento experimental e análise de superfícies de resposta para definição da proporção de cada resíduo para a produção dos corpos de prova de pavers, foram utilizados cimento Portland tipo CP II-F 32, água potável, agregado graúdo (brita 0) e agregado miúdo (areia de Pó de Quartzito natural). Os resíduos de mineração investigados foram o resíduo de scheelita (proveniente da extração de tungstênio) e o resíduo do Pó de Quartzito ambos utilizados como substitutos parciais ou totais do agregado miúdo. A caracterização física e química dos resíduos foi realizada, incluindo ensaios de granulometria, massa específica, absorção e composição química, conforme detalhado na Tabela 1, de acordo com as respectivas normas da ABNT.

Tabela 1: Ensaios dos agregados miúdos e suas respectivas normas

	ENSAIOS	NORMA
Caracterização física dos agregados miúdos	Granulometria: finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
	Massa unitária: estado solto e compactado	NBR NM 45/2006
	Absorção de água	NBR NM 30/2001
	Material pulverulento	NBR NM 46/2003
	Massa específica do agregado seco; Massa especifica SSS; Massa específica	NBR NM 53/2009

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A produção dos pavers seguiu um traço de referência e traços com diferentes percentuais de substituição do agregado miúdo por scheelita e do Pó de Quartzito. Os corpos de prova foram moldados e submetidos a um processo de cura padrão por 28 dias em ambiente controlado, conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 9781 (ABNT, 2013) para peças de concreto para pavimentação. O ensaio de absorção de água foi conduzido conforme a ABNT NBR 9781 (ABNT, 2013). As amostras foram secas em estufa a (105 ± 5) °C até massa constante (mc), resfriadas e, em seguida, imersas em água a (5 ± 1) mm de nível. A massa dos corpos de prova foi determinada após períodos de imersão de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, na condição saturada de superfície seca.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o planejamento experimental foram moldados pavers e realizados ensaios de Resistência a Compressão Simples (RCS) para verificar qual a melhor proporção de resíduos incorporados no concreto convencional. Vale salientar que a partir do traço convencional (1:2:2:0,45), fixou-se as proporções de cimento, brita e a/c e variou-se apenas as proporções do agregado miúdo (areia, pó de pedra e resíduo), uma vez que a intenção do estudo é avaliar a proporção de resíduo que pode ser substituída no traço pelos agregados convencionais mantendo ou melhorando as características de RCS e absorção. Os resultados da RCS foram analisados via o planejamento experimental de misturas rede simplex para três variáveis por meio do software Statistica 8.0, resultando em 10 composições diferentes. Utilizando 40 CP´s submetidos ao teste de RCS para cada resíduo.

Os resultados dos ensaios de absorção de água para os pavers com incorporação de scheelita e do Pó de Quartzito são apresentados e discutidos a seguir. Uma vez que o traço escolhido para o traço de referência foi o Traço (1:4:0,45), este encontra-se satisfatório tanto na absorção individual, quanto na absorção média. Na Tabela 2, encontram-se os valores definidos para o traço convencional.

Tabela 2: Dados para o traço de referência

Dados Traço de Referência		
Traço	RCS (MPa)	Absorção média (%)
1:4:0,45	39,63	3,75

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.1. Absorção com Incorporação de Resíduo de Scheelita

De acordo com o planejamento experimental, as análises estatísticas se mostraram satisfatórias, sendo utilizado o percentual tanto da scheelita quanto do Pó de Quartzito no concreto com o teor máximo, ou seja 100%. Desta

forma, utilizou-se o traço do concreto da scheelita e do Pó de Quartzito com o resíduo sendo o agregado miúdo em sua totalidade. Foi escolhida essa proporção uma vez que este estudo tem como objetivo viabilizar a máxima reutilização dos resíduos da mineração no concreto (Batista, 2022). Para validação desde percentual de resíduo da scheelita, faz-se necessária a análise do comportamento da absorção nos pavers por se tratar de um parâmetro de suma importância e aceitação conforme normativa técnica da NBR 9781 (ABNT, 2013). Os dados coletados de absorção para o percentual de 100% do resíduo no concreto são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Absorção para o percentual de 100% do resíduo da scheelita.

ABSORÇÃO			
M1	M2	Aborção (%)	Abméd (%)
2456,10	2588,90	5,41	5,46
2444,90	2576,40	5,38	
2438,20	2574,40	5,59	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da Tabela 2, percebe-se que as amostras de peças de concreto apresentaram absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo nenhum valor individual maior do que 7%. Dessa forma, é possível concluir que a scheelita está apta a utilização em pavers.

3.2. Absorção com Incorporação de Resíduo do Pó de Quartzito

Para validação desde percentual de resíduo do pó de quartzito, faz-se necessária a análise do comportamento da absorção nos pavers, por se tratar de um parâmetro de suma importância, conforme dispõe a normativa técnica da NBR 9781/2013. Desse modo, seguem os dados coletados de absorção para o percentual de 100% do resíduo no concreto (Tabela 4).

Tabela 4: Absorção para o percentual de 100% do resíduo de Pó de Quartzito

ABSORÇÃO			
M1	M2	Aborção (%)	Abméd (%)
2525,80	2626,50	3,99	3,86
2525,60	2625,20	3,94	
2512,70	2604,30	3,65	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Percebe-se que as amostras de peças de concreto apresentaram absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, com nenhum valor individual maior do que 7 %, estando apta a utilização em pavers. Analisando os resultados e comparando-as as normas internacionais estudadas, os pavers de quartzito poderiam ser utilizados em todas as localidades. Comparando com os dados obtidos a partir da substituição da scheelita, a absorção foi menor, o que pode justificar o aumento da RCS dos blocos com Pó de Quartzito, com menores poros e melhor agregação e densificação das partículas.

Comparando os resultados de absorção entre os pavers com scheelita e aqueles com Pó de Quartzito, observa-se que o tipo de resíduo e sua granulometria influenciam diretamente a estrutura de poros do material. Com base nos dados apresentados, tanto o resíduo de scheelita quanto o pó de quartzito demonstraram desempenho satisfatório em relação à absorção de água, atendendo aos limites estabelecidos pela NBR 9781/2013 — valor médio inferior ou igual a 6% e nenhum valor individual superior a 7%.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que foi possível avaliar o efeito da incorporação de resíduos de scheelita e Pó de Quartzito nas propriedades de absorção de água em pavers de concreto. Os dois resíduos de mineração analisados apresentaram comportamento semelhante quanto ao seu potencial de uso no concreto, como substitutos do agregado miúdo convencional. Observou-se que a substituição total do agregado miúdo pelo pó de quartzito resultou em menores índices de absorção em comparação ao resíduo de scheelita, indicando uma estrutura menos porosa e melhor compactação entre as partículas. Esse resultado pode estar diretamente associado à granulometria e à morfologia do quartzito, que favorecem a redução da porosidade e, consequentemente,

contribuem para o aumento da resistência à compressão simples.

No que se refere ao planejamento experimental, verificou-se que tanto o resíduo de scheelita quanto o de quartzito podem substituir integralmente o agregado miúdo convencional, mantendo ou melhorando a resistência à compressão simples e garantindo valores de absorção dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 9781/2013. Dessa forma, ambos os resíduos demonstraram viabilidade técnica para aplicação na produção de pavers.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). *NBR NM 30: Agregado miúdo – determinação da absorção de água.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). *NBR NM 45: Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio*. ABNT.

Batista, L. S. (2022). Efeitos da incorporação de resíduos da mineração nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade em pavimentos intertravados. Tese (doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

Bôsso, A. R. S. A. et. al., Utilização de resíduos de serragem de rochas ornamentais na fabricação de peças intertravadas de concreto. Revista Humanidades e Inovação v.8, n.50. 2021.

Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., & Lo Casto, B. (2015). Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 41–51. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.001
Engenharia Sanitária e Ambiental, 27(3), 597–606.

Gondim, T. F., et al. (2022). Potencialidade de uso do resíduo da scheelita em sistemas de cobertura de aterro de resíduos.

Guerra, A. N. L. P. Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

Júnior, S. V. A et al. Utilização de Resíduos de Quartzito para Aplicação em Pavimentos Intertravados. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 13, n. 3, p. 196- 200. 2018.

Nascimento, M. V. L. A. Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pernambuco, Caruaru, 2016.
Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Samantasinghar, S., & Singh, S. P. (2023). Red mud-slag blends as a sustainable road construction material. *Construction and Building Materials*, 375, 130926. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130926

Silva, F. M. et al. Análise da aplicação de resíduo de borracha de pneus em piso tátil intertravado de concreto. 2014. 129f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Inovação) - Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.

Tafarel, N. F. et al. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. Revista Matéria, v.21, n.4, pp. 974-986, 2016.

Larissa Santana Batista (larissa.batista@ufcg.edu.br)
Adla Jamilly Vieira Felipe (adlajamilly18@outlook.com)
Thayse Bezerra da Silva (thaysebe@hotmail.com)
Universidade Federal de Campina Grande, Campus Sede – CEP 58429-900 – Campina Grande, PB, Brasil
Ana Leticia Ramos Bezerra (ana.ramosb@ufpe.br)
Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas
Avenida Professor Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife - PE

DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS COM RAP E RESÍDUO DE BAUXITA

Lara Pereira Tavares Mendes[1], Leonardo Rodrigues Guedes[1], Allan Kewen Câmara de Oliveira[1], Adla Jamilly Vieira Felipe[1], Maria Eloisa Barbosa da Silva[1], Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena[1], Luciana de Figueiredo Lopes Lucena[2], Osires de Medeiros Melo Neto[3]

[1]Universidade Federal de Campina Grande, [2]Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [3]Universidade Federal de Lavras

RESUMO

O descarte inadequado dos resíduos gerados pelos processos produtivos, somado à escassez de locais apropriados para sua destinação final, evidencia a necessidade de adoção de mecanismos eficazes para uma gestão sustentável desses materiais. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de misturas asfálticas com a incorporação de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e resíduo de bauxita (RB), buscando alternativas ambientalmente sustentáveis para a pavimentação. Para isso, foram produzidas três misturas: referência, com 5% de RB, e com 20% de RAP+5% de RB, dosadas pela metodologia Superpave, e submetidas à ensaios de caracterização mecânica. Os resultados indicaram que a adição de RAP e RB proporcionou aumento da rigidez, e o uso conjunto proporcionou o melhor desempenho global. Com isso, observa-se que o uso combinado desses resíduos é tecnicamente viável e ambientalmente vantajoso, contribuindo para a redução do consumo de materiais naturais e destinação adequada de resíduos industriais.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O modal rodoviário, principal meio de transporte no Brasil, é responsável pelo elevado consumo de recursos materiais e energéticos, além da geração significativa de resíduos, o que acarreta impactos ambientais e financeiros expressivos. Nesse contexto, a busca por maior sustentabilidade nas atividades do setor envolve a adoção de soluções inovadoras nos projetos de pavimentação, bem como a redução da necessidade de materiais virgens (Selvam *et al*., 2022).

Entre as estratégias adotadas, a reutilização de resíduos na produção de novas misturas asfálticas é uma alternativa que tem ganhado visibilidade nos últimos anos por sua viabilidade técnica e potencial de mitigação ambiental (Gaspar *et al*., 2020; de Medeiros Melo Neto *et al*., 2022). Dentre esses materiais, destaca-se o *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), definido pela Resolução nº 14, de 8 de julho de 2021, como o material proveniente da fresagem ou remoção de camadas de revestimento asfáltico, composto por agregados recobertos por ligante oxidado. Também ganha relevância a incorporação de resíduos de mineração em misturas asfálticas, contribuindo para a redução da exploração de recursos naturais e para o aproveitamento de passivos ambientais.

O resíduo de bauxita (RB), gerado no beneficiamento do minério de bauxita para obtenção de alumina (Al_2O_3), está entre os resíduos minerais com potencial de reaproveitamento. Com elevada concentração de óxidos metálicos e álcalis, e produção estimada em até 10 bilhões de toneladas até 2050 (IAI, 2022), o RB impõe desafios ambientais e logísticos para armazenamento e disposição. Sua incorporação em misturas asfálticas tem se mostrado promissora, especialmente como fíler ou substituto parcial de agregados finos (Yao *et al*., 2020; Lima e Thives, 2020; Mendes, 2024).

Do ponto de vista ambiental, o uso de resíduos como RAP e RB pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), do consumo energético e dos custos de pavimentação (Rafiq *et al*., 2021). Apesar dos avanços em pesquisas com cada material de forma isolada, não foram encontrados na literatura estudos que avaliem o desempenho de misturas asfálticas recicladas com a combinação de RAP e RB. Com isso, este estudo objetivou avaliar a influência do uso combinado de RAP e RB, como agregados, no comportamento mecânico de misturas asfálticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Este estudo utilizou agregados graníticos obtidos na cidade de Campina Grande, Brasil. Os agregados foram coletados em três diâmetros de partículas: 19,0 mm, 12,5 mm e pó de pedra. O fíler, obtido em comércio local, foi a cal, utilizada como melhorador de adesividade agregado-ligante. O resíduo de bauxita incorporado nas misturas nesta pesquisa foi fornecido por Empresa Multinacional localizada em São Luís-MA, e retirado da ARB 06 (Área de Resíduo de Bauxita), uma lagoa de disposição de resíduos, inativa desde 2019. O agregado RAP encontrava-se armazenado em laboratório. A Tabela 1 apresenta a caracterização física dos agregados,

resíduo de bauxita e do RAP, e a Figura 1 mostra as distribuições granulométricas desses materiais.

Tabela 1: Resultado da caracterização física dos agregados graníticos, resíduo de bauxita e agregado RAP

Ensaio	Norma	Especificações	Resultados					
			Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra	Resíduo de bauxita	RAP	
							Black	White
Massa específica real (g/cm³)	DNIT 413:2021	NA	2,723	2,722	2,757	3,33	2,464	2,466
Massa específica aparente (g/cm³)		NA	2,695	2,688	2,723	2,09	2,374	2,378
Absorção (%)		≤ 2	0,446	0,595	0,46	0,42	0,50	0,89
Índice de Forma	DNIT 424:2020	≥ 0.5	0,653	0,649	NA	NA	NA	NA
Equivalente Areia (%)	DNIT-ME 054:1997	≥ 55	NA	NA	67,3	45,0	86,59	68,56
Abrasão "Los Angeles" (%)	DNIT 035:1998	≤ 55	18,5	20,4	NA	NA	NA	NA
Partículas alongadas e achatadas (%)	DNIT-ME 429:2020	≤ 10	7,76	7,86	NA	NA	52,62	9,34
Partículas fraturadas (%)	DNIT-ME 430:2020	≥ 90	98,28	99,34	NA	NA	86,59	68,56
Angularidade (%)	DNIT-ME 415:2019	≥ 45	NA	NA	45,1	NA	NA	9,34

Note: NA – não aplicado

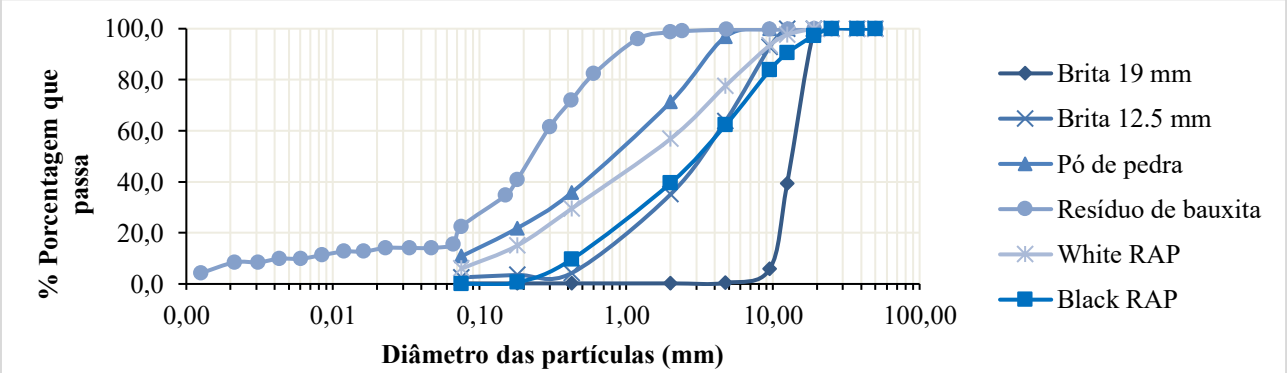


Figura 1: Curvas de distribuição dos tamanhos dos grãos dos agregados em estudo

Os materiais atenderam as especificações das normas referenciadas. O ligante asfáltico, classificado como CAP 50/70, atendeu aos critérios de qualidade definidos pela Resolução ANP Nº 897, de 18 de novembro de 2022, garantindo suas propriedades físico-reológicas adequadas para aplicação em pavimentação.

2.2. Métodos

2.2.1. Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada com base na metodologia SUPERPAVE, visando atingir 4% de volume de vazios e de giros de projeto (Nprojeto), que simula o número de solicitações provocadas pelo tráfego sobre o revestimento, fixado em 100, valor representativo de um tráfego de intensidade média a alta. Três composições granulométricas foram avaliadas a partir dos agregados brita 19 mm, brita 12,5 mm, pó de pedra e cal, sendo selecionada uma curva de projeto de comportamento graúdo enquadrada na Faixa C da norma DNIT 031/2006 – ES. O teor de ligante de projeto foi estabelecido em 5%, após avaliação das propriedades volumétricas dos corpos de prova compactados com o compactador giratório SERVOPAC.

Foram produzidas três misturas: (i) mistura de referência, sem resíduos; (ii) mistura com 20% de RAP, considerado como agregado; e (iii) mistura com 20% de RAP e 5% de resíduo de bauxita (RB). Ensaios adicionais com teores superiores de RB (10% e 15%) foram realizados, mas a mistura com 5% apresentou desempenho mecânico mais próximo da referência, verificado a partir de ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, módulo dinâmico, fadiga e deformação permanente, sendo mantida para as análises subsequentes. As misturas produzidas apresentaram os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Proporção de materiais nas misturas asfálticas e parâmetros volumétricos

Material/Parâmetro	Porcentagem % Mistura REF	Porcentagem % Mistura 5%RB	Porcentagem % mistura 20%RAP+5%RB	Limites
Brita 19,0 mm (%)	14,25	14,25	14,34	NA
Brita 12,5 mm (%)	42,75	42,75	38,24	NA
Pó de pedra (%)	37,05	32,30	18,16	NA
Resíduo de bauxita (%)	-	4,75	4,78	NA
RAP (%)	-	-	19,12	NA
Fíler (%)	0,95	0,95	0,96	NA
Ligante asfáltico	5,00	5,00	4,40	NA
Volume de vazios (%)	4,05	4,11	4,02	4,00
Vazios nos agregados minerais (%)	14,12	12,78	11,49	≥13,00
Relação betume/vazios (%)	71,28	68,07	65,04	65 a 75
Razão pó/asfalto (%)	1,18	1,29	1,35	0,60 a 1,20

Nota: REF: mistura de referência; 5%BR: mistura virgem com 5% de resíduo de bauxita; 20%RAP+5%BR: mistura reciclada com 20% de RAP e 5% de RB.

2.2.2. Análise mecânica das misturas asfálticas

Foram realizados os seguintes ensaios mecânicos para avaliação do desempenho das misturas asfálticas: resistência à tração indireta (DNIT 136/2018), módulo de resiliência (DNIT 135/2018), resistência retida à tração – RRT (DNIT 180/2018), resistência à fadiga (DNIT 183/2018), módulo dinâmico (DNIT 416/2019) e deformação permanente – *Flow Number* (DNIT 184/2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os valores médios de três corpos de prova nos ensaios de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR), resistência retida à tração (RRT) e deformação permanente (FN) para os três grupos de misturas asfálticas analisadas.

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos

Ensaio mecânico	Mistura de referência		Mistura com 5% de RB		Mistura com 20% de RAP e 5% de RB	
	Resultado	Desvio	Resultado	Desvio	Resultado	Desvio
Resistência à tração (RT) - MPa	1,20	0,05	1,24	0,06	1,37	0,09
Módulo de resiliência (MR) - MPa	3825	147	3943	205	6876	360
Dano por umidade induzida (RRT) - %	96	NA	95	NA	93	NA
Flow Number (FN) - Nº de ciclos	360	102	408	4	868	117

As misturas asfálticas avaliadas apresentaram resistência à tração indireta superior ao mínimo exigido pela DNIT 031/2024 (0,65 MPa), com destaque para as misturas contendo RB e RAP, cujo desempenho pode ser atribuído ao aumento do teor de finos e à rigidez proporcionada pelo ligante oxidado do RAP. Esses resultados estão em conformidade com os achados de Yao *et al*. (2020), que observaram aumento na rigidez do mástique asfáltico com o uso de RB como fíler, e com os estudos de Medeiros Melo Neto *et al*. (2022) e Oliveira, Farias e Silva (2022), que avaliaram o efeito do RAP. O aumento da rigidez resultou também em maiores valores de módulo de resiliência, embora isso possa indicar menor resistência à fadiga. Todas as misturas atenderam aos requisitos de resistência retida à tração indireta (>70%) segundo a norma DNIT 031/2024. A leve redução da resistência à umidade nas misturas com RB pode estar relacionada à alta polaridade dos óxidos presentes no resíduo, que comprometem a adesividade com o ligante (Zhang *et al.,* 2015).

Quanto à deformação permanente, os resultados mostraram melhoria de desempenho nas misturas com RB e RAP, corroborando o estudo de Lima e Thives (2020), que identificaram ganhos expressivos na resistência à deformação com a substituição parcial do pó de pedra por RB. Os resultados de módulo dinâmico e vida de fadiga plotados em gráficos, estão ilustrados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

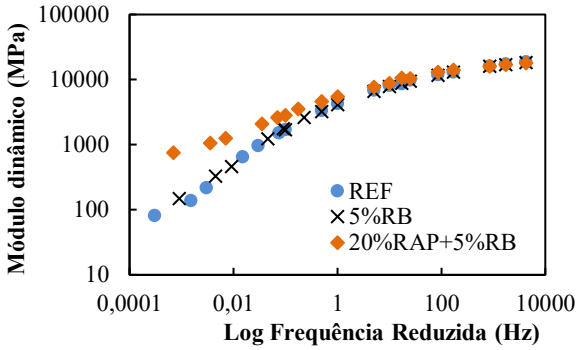


Figura 2: Resultados do ensaio de módulo dinâmico para as misturas analisadas transladados horizontalmente para a temperatura de referência: 20ºC

Em baixas temperaturas, no geral, as curvas mestras das misturas analisadas mostraram, visualmente, uma mesma tendência de variação, com magnitudes praticamente equivalentes. No entanto, para altas temperaturas as misturas apresentaram um melhor comportamento, principalmente a mistura com RAP e RB. Esses resultados corroboram com o estudo de Oliveira, Farias e Silva (2022), que observaram o aumento do módulo da mistura com o aumento dos teores de RAP na mistura, estando de acordo com aumento da rigidez para elevados níveis de RAP.

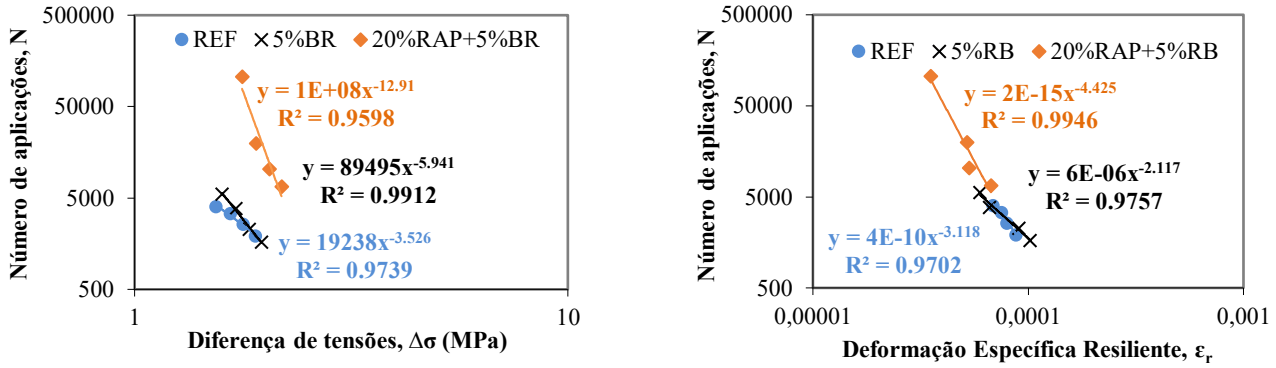


Figura 3: Resultados de vida de fadiga das misturas analisadas: Número de ciclos até a falha x diferença de tensões no centro do CP (a), e Número de ciclos até a ruptura versus deformação específica resiliente (b)

As misturas analisadas apresentaram coeficientes de correlação (R^2) superiores a 0,80, atendendo ao mínimo exigido pela DNIT 183/2018, o que indica a adequação dos modelos obtidos para representar o comportamento à fadiga. A mistura com RAP apresentou maior rigidez em relação às demais, resultando em maior número de ciclos até a ruptura. No entanto, conforme observado por Oliveira, Farias e Silva (2022), esse aumento de rigidez, associado ao teor de RAP, pode reduzir a vida em fadiga. Huang et al. (2005) também destacaram a menor tenacidade pós-falha em misturas com RAP. A mistura com 5% de RB apresentou comportamento semelhante ao da mistura de referência, com tendência a suportar mais ciclos sob mesma deformação, o que pode indicar desempenho superior em fadiga.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A incorporação do RAP e do RB em misturas asfálticas apresentou resultados satisfatórios quanto ao desempenho mecânico e aos parâmetros volumétricos avaliados. As misturas com RAP e RB demonstraram resistência à tração, módulo de resiliência e deformação permanente superiores à mistura de referência, indicando maior rigidez. Do ponto de vista ambiental, o uso combinado de RAP e RB contribui para a redução do consumo de agregados naturais e para a valorização de resíduos comumente destinados a áreas de disposição, indicando uma alternativa mais sustentável para a pavimentação rodoviária. Ressalta-se que a pesquisa não avaliou o desempenho a longo prazo das misturas, portanto, recomenda-se que estudos posteriores realizem essa verificação, bem como comprove econômica e ambientalmente a viabilidades desta aplicação, por meio da análise de ciclo de vida e viabilidade econômica em diferentes contextos de tráfego, clima e adaptação da indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

de Medeiros Melo Neto, O.; I. Minervina Silva; L. C. de Figueiredo Lopes Lucena et al. (2022) Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. *Construction and Building Materials,* v. 349, 128728. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728

DNIT (2018) Norma DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018) Norma DNIT 180/2018 – ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018) Norma DNIT 183/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018) Norma DNIT 184/2018 – ME: Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2019) Norma DNIT 416/2019 – ME: Pavimentação – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Gaspar, M. S., Vasconcelos, K. L., Lopes, M. M., e Bernucci, L. L. (2020). Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. *Transportes*, 28(2), 87-99. https://doi.org/10.14295/transportes.v28i2.2133.

Huang, B.; Li, G.; Vukosavljevic, D.; Shu, X. e Egan, B. K. (2005). Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 1929(1), 37-45. https://doi.org/10.1177/0361198105192900105

Instituto Internacional do Alumínio (IAI). Sustainable bauxite residue management guidance. International Aluminium Institute. World Aluminiun. 2022.

Lima, M. S.S e Thives, L. P. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, v. 260, p. 119894, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119894.

Oliveira, M. S.; de Farias, M. M. e Silva, J. P. S. (2022). Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01132. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01132

Rafiq, W.; Musarat, M. A.; Altaf, M.; Napiah, M.; Sutanto, M. H.; Alaloul, W. S. e Mosavi, A. (2021). Life cycle cost analysis comparison of hot mix asphalt and reclaimed asphalt pavement: A case study. *Sustainability*, 13(8), 4411. https://doi.org/10.3390/su13084411.

Selvam, M.; Debbarma, S.; Singh, S. e Shi, X. (2022). Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements–A state-of-the-art review. *Construction and building materials*, 317, 125838. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125838.

Yao, L.; Gao, W.; Ma, X. e Fu, H. (2020). Properties analysis of asphalt binders containing Bayer red mud. *Materials*, 13(5), 1122. https://doi.org/10.3390/ma13051122

Zhang, J.; Apeagyei, A. K.; Airey, G. D. e Grenfell, J. R. (2015). Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate–bitumen adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62, 45-54. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.012

Zhang, J., Yao, Z., Wang, K., Wang, F., Jiang, H., Liang, M., ... & Airey, G. (2021). Sustainable utilization of bauxite residue (Red Mud) as a road material in pavements: A critical review. *Construction and Building Materials*, 270, 121419. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121419.

Lara Pereira Tavares Mendes (lara.pereira@estudante.ufcg.edu.br)
Leonardo Rodrigues Guedes (leonardo.guedes@estudante.ufcg.edu.br)
Allan Kewen Câmara de Oliveira (allankewen7@gmail.com)
Adla Jamilly Vieira Felipe (adlajamilly18@outlook.com)
Maria Eloisa Barbosa da Silva (mmariaeloisabs@gmail.com)
Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena (ledach@uol.com.br)
Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), Campus Sede – CEP 58429-900 – Campina Grande, PB, Brasil
Luciana de Figueiredo Lopes Lucena (luciana.lucena@ufrn.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação – PPgCTI, Escola de Ciências e Tecnologia, Campus Universitário Lagoa Nova – CEP 59078-970 – Natal, RN, Brasil
Osires de Medeiros Melo Neto (osiresdemedeiros@gmail.com)
Universidade Federal de Lavras, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia, Aquenta Sol - Campus Universitário - CEP 37200-000 - Lavras, MG, Brasil

DESENVOLVIMENTO DE POZOLANA DE REJEITO DE MINERAÇÃO PARA USO COMO ESTABILIZANTE QUÍMICO EM SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Carlos Augusto de Souza Oliveira[1], **Viviane Reis Silva**[1], **Marconi Oliveira de Almeida**[1], **Roger Júnio Campos**[1], **Sérgio Pacífico Soncim**[1], **Kellen Poliana Mendes de Medeiros**[2], **Pedro Marcelo Pinto Cunha**[2], **Lais Resende Pereira**[2]

[1]Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Campus Itabira, [2]Vale S. A.

RESUMO

No contexto da mineração de ferro, a crescente geração de rejeitos no Brasil demanda soluções sustentáveis para seu aproveitamento. Uma alternativa promissora consiste no desenvolvimento de materiais com características pozolânicas a partir de rejeitos de minério de ferro (RMF). Para isso, foram realizados tratamentos térmicos, bem como caracterizações físicas e microestruturais por difração de raios X (DRX) e análise termogravimétrica (ATG), com o objetivo de avaliar a viabilidade do RMF como material para estabilização química de solos em pavimentação. A reatividade pozolânica do RMF foi comprovada por meio de índices de desempenho com cimento Portland e cal hidratada. Os resultados confirmaram a viabilidade técnica de utilizar o RMF como pozolana artificial do tipo N, apresentando-se como uma solução sustentável para o setor de pavimentação e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte de rejeitos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento de materiais com baixa emissão de CO_2 e menor consumo de recursos não renováveis, como os materiais pozolânicos, traz importantes benefícios para a sustentabilidade na construção civil. Segundo a ABCP (2002), materiais pozolânicos incluem rochas vulcânicas, algumas argilas calcinadas (550 °C a 900 °C), subprodutos da queima de carvão mineral, entre outros.

O rejeito de minério de ferro apresenta potencial para uso como material cimentício, devido à presença de sílica, alumina e óxidos de ferro, que favorecem reações pozolânicas quando adequadamente tratados. Pesquisas buscam viabilizar o uso desses coprodutos para substituir materiais naturais, reduzir a extração de recursos primários e mitigar as emissões de CO_2, principalmente da indústria cimenteira.

Na estabilização química de solos, o cimento Portland é amplamente utilizado devido à sua eficiência em melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do solo. No entanto, seu uso intensivo implica elevado consumo de matérias-primas e altas emissões de CO_2. A incorporação de pozolana artificial desenvolvida a partir do rejeito de minério de ferro (RMF) em misturas estabilizadas, surge como uma alternativa promissora, pois permite reduzir a quantidade de cimento necessária, diminuindo o consumo de recursos naturais e os impactos ambientais associados. Além disso, o aproveitamento do RMF contribui para a destinação sustentável de um resíduo abundante, agregando valor ao material e promovendo benefícios econômicos e ambientais. Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver um material com potencial pozolânico a partir de rejeitos de minério de ferro, visando sua aplicação em camadas da estrutura do pavimento contento material granular com ou sem estabilizantes químicos e como filler em misturas asfálticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O coproduto da mineração utilizado nesta pesquisa denominado de rejeito ultrafino (RU), foi fornecido pela mineradora Vale S.A., através da mina de Brucutu, localizada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo – MG. Para a verificação da atividade pozolânica, utilizou-se cal hidratada CH I (tipo cálcica) e cimento Portland composto com material carbonático (CPII F 32).

Em virtude de o RU apresentar granulometria semelhante à de uma areia fina, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, conforme listados na Tabela 1.

Tabela 1: Ensaios de caracterização geotécnica do rejeito

Ensaios	Metodologia
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181
Densidade Real	DNER – ME 093
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180
Equivalente de areia	DNER – ME 054

A caracterização mineralógica e química das amostras do RU foi realizada por meio da combinação das técnicas analíticas de difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no modo Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).

Na calcinação do RU foram adotadas cinco temperaturas, 550ºC, 650ºC, 750ºC, 850ºC e 900ºC. Uma vez estabilizada a temperatura no valor pré-definido, as amostras permaneceram por 60 minutos. Para a determinação da perda ao fogo (PF) dos materiais calcinados foi aplicado o Método n°1 - Determinação direta – Método de referência da NM 18 (ABNT, 2012). As amostras do rejeito ultrafino, antes e depois da calcinação, foram submetidas à análise termogravimétrica. O ensaio foi realizado utilizando uma taxa de aquecimento de 10°C/min entre 35°C e 900°C em cadinho de alumina sob uma atmosfera de ar sintético na vazão de 50 ml/min.

Para determinar a reatividade de pozolana, foram adotados dois métodos: I) Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de idade, conforme a NBR 5752/2014; e II) Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias de idade, conforme a NBR 5751/2015. No método I, foram avaliadas 8 misturas (Tabela 2).

Tabela 2: Misturas avaliadas com cimento Portland

Mistura	Descrição
Ref_cim	Argamassa padrão com cimento Portland (referência).
RU	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino em substituição parcial, em massa, do cimento.
Cim_UC550	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino calcinado à 550ºC, em substituição parcial, em massa, do cimento Portland.
Cim_UC650	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino calcinado à 650ºC, em substituição parcial, em massa, do cimento Portland.
Cim_UC750	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino calcinado à 750ºC, em substituição parcial, em massa, do cimento Portland.
Cim_UC850	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino calcinado à 850ºC, em substituição parcial, em massa, do cimento Portland.
Cim_UC850m	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino calcinado à 850ºC e moído, em substituição parcial, em massa, do cimento Portland.
Cim_UC900	Argamassa com 25% de rejeito ultrafino calcinado à 900ºC, em substituição parcial, em massa, do cimento Portland.

Em relação às misturas listadas na Tabela 2, a mistura Cim_UC850m teve em sua composição o material UC850 submetido ao processo de moagem, o qual foi realizado por um moinho de panela com a finalidade de reduzir o tamanho das partículas para promover uma maior exposição da área superficial do material.

No método II, optou-se por avaliar duas misturas (Tabela 3), sendo essas as misturas com material calcinado que apresentaram melhor desempenho no método I.

Tabela 3: Misturas de argamassas compostas com cal hidratada-tipo I

Mistura	Descrição	Hidróxido de cálcio (g)	Rejeito (g)	Água (g)	Consistência (mm)
CH _UC750	Argamassa com cal hidratada tipo I, com adição de rejeito ultrafino calcinado à 750ºC.	104	310,71	245	226
CH _UC850	Argamassa com cal hidratada tipo I, com adição de rejeito ultrafino calcinado à 850ºC.	104	304,94	240	222

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização geotécnica

O RU *in natura* é composto principalmente por partículas com diâmetro inferior a 100 µm. A distribuição granulométrica revela que 90 % das partículas possuem um diâmetro de 95 µm, enquanto o tamanho médio das partículas (D50) é de 12 µm, indicando uma presença significativa de partículas finas nesse intervalo de tamanho. Além disso, 10 % das partículas (D10) têm um tamanho ainda menor, atingindo 1 µm. O ensaio de equivalente de areia confirma a presença de uma quantidade significativa de partículas finas, com um valor de

0% para o RU.

O RU apresentou densidade real de 3,24 g/cm³, valor elevado que se justifica pelos teores residuais de minério de ferro e pelo alto conteúdo de quartzo nas amostras, fatores que contribuem para o aumento da densidade. Nos ensaios de limites de Atterberg, o RU foi classificado como não líquido (NL) e não plástico (NP), evidenciando a ausência de coesão. Esse comportamento está associado à sua composição predominantemente arenosa, resultante da distribuição granulométrica, que confere ao rejeito características semelhantes às de uma areia.

O rejeito ultrafino, submetido ao processo de calcinação a 850 °C, seguido pela etapa de moagem (mistura Cim_UC850m), apresentou uma modificação nos tamanhos das partículas, com valores de D90, D50 e D10 registrando de 16,77 µm a 17,87 µm, de 3,78 µm a 3,93 µm e de 0,38 µm a 0,45 µm, respectivamente. Este fenômeno ilustra a eficácia do procedimento de moagem na fragmentação das partículas, culminando numa distribuição granulométrica mais refinada e controlada. Esse refinamento é particularmente relevante para materiais pozolânicos, destacando a importância desse processo para melhorar as características específicas do RU.

3.2 Caracterização mineralógica e química

Os principais compostos cristalinos encontrados nas amostras foram: quartzo (SiO_2), caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), goethita (FeO(OH)) e hematita (Fe_2O_3). A presença de argilominerais em rejeitos, como a caulinita, é um fator relevante quando se pensa na produção de pozolanas termicamente ativadas, sendo este efetivamente o produto de alteração estrutural em uma grande variedade de materiais pozolânicos. No geral, as amostras encontram-se cristalinas com a presença de fases pozolanicamente inertes como quartzo e hematita. Observou-se também o desaparecimento dos picos de caulinita (C) nas amostras calcinadas a 850 °C e a 900 °C. Tal mudança indica que a caulinita se transformou em metacaulinita. (Bernal *et al*., 2017).

3.3 Perda ao fogo

Todos os materiais tratados termicamente atenderam aos requisitos, perda ao fogo ≤ 10 % e massa retida na peneira 45µm ≤ 20 %, estabelecidos pela norma NBR 12653/2014.

3.4 Análise termogravimétrica

Na amostra de RU in natura, a faixa de 100 – 200 ºC corresponde à perda de água adsorvida (Arab *et al.*, 2015). Nas amostras calcinadas (550 ºC – 850 ºC), a eliminação dessa água foi confirmada. A redução do pico entre 200 – 350 ºC indica a transformação de goethita em hematita (Coey, 2010), e entre 400 ºC – 600 ºC ocorre a desidroxilação de argilominerais, possivelmente formando metacaulinita (Monteiro *et al.*, 2017). Acima de 800 ºC, há desintegração do retículo cristalino e presença de quartzo ou mulita (Pinto, 1994). Os resultados confirmam a viabilidade do RU como pozolana do tipo N, conforme a NBR 12653/2014, especificada para pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos desta norma.

3.5 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland

Conforme Figura 1, as misturas compostas com rejeito ultrafino, seja este in natura ou calcinado, que não passaram pelo processo de moagem, não atenderam ao requisito referente ao índice de desempenho com cimento Portland, em relação à mistura de referência (Ref_cim), pois conforme a NBR 12653/2014, a mistura com material a ser considerado pozolânico de classe N, deve apresentar índice de desempenho maior ou igual a 90 %, em relação ao de controle.

A mistura calcinada a 850 °C apresentou o melhor desempenho, atingindo 82,5 % do índice em relação à Ref_cim. Devido a isso, o material UC850 foi moído para aumentar a finura e, no ensaio de compressão, atingiu 31,13 MPa (90,05 % do controle, que foi 34,57 MPa), atendendo à norma.

Um dos elementos que exerce influência significativa sobre a atividade pozolânica é o processo de moagem. Tal procedimento se mostra essencial devido à aglomeração excessiva das partículas, um fenômeno comum nas argilas durante o processo de calcinação. Esta aglomeração surge devido à necessidade de horas ou mesmo minutos para a completa calcinação das partículas. Assim, a etapa de moagem se torna imperativa para desfazer essas aglomerações e melhorar a reatividade pozolânica do material.

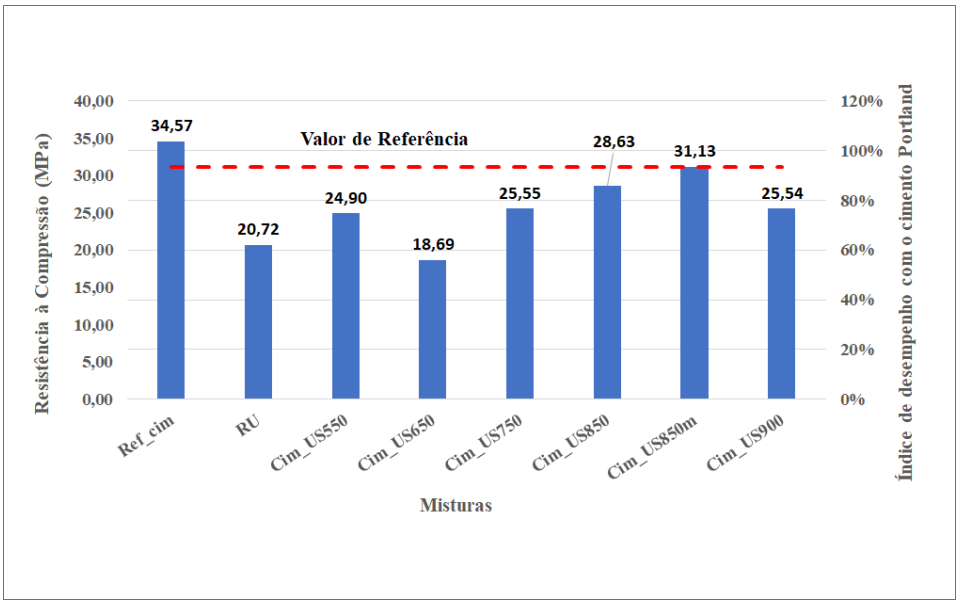


Figura 1: Resistência à compressão aos 28 dias de idade

3.6 Atividade pozolânica com cal hidratada

Nos testes de atividades pozolânicas com cimento Portland, as misturas Cim_UC750 e Cim_UC850 forma consideradas as mais promissoras devido aos resultados e resistência à compressão e pela proximidade da temperatura de calcinação, tendo uma temperatura de calcinação inferior ao Cim_UC900. Desta forma, as referidas misturas foram escolhidas para avaliação do desempenho mecânico com a cal, sem a necessidade de moagem. Os resultados encontram-se apresentados na Figura 2.

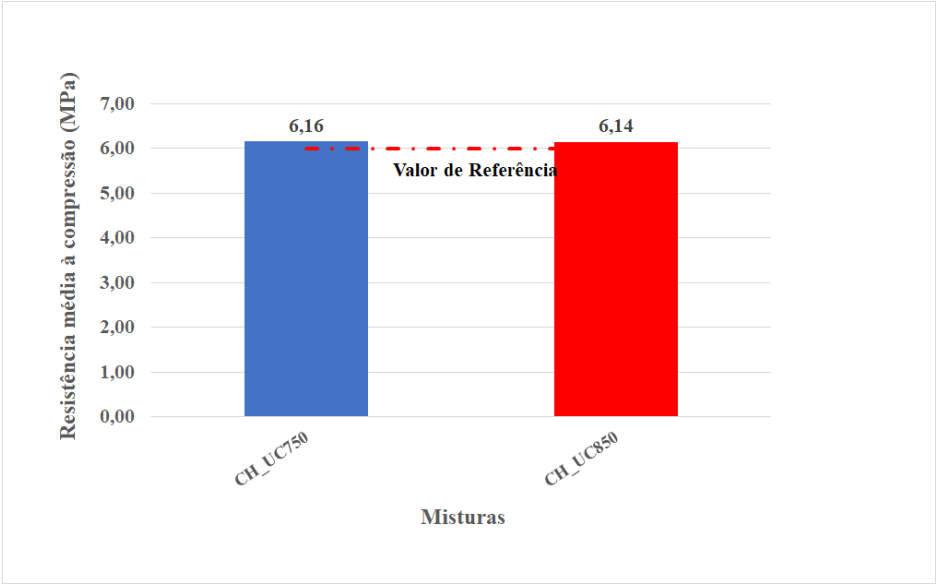


Figura 2: Resultados da atividade pozolânica com cal aos 7 dias

Observa-se que diferentemente das misturas compostas com cimento e rejeito ultrafino calcinado à 750°C e 850°C (sem o processo de moagem), que não atenderam à resistência mínima (≥ 90%, em relação ao de controle) exigida por norma, os resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência à compressão axial das misturas compostas com cal e rejeito ultrafino calcinado às mesmas temperaturas, mostram que essas alcançaram a resistência mínima de 6,0 MPa, exigida pela norma NBR 12653/2014. Por fim, os resultados dos

ensaios laboratoriais indicaram que a temperatura ótima de calcinação do RU é de 850 °C, por ter atendido os critérios de pozolanicidade tanto no ensaio realizado com cimento, bem como no método empregando a cal. Verificou-se que as misturas contendo o material calcinado a essa temperatura apresentaram desempenho satisfatório, comprovando seu potencial para uso como material cimentício suplementar e como agente de estabilização química de solos para pavimentação.

A diferença de desempenho entre os testes com cimento Portland e com cal, indica uma possível diferença na velocidade em que as reações químicas ocorrem devido à atividade pozolânica entre os dois métodos avaliados. Em outras palavras, os materiais estão reagindo de maneira diferente em termos de velocidade e intensidade quando adicionados ao cimento Portland em comparação com quando adicionados à cal hidratada, indicando variações na cinética de reação entre o RU calcinado e os aglomerantes empregados. Além disso, tal diferença pode ser justificada em razão da composição química e a estrutura mineral do RU que influenciam sua reatividade, podendo ser mais reativos com hidróxido de cálcio do que com compostos do cimento Portland.

4. CONCLUSÃO

O estudo investigou a viabilidade do uso de rejeito de mineração de ferro como pozolana artificial, visando transformar um passivo ambiental em material alternativo para estabilização química de solos em pavimentação.

As análises sugerem o uso do RU calcinado a 850 °C para aplicação e avaliação no processo de estabilização de camadas de pavimento, por meio de análises de comportamento mecânico em laboratório e em uma seção experimental.

O uso de coprodutos calcinados da mineração é uma alternativa promissora para reduzir impactos ambientais e atender à demanda por materiais cimentícios, destacando-se a pavimentação como aplicação em larga escala.

Agradecimentos
À mineradora Vale S.A. pelo apoio a realização da pesquisa e a UNIFEI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP (2002) Guia básico de utilização do cimento Portland (7ª. ed.). São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland.

Arab P. B.; T. P. Araújo e O. J. Pejon (2015). Identification of clay minerals in mixtures subjected to differential thermal and thermogravimetry analyses and methylene blue adsorption tests, Applied Clay Science, Volume 114, 2015, Pages 133-140, ISSN 0169-1317, https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.020.

Coey, J. M. D. (2010) Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge: Cambridge University Press.

Monteiro, F. M.; F. C. Costa; R. B. Assis e T. G. Machado (2017). Caracterização de argila caulínitica da região metropolitana de natal-RN–parte 1. In: Anais do 72° Congresso Anual da ABM.

Pinto, C. H. C. (1994) *Vermiculita hidrofobizada como agente adsorvente de óleo em águas*. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Natal.

Carlos Augusto de Souza Oliveira[1] (carlosoliveira@unifei.edu.br)
Viviane Reis Silva[2] (vivianereis@unifei.edu.br)
Marconi Oliveira Almeida[3] (marconi.almeida@unifei.edu.br)
Sérgio Pacífico Soncim[4] (sergiops@unifei.edu.br)
Roger Júnio Campos[5] (rogercampos@unifei.edu.br)
IEI[1 a 4] – Instituto de Engenharias Integradas e ICT[5] – Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira – MG – CEP: 35903-087, Brasil.
Kellen Poliana Mendes de Medeiros[1] (kellen.medeiros@vale.com)
Pedro Marcelo Pinto Cunha[2] (pmarcelo.cunha@vale.com)
Vale S.A[1 a 2] - Mina de Brucutu, Rod. MG-129, São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais, km 29.
Lais Resende Pereira[1] (lais.resende@vale.com)
Vale S.A[1] - - Escritório Mina de Águas Claras, Av. de Ligação, 3580, Nova Lima, Minas Gerais.

EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Thiago Persike, Breno Salgado Barra, Estéfani Clara, Rafael Cristyan Fronza, Jessé Valente de Liz
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com a incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD). As incorporações adotadas de RCD foram 7 %, 15 % e 30 % das frações passantes nas peneiras 2,2 a 0,075 mm. A campanha experimental é composta pelos ensaios de habilidade de compactação (PCG), resistência à ação deletéria água e deformação permanente a 60 ºC. Com base nos resultados obtidos, a utilização do RCD se demonstrou pouco promissor, pois indicou a geração de produtos finais mais onerosos, com menor trabalhabilidade nos procedimentos de compactação, além de menos resistentes à ação deletéria da água e aos esforços mecânicos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria da construção civil é considerada uma atividade essencial para a economia, pois promove a geração de empregos e riquezas. No entanto, pode ser considerada também uma grande causadora de impactos ambientais, desde a modificação da paisagem natural até a produção de um significativo volume de resíduos, os chamados resíduos de construção e demolição (RCD) (Domiciano, 2019). De acordo com o panorama dos resíduos sólidos no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), apenas em 2021 foram coletadas mais de 48 milhões de toneladas de RCD no âmbito municipal.

Apesar do forte apelo ecológico que tem se observado no mundo acerca do reaproveitamento de recursos naturais, verifica-se no país a falta de incentivo público intenso às políticas de desenvolvimento sustentável, além de ainda haver reticências em muitos casos a respeito da utilização de materiais reciclados em obras de engenharia civil, incluindo a concepção de misturas asfálticas e a construção de estruturas de pavimento (Nascimento *et al*., 2020).

Tendo em vista a enorme demanda de infraestrutura de pavimentação, tanto em novas construções quanto em serviços de reabilitação, as principais preocupações da indústria de pavimentação são a conservação dos recursos naturais e a utilização de materiais residuais para obter economia e proteger o meio ambiente (Purohit *et al*., 2022).

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a avaliação de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com foco na verificação da viabilidade técnica do uso de RCD, em substituição parcial às frações granulares oriundas de maciço rochoso gnáissico, considerando aspectos relacionados à metodologia francesa de formulação, com enfoque principal na resistência à deformação permanente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

As frações granulares desta pesquisa encontram-se dentro dos limites impostos pelas normativas: Desgaste por abrasão Los Angeles (DNIT-ME 451/2024); Índice de forma (ABNT NBR 7809/2019); Resistência ao ataque químico (Durabilidade) (DNIT-ME 446/2024 e DNER-ME 037/1997); Equivalência de areia (DNIT-ME 450/2024); Teor de material pulverulento (DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997) e Absorção, dessa maneira, são passíveis de utilização em mistura asfálticas, exceto o parâmetro de adesividade ao ligante betuminoso (DNIT-ME 452/2024).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) foram beneficiados por meio de uma usina fixa, localizada no Distrito de Pirabeiraba, município de Joinville/SC. As análises indicaram que o RCD possui microtextura rugosa e macrotextura subangular, o que lhe confere bom intertravamento e uma ancoragem ao ligante betuminoso, ainda o RCD possui superfície específica e volume de poros quase três vezes maiores ao do pó de pedra, o que pode ser considerado um aspecto negativo, demandando um maior consumo de ligante betuminoso nas formulações de misturas asfálticas.
Persike (2023) realizou a caracterização dos resíduos por meio de ensaios de Espectrometria de Fluorescência

de Raios-X através de Energia Dispersiva (FRX), Difratometria de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise de superfície específica do RCD.

O ligante asfáltico utilizado foi o de penetração em 30/45, fornecido por refinaria localizada em Paulínia/SP. As temperaturas de serviço foram definidas com base na viscosidade Saybolt-Furol, logo a temperatura de 155 °C foi definida para usinagem, 145 °C para a compactação e 168 °C para aquecimentos dos granulares.

2.2. Métodos

As curvas granulométricas das misturas asfálticas (Figura 1) foram desenvolvidas com base nas equações de Füller-Talbot, considerando os respectivos pontos de controle indicados em Manuel LPC (2007). Foi definido o diâmetro máximo (D) em 12,7 mm e o %p200 em 7,0 %, resultando em um expoente 'n' de 0,52, constituindo uma curva de graduação densa. As incorporações adotadas de RCD foram 7 %, 15 % e 30 % das frações passantes nas peneiras 2,2 a 0,075 mm.

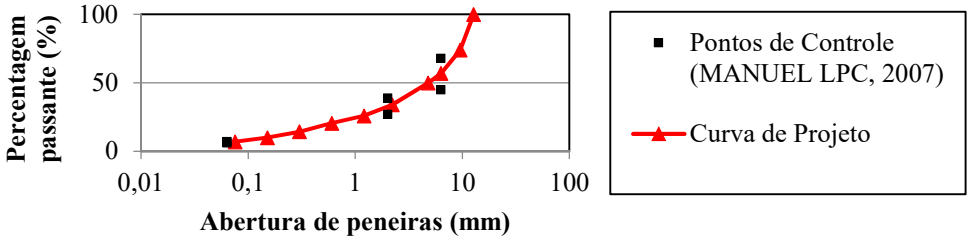


Figura 1: Curva granulométrica do tipo BBSG

3. ENSAIOS LABORATORIAIS

A campanha experimental foi iniciada com a avaliação da habilidade de compactação das misturas asfálticas a partir do uso da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF P 98-252, 1999). O ensaio de Duriez a 18 °C se fez necessário para avaliar a ação deletéria da água nas misturas asfálticas (AFNOR NF P 12697-12, 2018). Por fim, foi avaliado a resistência à formação de trilha de rodas pelo ensaio de deformação permanente (AFNOR NF P 12697-22, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Habilidade de Compactação na PCG

Os resultados obtidos nos ensaios de habilidade de compactação indicam o cenário geral da evolução do volume de vazios (%V) no transcurso dos giros executados pela PCG, com aplicação de esforços de compressão axiais e cisalhantes. Os limites normativos admissíveis quanto ao volume de vazios após 80 giros para misturas do tipo BBSG são 4,0 % a 9,0 %, estão representados por uma seta vermelha em cada situação. Assim, a formulação que ultrapassar os limites da referida seta é considerada reprovada, não estando apta a seguir para o nível 2. No gráfico, diferentes representações distinguem as misturas asfálticas, indicando seus respectivos teores de ligantes.

Observa-se (Figura 2), em todos os cenários comparativos com a mistura asfáltica de referência, que as incorporações de RCD necessitaram de maiores aportes de ligante betuminoso nas dosagens, implicando em menores volumes de vazios para os mesmos 80 giros estabelecidos normativamente.

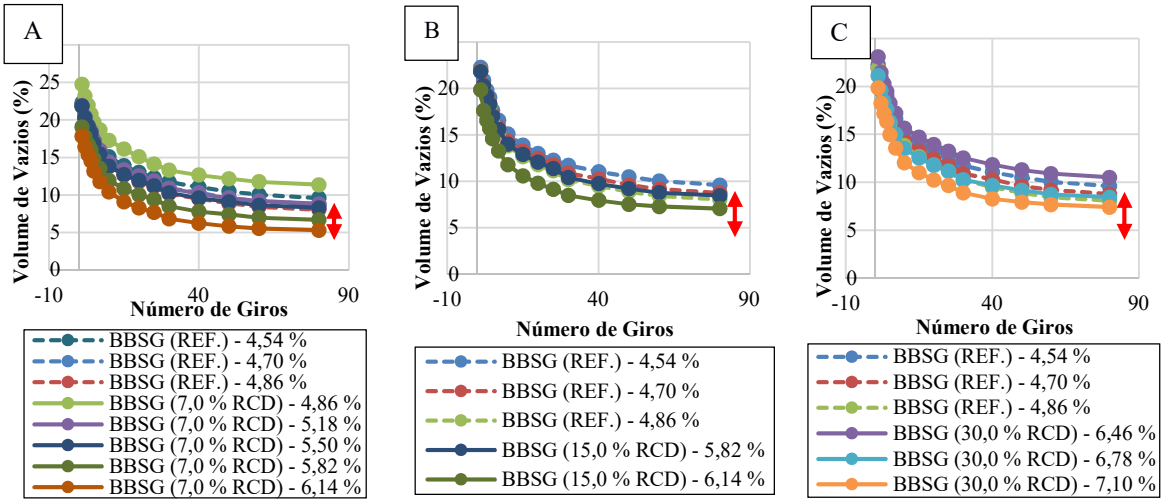


Figura 2: Habilidade de compactação: Referência e (A) 7,0 % RCD; (B) 15,0 % RCD; (C) 30,0 % RCD

Esta tendência está relacionada às características das partículas de RCD quando comparadas ao pó de pedra, uma vez que o RCD apresenta superfície específica como porosidade quase três vezes maior que o pó de pedra. Consequentemente, há menor área ocupada por de unidade de peso a ser preenchida, dificultando o envolvimento pelo ligante betuminoso, devido ao maior potencial de absorção tanto intergranular quanto intragranular, demandando teores de ligante superiores para atingir o mesmo nível de trabalhabilidade observado nas misturas de referência (Figura 2ABC).

Alia-se aos aspectos negativos discorridos, o fato do RCD ser um material com partículas menos duras que as de pó de pedra, conforme mencionado por Persike (2023), tornando-as mais compressíveis e menos resistentes aos esforços mecânicos aplicados no ensaio da PCG.

4.2. Resistência à ação deletéria da água

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 ºC, procedeu-se os testes apenas com as formulações aprovadas no ensaio da PCG. A Figura 3 ilustra os resultados obtidos, em que os erros de repetitividade e os desvios padrões máximos obtidos foram da ordem de 5,0 % e 1,0 %, respectivamente, indicando boa homogeneidade da amostragem produzida, bem abaixo dos 10,0 % preconizados pelo Manuel LPC (2007).

O RCD em sua composição conforme demonstrado por Persike (2023), possui a presença de SiO_2 na ordem de 9,0 % maior que a presença no pó de pedra. Logo, as misturas asfálticas que possuem a incorporação deste material apresentam maior potencial de repelência elétrica às partículas granulares gnáissicas e ao ligante betuminoso, o que aumenta a hidrofilia, dificultando ainda mais a adesão entre os compostos e prejudicando a adesividade entre eles. A mesma tendência ocorre entre as formulações com distintos teores de RCD incorporado, com maior prejuízo àquelas que portam maiores percentuais em suas composições.

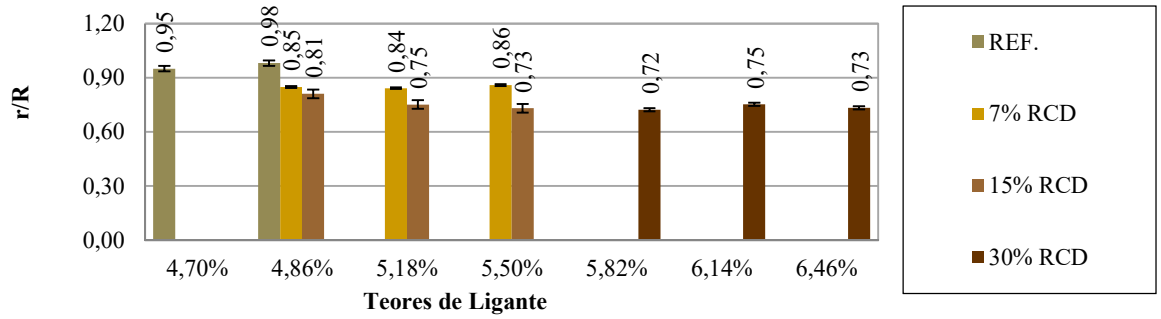


Figura 3: Relação r/R obtidas no ensaio de Duriez

Ainda assim, todas as formulações apresentaram relação r/R ≥ 0,70 que indicam que todas as formulações propostas possuem uma resistência à ação deletéria da água adequada, resistência obtida pela relação entre os

corpos de prova condicionados na água (r) e a seco (R).

4.3. Deformação Permanente

Formulações aprovadas previamente foram avaliadas quanto a resistência à formação de trilha de rodas. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.

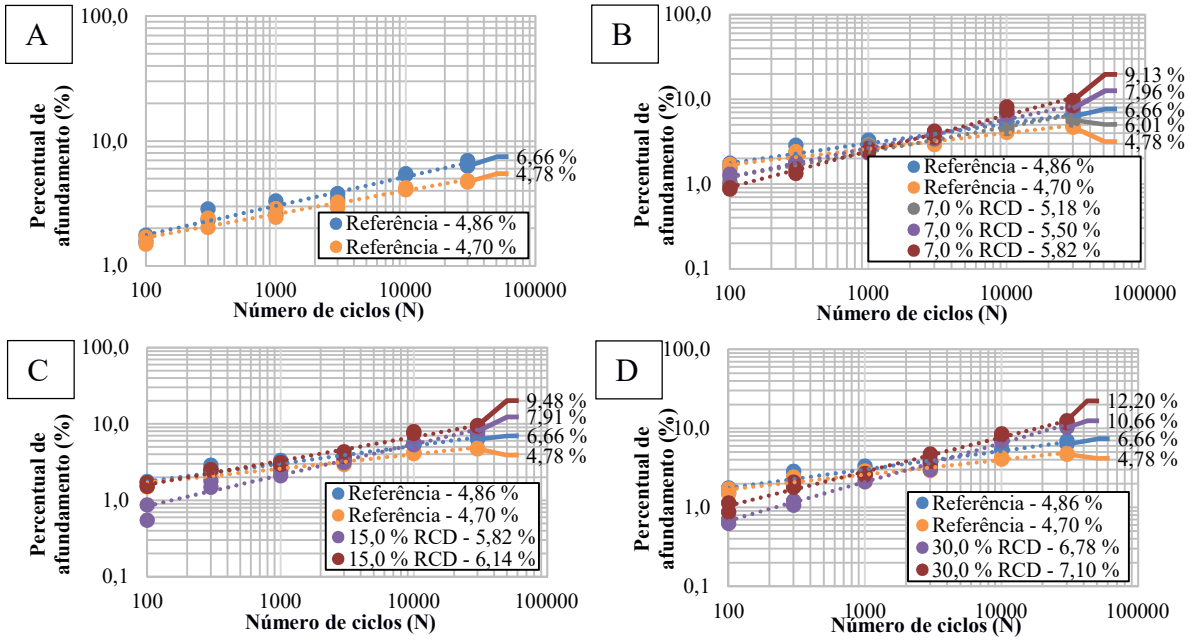


Figura 4: Evolução do afundamento na trilha de rodas: (A) referência; (B) referência e com 7,0 % de RCD; (C) referência e com 15,0 % de RCD; (D) referência e com 30,0 % de RCD

Nota-se que o percentual de afundamento na trilha de roda para as misturas com RCD são inicialmente menores quando comparados às misturas de referência, cenário que se inverte à medida que o número de ciclos aumenta, em razão de que nos primeiros ciclos de carregamento parte do ligante betuminoso encontra-se encapsulado na porosidade das partículas de RCD, a qual possui valor quase três vezes maior que as frações britadas de rocha gnáissica.

Com o aumento progressivo da aplicação dos ciclos de carregamento, aliado à submissão das misturas asfálticas a um período de maior exposição contínua ao calor (60 ºC), o ligante betuminoso inicialmente encapsulado na porosidade das partículas de RCD flui e migra em maior volume para a superfície das partículas, aumentando a sua presença nos interstícios do material, maximizando a ocorrência do fenômeno da fluência devido ao aumento da suscetibilidade térmica do ligante betuminoso e, consequentemente, gerando maiores afundamentos nas trilhas de roda.

Tomando em conta as três possíveis classificações para misturas asfálticas do tipo BBSG, tem-se que apenas a mistura de referência com teor de ligante em 4,70 % enquadra-se na Classe 3, a classe mais nobre, com afundamento na trilha de roda inferior a 5,0 %. As misturas asfálticas de referência com teor de 4,86 % e, com 7,0 % de RCD e teor de ligante em 5,18 %, enquadraram-se na Classe 2, com valores de afundamento na trilha de roda entre 5,0 % e 7,50 %. As formulações com 7,0 % e 15,0 % de RCD, com teores de ligante em 5,50 %, 5,82 %, 5,80 % e 6,14 %, respectivamente, apresentaram percentuais de afundamento na trilha de roda entre 7,50 % e 10,0 %, enquadrando-se na Classe 1. Para as misturas com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 6,78 % e 7,10 %, foram verificados percentuais acima do limite máximo de 10,0 % para que pudessem ser enquadradas na Classe 1, tornando-as inaptas para aplicação em estruturas de pavimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos da campanha experimental realizada pode-se concluir que as formulações com a incorporação do RCD necessitam de maior aporte de ligante betuminoso nas dosagens, o que

consequentemente confere maior efeito lubrificador no contato intergranular, diminuindo a resistência aos esforços de compressão axial e de cisalhamento aplicados nos testes de habilidade de compactação, culminando com uma forte redução do teor de vazios, e maiores afundamentos na trilha de roda. Corrobora também para a potencialização do efeito de repelência elétrica ao conjunto granular-ligante, minorando a adesividade entre os compostos e favorecendo o efeito deletério da água. Dado o exposto, conclui-se que a utilização do RCD na concepção de misturas asfálticas densas do tipo BBSG, apresentou-se pouco promissor pois indicou a geração de produtos finais mais onerosos, com menor trabalhabilidade nos procedimentos de compactação, além de menos resistentes à ação deletéria da água e aos esforços mecânicos aplicados pelo tráfego quanto ao afundamento nas trilhas de roda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE (2022), Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

Domiciano, L. M. (2019), Influência da Granulometria do Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (Rcd-R) no Dano Mecânico de Geossintéticos Empregados em Estruturas de Solo Reforçado. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás – UFG.

Manuel LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 199 p. Paris, France.

Nascimento, L. H. F. DO; KUHN, V. DE O.; MORAES, S.; CORREIA, N. (2020), Análise de Quebra de Grãos de Misturas de Solo com Resíduos de Construção Civil para Camadas de Pavimento. Revista Tecnológica, 29(2), 526-540.

Persike, T. (2023), Avaliação da Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas com Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição. Joinville: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Purohit, S.; Panda, M.; Das, A. K. (2022), Performance of waste polyethylene modified bituminous paving mixes containing reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials, Volume 348, 2022, 128677, ISSN 0950-0618.

*Thiago Persike (*thiagopersike.eng@gmail.com*)*
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dona Francisca, 8300 - Zona Industrial Norte - Joinville/SC – Brasil.
Breno Salgado Barra (breno.barra@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Estéfani Clara (estefani.clara@hotmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Rafael Cristyan Fronza (rafael.c.fronza@gmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dona Francisca, 8300 - Zona Industrial Norte - Joinville/SC – Brasil.
Jessé Valente de Liz (jesse.v@posgrad.ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.

ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE COPRODUTO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO SOLUÇÕES POLIMÉRICAS

Lídia Bruna Teles Gonzaga, Jose Wilson Dos Santos Ferreira, André Luís Brasil Cavalcante, Michéle Dal Toé Casagrande
Universidade de Brasília

RESUMO
A mineração de ferro no Brasil gera grandes volumes de rejeitos, cuja gestão constitui desafio ambiental e geotécnico. Este estudo investigou o uso de polímeros comerciais na estabilização química de rejeitos de minério de ferro, visando aplicação em vias não pavimentadas. Foram realizados ensaios de compactação, seguidos de cura ao ar por 14 dias, e ensaios de resistência à compressão simples com diferentes teores de polímeros, com e sem imersão em água, a fim de definir o teor ótimo para futuras análises de módulo de resiliência e deformação permanente. Os compósitos estabilizados apresentaram maior resistência e ductilidade em todos os teores, destacando-se o de 60% com cerca de 6 MPa para o AggreBind, sempre superiores ao coproduto puro. As análises de MEV evidenciaram melhor ligação entre as partículas. Conclui-se que a estabilização polimérica é alternativa promissora, embora exija ensaios complementares em pavimentação para validar a aplicabilidade em campo.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a gestão desses rejeitos tornou-se um dos principais desafios da mineração, especialmente após os rompimentos das barragens de Fundão (2015) e Brumadinho (2019), que causaram severos impactos socioambientais (Kobayashi *et al.,* 2023). Como resposta, o Brasil proibiu o alteamento a montante por meio da Lei nº 14.066/2020 e, pela Resolução nº 95/2022, a Agência Nacional de Mineração (ANM) passou a exigir o descomissionamento dessas estruturas, com foco na adoção de medidas de estabilização e contenção mais seguras.

Nesse cenário, a técnica de empilhamento a seco (*dry stacking*) de rejeitos filtrados e compactados tem ganhado destaque por não formar reservatórios de lama, reduzindo significativamente os riscos de rompimento. Quando associada à estabilização química, ainda pouco difundida, essa técnica permite a formação de pilhas mais íngremes e estáveis, com menor área de ocupação e impactos ambientais reduzidos (Consoli *et al.*, 2022; Sotomayor *et al.*, 2024).

Pesquisas recentes têm aprofundado o estudo do comportamento mecânico de rejeitos estabilizados quimicamente, buscando maior coesão e mitigação do risco de liquefação (Barati *et al.*, 2020; Jiang *et al*., 2024). Além de favorecer a estabilidade física, essas soluções contribuem para a redução da emissão de poeira e da dispersão de elementos potencialmente tóxicos.

Uma aplicação especialmente promissora e ainda pouco explorada é o uso desses rejeitos estabilizados como material de base para vias não pavimentadas em áreas internas das minas**,** substituindo materiais naturais e reduzindo a necessidade de novos empreendimentos extrativos. Essa prática viabiliza o reaproveitamento local dos rejeitos, como em estradas de acesso, aterros e preenchimento de vazios, contribuindo para a economia circular no setor mineral (Golev *et al.*, 2022).

Embora estabilizantes inorgânicos como cimento e cal sejam amplamente utilizados, suas limitações ambientais têm estimulado o uso de estabilizantes poliméricos orgânicos, que promovem ganhos de resistência com menor impacto ambiental (Zhao *et al.*, 2022; Consoli *et al*., 2024; Boaventura *et al*., 2023).

Neste contexto, esta pesquisa investiga o uso de soluções poliméricas comerciais na estabilização química de rejeitos de minério de ferro como alternativa aos aditivos inorgânicos convencionais. Foram testados dois polímeros usados na aplicação em solos. Os resultados obtidos permitem definir teores adequados de polímero a serem utilizados em etapas futuras de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, os quais possibilitarão aprofundar o entendimento da estabilização polimérica como uma solução viável e ambientalmente responsável, com potencial aplicação em infraestruturas de transporte não pavimentadas em áreas mineradas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a estabilização química de coproduto de rejeitos de minério de ferro por meio da aplicação de soluções poliméricas. Foram testados dois copolímeros acrílicos em emulsão aquosa: Terrafix (*Waterflows)* e o polímero 410 (*AggreBind*). Inicialmente, foram realizados ensaios de compactação com energia intermediária para a determinação da massa específica seca máxima e da umidade ótima. Em seguida, foram conduzidos ensaios de resistência à compressão simples com diferentes teores de polímeros,

visando identificar a concentração ótima que proporcione o maior ganho de resistência mecânica ao compósito rejeito-polímero. A Figura 1 apresenta os materiais utilizados nesta pesquisa, resultando no corpo de prova estabilizado após o período de cura.

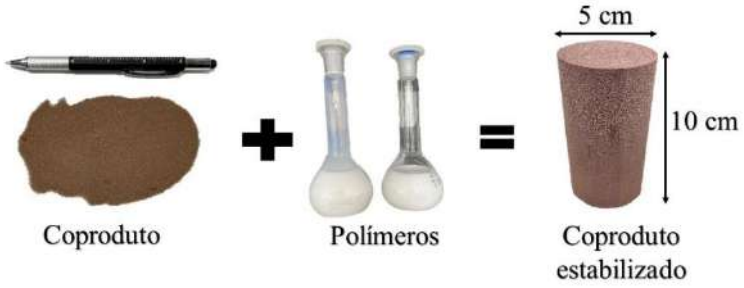


Figura 1: Materiais do compósito Rejeito-Polímero e corpo de prova estabilizado

Após 28 dias de cura, as amostras estabilizadas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) modelo JEOL JCM-5000 Neoscope (Instituto de Geociências/UnB), fixadas com fita de carbono e recobertas com fina camada de ouro.

2.1. Compactação e Moldagem

O ensaio de compactação foi realizado conforme a ABNT NBR 7182 (ABNT, 2025), utilizando energia intermediária, cilindro Proctor pequeno e sem reuso das amostras. A partir da curva de compactação, foram determinados o teor de umidade ótima e a massa específica seca máxima, com base nos quais se definiu uma umidade de compactação fixa para todas as misturas.

Os corpos de prova foram moldados com diferentes teores de solução polimérica, utilizando como referência a massa específica seca máxima do rejeito puro (1,75 g/cm³). As umidades de moldagem foram fixadas em 13% para o rejeito puro e 8% para os compósitos, sendo esta última definida a partir de uma redução de 5% em relação à umidade ótima, conforme resultados preliminares. As dosagens de polímero testadas foram de 30%, 40%, 50% e 60%, em substituição parcial à água de moldagem.

Os corpos de prova (CPs) foram moldados em dispositivo mini-MCV, com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura (relação h/d = 2), e compactados com energia intermediária. A cura foi realizada ao ar por 14 dias, em ambiente laboratorial com temperatura controlada. A adoção desse tipo de cura deve-se à natureza dos estabilizantes poliméricos utilizados, que requerem a evaporação da água para promover a formação de ligações entre as partículas e o endurecimento da matriz.

2.2. Resistência à Compressão Não Confinada

Após o período de cura, os corpos de prova (CP's) foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, conforme a ABNT NBR 12770 (ABNT, 2022), com o objetivo de identificar a concentração ideal de polímero que proporcione o maior ganho de resistência mecânica ao compósito rejeito-polímero. Adicionalmente, foi adotado o procedimento descrito na ABNT NBR 12025 (ABNT, 2012) para avaliar o desempenho dos compósitos em condição de exposição a água. Nesse caso, após a cura ao ar, os CP's foram imersos em água por 4 horas e, em seguida, submetidos ao mesmo ensaio de compressão simples. Todos os ensaios foram realizados com velocidade de deformação axial constante de 1 mm/min, sendo adotado como critério de ruptura o ponto de máxima tensão axial ou, na sua ausência, a deformação axial de 10%, conforme estabelece a norma.

3. RESULTADOS

A massa específica das partículas do coproduto de rejeito de minério de ferro foi de 2,70 g/cm³. Esse material, denominado areia-minério, é uma areia processada resultante das etapas de trituração e beneficiamento do minério (Golev *et al.*, 2022). Por esse motivo, apresenta massa específica semelhante à de areias naturais, com características predominantemente granulares e não coesas. A distribuição granulométrica (Figura 2a) classifica o material como areia, com partículas não coesas e não plásticas, de acordo com a ABNT NBR 6502 (ABNT, 2022). Como se trata de um material proveniente de britagem, e não de processos de intemperismo geológico, é considerado um sedimento de origem rochosa, com comportamento intermediário entre solos e rochas. A composição mineralógica do material, obtida por difratometria de raio X (DRX), é apresentada na

Figura 2b, corroborando para a compreensão de seu comportamento.

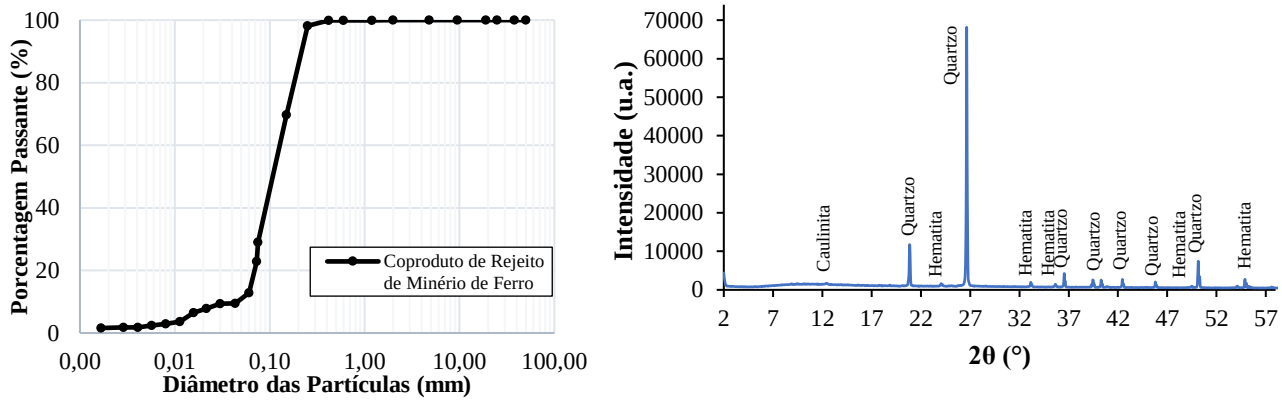


Figura 2: Coproduto de Rejeito de Ferro: **a)** Distribuição granulométrica do **b)** Difratograma de Raio-X

A Figura 3 apresenta a curva de compactação obtida para o coproduto de rejeito de minério de ferro puro, compactado sob energia intermediária. Os resultados indicam que o material apresentou uma massa específica seca máxima ($\rho d_{máx.}$) de 1,747 g/cm³ e uma umidade ótima (ω_{ot}) de 13%, adotada como referência para a avaliação dos compósitos rejeito-polímero. Com a adição das soluções poliméricas, observou-se uma redução significativa na umidade de moldagem, com diminuição aproximada de 5% no teor de umidade ótimo, conforme também relatado por Alelvan *et al.* (2022). Resultados semelhantes foram observados por Boaventura *et al.* (2023) em compósitos formados por rejeitos de minério de ferro.

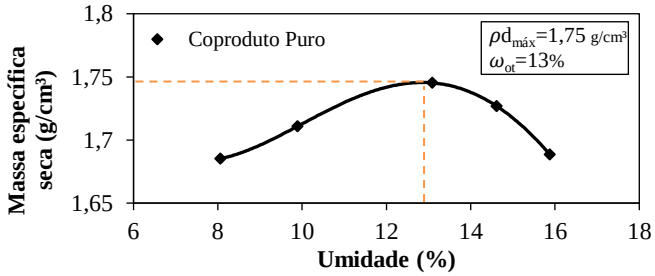


Figura 3: Curva de compactação do Coproduto de Rejeito de Ferro puro.

Observa-se na Figura 4a que o coproduto puro apresenta baixa resistência à compressão, com tensão máxima inferior a 100 kPa e comportamento tipicamente frágil, o que reforça a necessidade de estabilização química para aplicações geotécnicas.

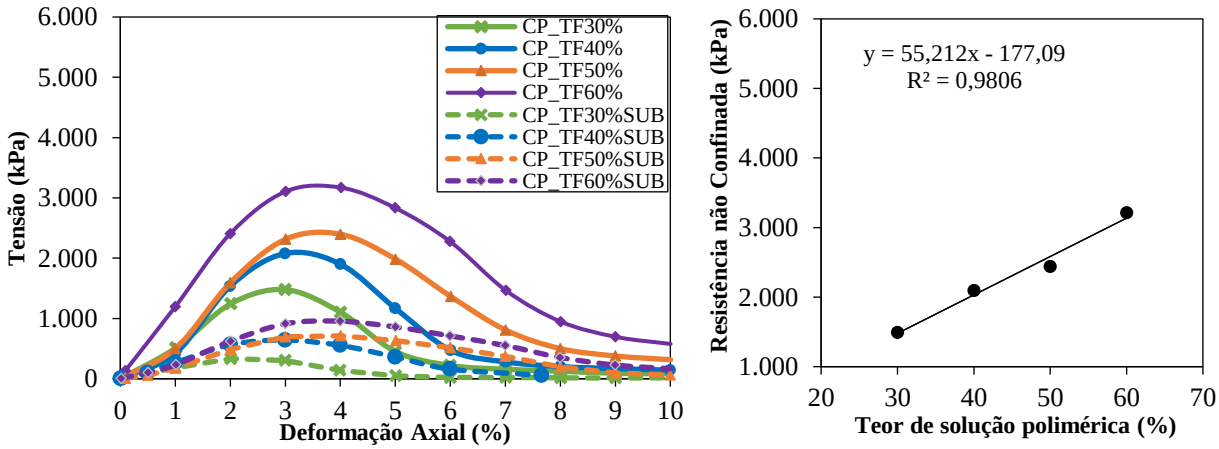


Figura 4: a) Resistência a compressão simples dos CP's estabilizados com Terrafix no estado natural e pós-imersão em água; **b)** Teor de solução polimérica *vs* tensão, compósitos Coproduto-Polímero *Terrafix.*

A adição da solução polimérica *Terrafix* resultou em aumento significativo da resistência à compressão, com valores máximos de tensão (q_u) crescentes conforme o teor de polímero (Figura 5b). A concentração de 60%

apresentou o melhor desempenho, ultrapassando 3.000 kPa, seguida pelas concentrações de 50%, 40% e 30%. Esse comportamento indica que maiores teores de polímero melhoram estrutura interna do compósito rejeito-polímero, favorecendo a formação de ligações entre partículas. Além disso, os compósitos estabilizados apresentaram comportamento mais dúctil, com deformações axiais superiores a 5%. Os CPs submersos apresentaram uma redução significativa da resistência. Os teores mais elevados de polímero tiveram melhor desempenho sob exposição à água.

A Figura 6 mostra as curvas tensão-deformação dos corpos de prova com diferentes teores de *AggreBind* (30% a 60%), incluindo os CPs submetidos a imersão (linhas tracejadas) e o coproduto puro como referência (linha vermelha).

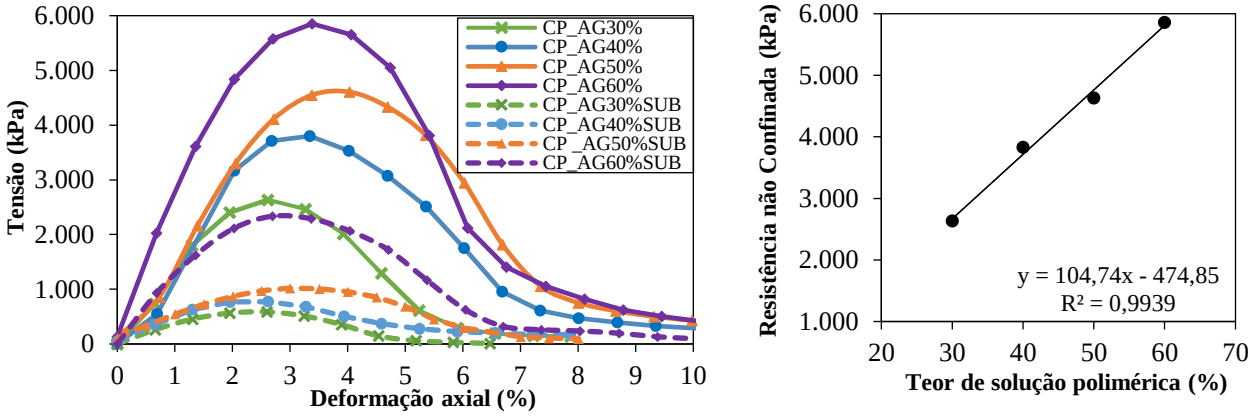


Figura 5: a) Resistência a compressão simples dos CP's estabilizados com AggreBind no estado natural e pós-imersão em água; **b)** Teor de solução polimérica *vs* tensão e, compósitos Coproduto-Polímero AggreBind.

A adição de *AggreBind* elevou significativamente a resistência à compressão dos compósitos, com destaque para o teor de 60%, que atingiu mais de 6.000 kPa. Observou-se uma relação direta entre o aumento do teor de polímero e a resistência do compósito, além de comportamento mais dúctil, com deformações axiais superiores a 5%. Após submersão por 4 horas, a resistência reduziu em todos os teores, mas a concentração de 60% manteve o melhor desempenho, superando 2.500 kPa, indicando maior eficácia em condições de umidade elevada.

Diante desses resultados, os teores de 50% e 60% foram selecionados para as etapas seguintes da pesquisa, que incluem ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. A avaliação do desempenho em condição imersa é fundamental para garantir que os compósitos atendam às exigências de durabilidade e segurança em obras rodoviárias em regiões tropicais, especialmente devido à variabilidade climática no Brasil.

As análises microestruturais, obtidas por meio de imagens de MEV (Figura 6), evidenciam que o coproduto puro apresenta partículas soltas e com reduzida ligação entre si. Nas amostras estabilizadas com polímeros, observa-se maior interação entre as partículas, resultando em uma estrutura mais coesa e compacta, ainda que com a presença de vazios. Essa ligação adicional pode justificar o ganho de resistência dos corpos de prova nos ensaios de compressão simples.

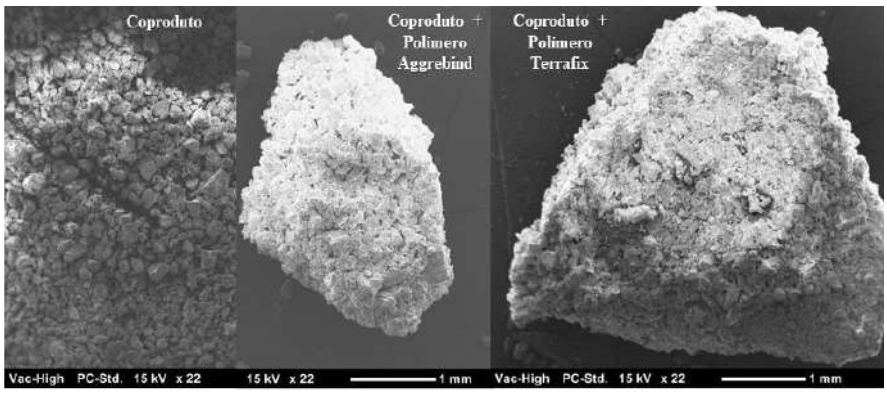


Figura 6: Imagens de MEV do coproduto puro e dos compósitos estabilizados com polímeros.

4.CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam o potencial técnico do uso de soluções poliméricas comerciais na estabilização química de rejeitos de minério de ferro. Ambos os polímeros avaliados, promoveram ganhos significativos na resistência à compressão simples e no comportamento dúctil dos compósitos, especialmente em teores mais elevados. Mesmo sob condição submersa, os materiais estabilizados mantiveram desempenho superior ao coproduto puro, o que reforça sua aplicabilidade em ambientes geotécnicos sujeitos a variações de umidade. Tais resultados indicam que a estabilização com polímeros pode representar uma alternativa promissora e ecologicamente mais adequada para o reaproveitamento de rejeitos em obras de infraestrutura, como vias não pavimentadas em áreas mineradas, contribuindo para práticas mais sustentáveis no setor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe do Instituto de Geociências da UnB pelo suporte na realização das análises microestruturais, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF), no âmbito do Projeto SEI-GDF nº 00193-00001386/2024-04, pelo financiamento e incentivo à pesquisa, e ao Instituto Federal de Rondônia pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANM – Agência Nacional de Mineração (2022) Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida atos sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União, 18 fev. 2022.

Alelvan, G.M.; N. C. Consoli; A. L. B. Cavalcante; M. D. T. Casagrande e J. M. G. Sotomayor (2022) Proposal of new construction material: Polymer-stabilized gold ore tailings composite. Sustainability, v. 14, p. 13648. DOI: https://doi.org/10.3390/su142013648.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) NBR 12025: Solo-cimento – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) NBR 12770: Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo – Método de ensaio. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) NBR 7181: Solo – Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro.

Barati, S.; M. A. Ghanbari; M. D. Hamidi e M. T. Darban (2020) Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: a case study on Golgohar mine. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 79, p. 4151–4166. DOI: https://doi.org/10.1007/s10064-020-01843-6.

Boaventura, N.F.; T.F. de P. Sousa e M.D.T. Casagrande (2023) The application of an eco-friendly synthetic polymer as a sandy soil stabilizer. Polymers, v. 15, p. 4626. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15244626.

Brasil (2020) Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e outras disposições. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 01 out. 2020.

Consoli, N.C.; G. M. Alelvan; J. M. G. Sotomayor; M. D. T. Casagrande e A. L. B. Cavalcante (2024) Determination of critical state line (CSL) for silty-sandy iron ore tailings subjected to low-high confining pressures. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.014.

Golev, A.; G. M. Bogunovic; M. Mansour e K. Petrisor (2022) Ore-sand: A potential new solution to the mine tailings and global sand sustainability crises – Final Report. Version 1.5. The University of Queensland & University of Geneva. DOI: https://doi.org/10.14264/503a3fd.

Jiang, X.; Y. Yu; Y. Zhang; Z. Liang e J. Du (2024) Stabilization of iron ore tailing with low-carbon lime/carbide slag-activated ground granulated blast-furnace slag and coal fly ash. Construction and Building Materials, v. 413, p. 134946. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134946.

Kobayashi, H.; J. Castro; M. V. Alves; M. A. A. Barros e A. L. B. Cavalcante (2023) Exploring a new approach for assessing the fate and behavior of the tailings released by the Brumadinho dam collapse (Minas Gerais, Brazil). Journal of Hazardous Materials, v. 448, p. 130828. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130828.

Sotomayor, J.M.G.; G. M. Alelvan; N. C. Consoli e A. L. B. Cavalcante (2024) Geomechanical performance of gold ore tailings-synthetic fiber composites. Geotechnical and Geological Engineering. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-024-02814-4.

Zhao, S.; J. Wang; Y. Tang e C. Zhang (2022) Curing effects of fly ash-based geopolymer on soils around mining areas: properties and mechanisms. Environmental Earth Sciences, v. 81, p. 455. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-022-10549-9.

Lídia Bruna Teles Gonzaga (lidia.bruna@ifro.edu.br)
Jose Wilson Dos Santos Ferreira (jose.wilson@unb.br)
André Luis Brasil Cavalcante (albrasilc@gmail.com)
Michéle Dal Toé Casagrande (mdtcasagrande@unb.br)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, Brasil.

IMPACTO DA INCORPORAÇÃO DE DIFERENTES TEORES DE FIBRA DE SISAL EM FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Beatriz Paula Fieldkircher, Breno Salgado Barra, Estéfani Clara, Rafael Cristyan Fronza, Jessé Valente de Liz
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
O objetivo deste trabalho é formular misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG) com a incorporação de fibra vegetal de sisal. Os parâmetros de dosagem das misturas asfálticas foram determinados utilizando a metodologia Marshall. As incorporações adotadas foram de 0,3 % e 0,5 % dispostas em fios com comprimento de 15,0 mm. Avaliações complementares foram realizadas quanto à resistência à tração indireta e à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 ºC. Os resultados obtidos indicaram que a adição das fibras acarreta aumento do teor de ligante betuminoso nas dosagens, devido à retenção nas tramas de concentração fibrilar e, resultando, consequentemente, em redução da resistência mecânica.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diversos fatores que influenciam na baixa qualidade dos pavimentos brasileiros e sua rápida degradação, dentre os quais destacam-se a falta de fiscalização do excesso de carga por eixo nos caminhões transportadores, técnicas de execução em campo inadequadas, ausência de auscultação periódica do pavimento, realizada antes da degradação consumada, utilização de métodos de ensaios com limitada relação campo/laboratório, composições granulométricas baseadas em processos por tentativa e com frações comerciais heterogêneas, além de metodologias de formulação de misturas asfálticas e de dimensionamento de estruturas de pavimento tecnicamente obsoletas (Barra, 2009).

Verifica-se uma crescente demanda por materiais mais resistentes e sustentáveis que possam ser incorporados às misturas asfálticas. Neste contexto, dentre as fibras utilizadas na engenharia, as de origem vegetal têm se constituído em uma alternativa às fibras sintéticas na produção de materiais compósitos, sobretudo em países de clima tropical, devido à abundância, menor custo, baixa densidade, biodegradabilidade, flexibilidade durante o processamento, menor desgaste, e pouco risco à saúde durante o manuseio (Mashaan *et al.,* 2021).

Com o intuito de promover o conceito de sustentabilidade por meio da utilização de fibras vegetais provenientes de fontes renováveis, este trabalho teve como objetivo avaliar os impactos da incorporação de fibra de sisal em formulações de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi Grenus* (BBSG), com enfoque nas propriedades físicas, parâmetros de dosagem e resistência à ação da água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

As frações pétreas utilizadas neste trabalho provêm da britagem de maciço rochoso gnáissico, a partir de jazida localizada na cidade de Joinville/SC. Os agregados pétreos encontram-se nos limites estabelecidos pelas normativas: Desgaste por abrasão Los Angeles (DNIT-ME 451/2024); Índice de forma (ABNT NBR 7809/2019); Resistência ao ataque químico (Durabilidade) (DNIT-ME 446/2024 e DNER-ME 037/1997); Equivalência de areia (DNIT-ME 450/2024); Teor de material pulverulento (DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997) e Absorção. Dessa forma, são passíveis de utilização em misturas asfálticas.

Exceto o parâmetro de adesividade ao ligante betuminoso (DNIT-ME 452/2024), que deve ser corrigido em situações práticas de obras, nesta pesquisa optou-se por focar apenas no efeito da incorporação da fibra de sisal na formulação de misturas asfálticas densas, não foram adotadas medidas de correção da adesividade dos granulares, a fim de que não se tornasse uma variável de interferência no comportamento original das fibras.

O ligante asfáltico utilizado foi fornecido por refinaria localizada em Paulínia/SP, com uma faixa de penetração em 30/45. As temperaturas de serviço de acordo com a viscosidade Saybolt-Furol foram 155 °C e 145 °C referente a usinagem e compactação respectivamente, e 168 °C para aquecimentos dos granulares (Clara, 2020).

Experimentos anteriores mostraram que a adição de pequenas quantidades da fibra à mistura é suficiente para

melhorar as propriedades mecânicas. O teor ótimo de fibra é utilizado na literatura entre 0,3 % e 0,5 %, e o tamanho usualmente de 10 mm a 15 mm (Razahi e Chopra, 2020; Singh *et al*., 2022; Li *et al.,* 2023).

As amostras foram tratadas em trabalho anterior realizado por Evaldt (2023), sendo caracterizadas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difratometria de Raios-X (DRX). O estudo também investigou a interação da fibra de sisal com o ligante asfáltico.

2.2. Métodos

A curva granulométrica das misturas asfálticas (Figura 1) foi desenvolvida com base nas equações de Füller-Talbot, sendo a mesma estudada por Evaldt (2023), que investigou o desempenho funcional do mesmo tipo de mistura asfáltica (BBSG), à luz da metodologia francesa.

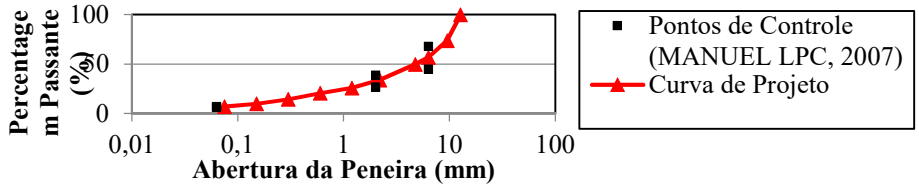


Figura 1: Curva granulométrica de projeto BBSG

A curva granulométrica é do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com diâmetro máximo de 12,7 mm e $\%p_{200}$ de 7,0 %. O expoente '*n*' foi determinado em 0,52, constituindo uma curva de graduação densa, devido encontrar-se no intervalo $0,35 < n < 0,55$.

3. ENSAIOS LABORATORIAIS

As formulações foram realizadas a partir da metodologia Marshall (DNER-ME 043, 1995). Foram testados cinco corpos de prova para cada um dos oito teores de ligante considerados: 4,22 %, 4,54 %, 4,70 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %. As fibras de sisal foram incorporadas em concentrações de 0,3 % e 0,5 % em volume de mistura asfáltica, foi adotado o tamanho da fibra em 15 mm, em consonância com pesquisas relacionadas.

As massas volumétricas reais (MVR) foram determinadas a partir do procedimento à vácuo (AFNOR NF EN 12697-5, 2019). Foram então apurados os parâmetros da metodologia Marshall, como: massa volumétrica aparente (MVA), estabilidade, fluência, teor de vazios (%V) e relação betume-vazios (%RBV). Com base nas dosagens de ligante com potencial para aplicação nas formulações, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração indireta (DNIT-ME 136, 2018). Complementarmente, avaliou-se à resistência à ação deletéria da água das misturas asfálticas, a partir do ensaio Duriez a 18 ºC, (AFNOR NF EN 12697-12, 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Massa Volumétrica Real e Ensaio Marshall

As fibras de sisal formam uma trama emaranhada (Figura 2B), gerando espaços entre as fibras aumentando o volume do corpo de prova. Como resultado, a adição interfere no contato entre as partículas granulares, aumentando os vazios e, por consequência resultando em uma diminuição do valor da massa volumétrica real (MVR) (Figura 2A).

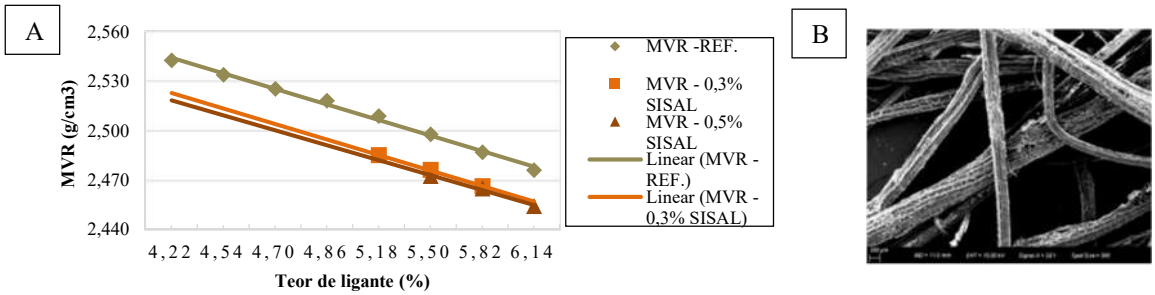


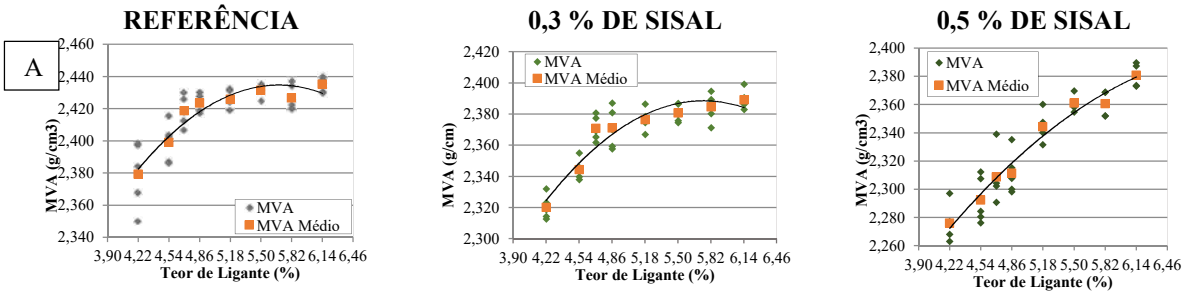
Figura 2: (A) MVR para cada formulação (B) MEV Fibra de sisal, aumento de 390 vezes

É possível observar, na Figura 3A, que a massa volumétrica aparente (MVA) diminui de forma gradual à medida que a quantidade de fibra de sisal é acrescentada à mistura. Em contraste, pode-se perceber uma tendência inversa no que diz respeito ao volume de vazios (Figura 3B), pois à medida que a proporção de fibra de sisal na mistura aumenta, as amostras apresentam um aumento progressivo no volume de vazios, quando comparadas à mistura de referência. Isso ocorre porque o efeito da trama de sisal dificultando a densificação do material.

No que diz respeito à relação betume/vazios (Figura 3C), pode-se observar que as misturas de referência apresentam valores mais elevados, em comparação com as formulações com a incorporação de sisal. Devido à mistura de referência apresentar um contato direto mais efetivo entre as partículas granulares, há menos espaços vazios a serem ocupados pelo ligante betuminoso, conduzindo mais rapidamente as amostras à saturação.

Além disso, a fibra de sisal tem a capacidade de absorver parte do ligante da formulação, logo, à medida que o percentual de fibra aumenta na dosagem, torna-se necessário adicionar mais ligante betuminoso para atingir uma relação betume/vazios semelhante à das amostras de referência, como consequência a uma contribuição para a redução da resistência mecânica do material, sobretudo aos esforços de cisalhamento. Os resultados de fluência (Figura 3D) e estabilidade (Figura 3E), indicam que a adição de fibra de sisal afeta negativamente a resistência mecânica do material.

Por fim, analisando os resultados obtidos em conjunto e os intervalos paramétricos conforme as recomendações os potenciais teores de serviço indicados pela metodologia Marshall são: Para misturas de referência teores entre 4,86 a 5,18 %, para as misturas com incorporação de 0,3 % sisal, os teores são entre 5,18 a 5,82 %; e, incorporação de 0,5 % os teores são entre 5,50 a 6,14 %. Entretanto, verifica-se que a partir do ensaio Marshall não é possível obter resultados que permitam uma escolha definitiva e direta de apenas um teor de ligante betuminoso de serviço para cada formulação, apenas uma faixa de valores potenciais de trabalho. Diante do exposto, os ensaios de tração indireta e Duriez a 18 °C foram realizados a fim de fornecer subsídios complementares à escolha do teor de serviço definitivo em cada caso.



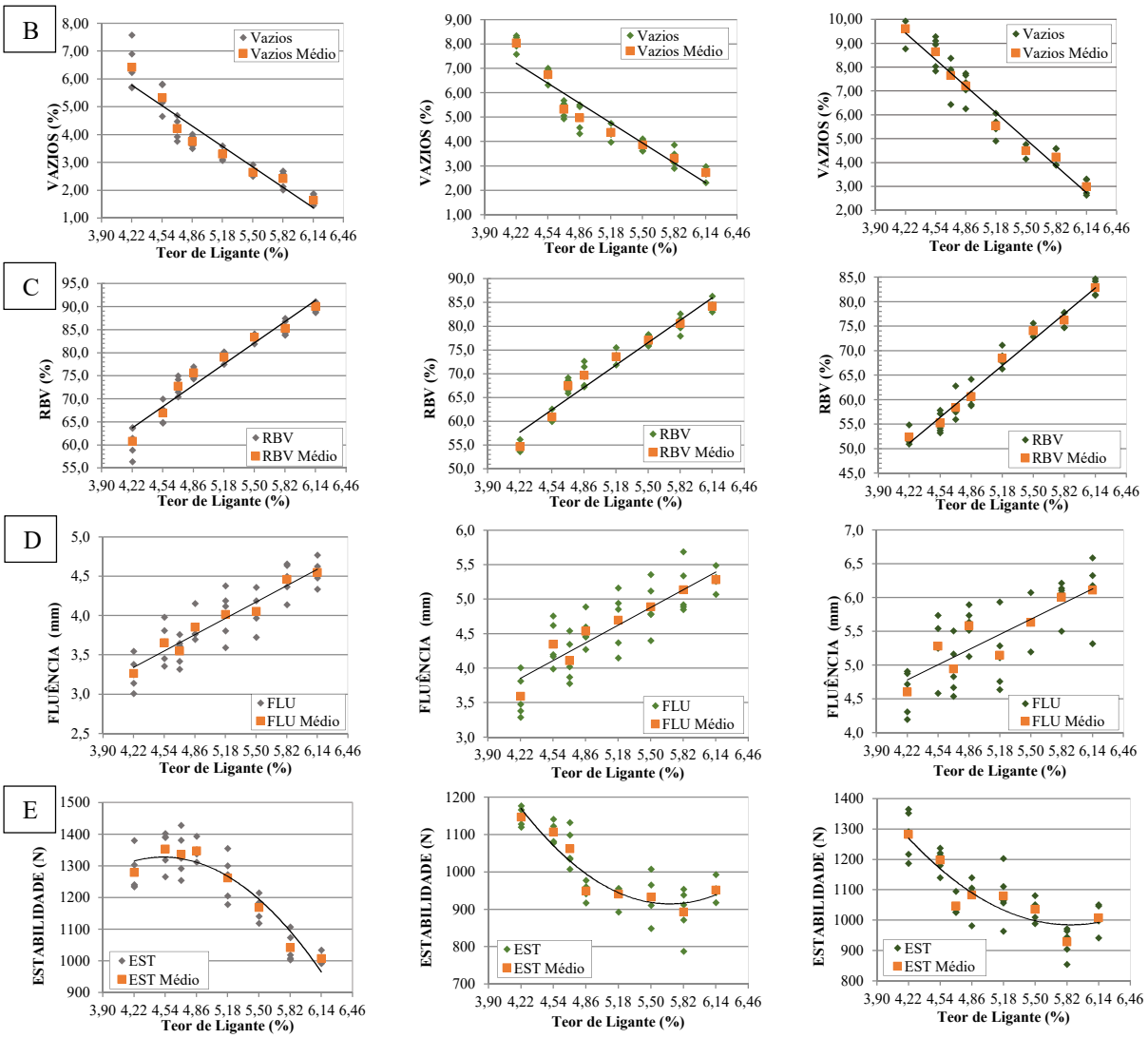


Figura 3: Resultados do ensaio Marshall

4.2. Resistência à tração indireta e Resistência à Ação Deletéria da Água

A partir do ensaio de tração indireta verifica-se a tendência parabólica (Figura 4A) do comportamento mecânico das misturas asfálticas, com a indicação direta de valores de pico de resistência ao cisalhamento, a saber: referência (4,86 %), 0,3 % (5,50 %) e 0,5 % (5,86 %) de sisal.

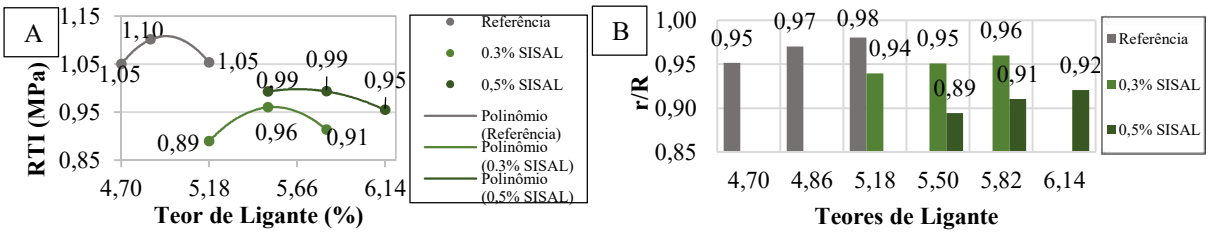


Figura 4: (A) Resultados médios do ensaio de tração indireta (B) Gráfico da relação r/R para ensaio de Duriez

É possível observar também que a interferência da fibra de sisal no contato direto entre os granulares, diminui o intertravamento entre partículas, e consequentemente, a resistência mecânica da mistura, como observado. Porém, entre as amostras contendo fibra de sisal, o aumento do teor de incorporação na formulação, aportou pequeno acréscimo na resistência mecânica das amostras, devido à maior densidade de fibras atuar na inibição da propagação de trincamento no corpo de prova durante a aplicação do esforço de tração indireta.

No que diz respeito à ação deletéria da água analisada no ensaio de Duriez a 18 ºC (Figura 4B), tem-se que o aumento no teor de ligante reduz a quantidade de vazios nos interstícios das misturas asfálticas e, consequentemente, diminui a penetração da água nas formulações, tornando as misturas menos suscetíveis ao seu efeito deletério. No entanto, o aumento do percentual de sisal torna as misturas asfálticas mais suscetíveis à ação da água. Ainda, a trama formada pelas fibras de sisal absorve parte do ligante betuminoso das dosagens, contribuindo para a redução da espessura da película que envolve os granulares e, consequentemente redução da resistência mecânica das misturas asfálticas.

Desta forma, depurando as análises dos resultados dos ensaios de tração indireta e Duriez, conclui-se que os teores de 4,86 %, 5,50 % e 5,82 % são os mais indicados para compor as dosagens das formulações de referência, com 0,3 % e 0,5 % de sisal, respectivamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise ao MEV da fibra sisal revelou que as fibras se entrelaçam formando uma trama emaranhada e criando vazios, o que confere volumetria considerável ao material. Essa característica foi confirmada pelos resultados de MVR, MVA e teor de vazios. Essa tendência, em conformidade com os resultados obtidos no ensaio Marshall, mostraram que a incorporação da fibra na mistura, diminui o contato entre os granulares, e da mesma forma, a resistência mecânica. Ainda que o aumento do teor de fibra de sisal possa melhorar a capacidade de reduzir a propagação de trincas das formulações, os resultados obtidos indicaram que a adição das fibras em misturas asfálticas densas não apresenta benefícios significativos em relação às propriedades mecânicas estudadas, esta adição requer um maior consumo de ligante betuminoso nas dosagens, acarretando em um impacto econômico maior no custo do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barra, B. S. (2009). Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

Clara, E. (2020), Avaliação de Misturas Asfálticas Densas com a Incorporação de Cinza de Carvão Mineral. Joinville: Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Evaldt, F. P. (2022). Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo BBSG com a incorporação de fibra de sisal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.

Li, J. Yang, L. He, L. Guo, R. Li, X. Chen, Y. Muhammad, Y. Liu, Y. (2023). Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: A review. Journal of Road Engineering, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.002.

Mashaan, N.; Karim, M.; Khodary, F.; Saboo, N.; Milad, A. (2021). Bituminous Pavement Reinforcement with Fiber: A Review. CivilEng. v. 2, p. 599-611, jul. 2021.

Razahi M. M., Chopra A. (2020). An Experimental Investigation of Using Sisal Fiber and Coir Fiber as An Additive in Stone Matrix Asphalt. International Journal of Advance Science and Technology, v. 29, p. 5111-5128, 2020.

Singh G., Singh S., Kumar R., Chohan J. (2022). Exploration of sisal fibre for modification of bituminous mix. Materials today: Proceedings, v. 48, part 5, p. 1352-1355, 2022. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.070.

Beatriz Paula Fieldkircher (beatrizfieldkircher@gmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dona Francisca, 8300 - Zona Industrial Norte - Joinville/SC – Brasil.
Breno Salgado Barra (breno.barra@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Estéfani Clara (estefani.clara@hotmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Rafael Cristyan Fronza (rafael.c.fronza@gmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dona Francisca, 8300 - Zona Industrial Norte - Joinville/SC – Brasil.
Jessé Valente de Liz (jesse.v@posgrad.ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.

PLÁSTICOS RECICLADOS COMO SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL: UMA AVALIAÇÃO TEÓRICA SOBRE O AVANÇOS E DESAFIOS NA MODIFICAÇÃO DE MATERIAIS ASFÁLTICOS

Nailton Silva Costa Mafra, Marcio Muniz de Farias
Universidade de Brasília

RESUMO

A utilização de resíduos plásticos como modificadores de misturas asfálticas tem se destacado como alternativa promissora para reduzir impactos ambientais e aumentar a durabilidade dos pavimentos. Este artigo tem como objetivo revisar criticamente a literatura sobre o tema, sintetizando o conhecimento atual, identificando inovações tecnológicas e avaliando a eficácia de diferentes tipos de plásticos na melhoria do desempenho do asfalto. A pesquisa aborda os desafios da gestão de resíduos e da sustentabilidade na infraestrutura viária, oferecendo subsídios técnicos para orientar futuras investigações voltadas à pavimentação rodoviária com menor impacto ambiental.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A valorização dos resíduos plásticos como modificadores de asfalto surge como resposta ao crescente descarte global desses materiais e à demanda por pavimentação mais sustentável e eficaz. Nas últimas décadas, pesquisas têm incorporado diversos polímeros pós-consumo, como PET, PEAD, PEBD, PP e borracha moída, que promovem benefícios ambientais e melhoram propriedades do pavimento, como resistência ao trilhamento, rigidez e durabilidade (Bastola et al., 2024; Singh et al., 2024).

Apesar desses avanços, persistem lacunas importantes, principalmente quanto ao consenso sobre o tipo de plástico, dosagem ideal e método de incorporação (úmido ou seco), considerando variações climáticas e operacionais (Li et al., 2024). Problemas técnicos como instabilidade durante armazenamento e incompatibilidades químicas com o ligante também dificultam a padronização do processo (Dong et al., 2023). Além disso, há escassez de dados confiáveis sobre o desempenho em longo prazo das misturas asfalticas modificadas com residuos de plsticos . Estudos indicam melhorias na resistência ao trilhamento, mas há incertezas relativas à resistência à fadiga e comportamento em baixas temperaturas (Alhadidi et al., 2024; Li et al., 2024).

Esta revisão tem como objetivo sistematizar os avanços técnicos e ambientais, identificar desafios pendentes e sugerir práticas para a integração segura e eficiente dos resíduos plásticos nas misturas asfálticas. O potencial para fomentar a economia circular e infraestrutura sustentável é evidente, mas depende do desenvolvimento de abordagens mais padronizadas e adaptadas à prática (Ashish et al., 2023).

2. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica foi orientada pela questão central: quais os avanços no uso de resíduos plásticos como materiais sustentáveis na modificação do asfalto, com foco em melhorias de desempenho? Para isso, estruturou-se a busca em três eixos principais — desenvolvimento tecnológico, impactos ambientais e propriedades mecânicas e de desempenho —, com levantamento sistemático nas bases *Scopus, Web of Science e ScienceDirect*. Os critérios de inclusão abrangeram publicações dos últimos cinco anos, com foco explícito na **modificação de ligantes ou misturas asfálticas por resíduos plásticos** e avaliação de pelo menos um dos seguintes aspectos: **desempenho mecânico, reológico, ambiental ou econômico,** usando tais termos como critérios de busca.. Foram excluídos artigos duplicados, sem acesso ao texto completo ou fora do escopo temático. A triagem seguiu três etapas: leitura dos títulos, análise dos resumos e leitura completa quando necessário, resultando inicialmente em 60 artigos. Posteriormente, aplicou-se o encadeamento de citações, identificando estudos correlatos, o que adicionou 37 artigos ao escopo. Ao final, 97 artigos foram selecionados e classificados segundo critérios de relevância, profundidade metodológica e aplicabilidade, dos quais 53 foram analisados em profundidade, servindo de base para a discussão das potencialidades, limitações e direções futuras do uso de plásticos em materiais asfálticos.

3. SÍNTESE E ANÁLISE CRÍTICA

A literatura revisada sobre o uso de resíduos plásticos como modificadores sustentáveis em misturas asfálticas evidencia avanços significativos tanto na melhoria do desempenho mecânico dos pavimentos quanto na sustentabilidade ambiental. Diversos estudos apontam incrementos nas propriedades mecânicas, como resistência à deformação permanente, vida de fadiga e rigidez do ligante, destacando o potencial de diversos

tipos de polímeros, incluindo polietileno de alta e baixa densidade (HDPE, LDPE), politereftalato de etileno (PET) e polipropileno (PP). Contudo, permanecem desafios relacionados à padronização dos métodos de modificação, à durabilidade de longo prazo e aos impactos ambientais, como a liberação de microplásticos.

A Tabela 1, apresenta as correlações entre alguns aspectos, potencialidades e limitações, com grande parte dos estudos abordando o uso de plásticos do tipo HDPE, LDPE e PET, com dosagens entre 4% e 8%.

Tabela 1: Potencialidades e Limitações dos estudos

Aspecto	Potencialidades	Limitações
Melhorias no Desempenho Mecânico e Reológico	A incorporação de resíduos plásticos nas porcentagens de 2% a 6%, especialmente HDPE e LDPE, eleva a estabilidade térmica, a resistência ao afundamento e a vida à fadiga das misturas asfálticas. Essas modificações aumentam o módulo complexo e reduzem a deformação permanente, com ganhos em rigidez e durabilidade (Ghani et al., 2022; Mainieri et al., 2024; Al-Shawabkeh et al., 2022). A adição de borracha moída ou polímeros SBS potencializa a elasticidade e resistência ao envelhecimento (Huang et al., 2024; Huang), com comprovação por DSR, MSCR e estabilidade Marshall (Singh et al., 2024).	Apesar dos resultados positivos, alguns estudos relatam efeitos conflitantes na resistência à fissuração em baixas temperaturas e à fadiga, especialmente com certos plásticos como PP e LDPE (Eskandarsefat et al., 2021). A variabilidade nos tipos de plástico, dosagens e métodos de preparo leva a resultados inconsistentes. Além disso, muitos estudos focam em testes laboratoriais de curto prazo, com validação limitada em campo, suscitando dúvidas quanto à durabilidade sob condições reais de tráfego e clima (Enfrin & Giustozzi, 2022; Eskandarsefat et al., 2021).
Benefícios Ambientais e Sustentabilidade	A incorporação de resíduos plásticos no asfalto contribui para a gestão adequada desses resíduos e reduz a dependência do betume virgem, alinhando-se aos objetivos da economia circular (Bastola et al., 2024;Sajid et al., 2024). Avaliações do ciclo de vida indicam redução nas emissões de carbono e nos custos materiais quando plásticos substituem parte do ligante ou agregados.Ensaios de campo demonstram potencial para infraestrutura sustentável, com vida útil prolongada e menor necessidade de manutenção (Ma et al., 2024).	Persistem incertezas quanto à liberação de microplásticos ao longo do ciclo de vida do asfalto modificado, com poucas pesquisas quantificando esses impactos (Ashish et al., 2023). O comportamento dos plásticos sob envelhecimento e exposição a intempéries ainda é pouco compreendido, e potenciais emissões tóxicas durante a mistura e o uso demandam estudos adicionais (Enfrin & Giustozzi, 2022). A variabilidade na composição dos resíduos plásticos também dificulta avaliações ambientais consistentes.
Compatibilidade e Mecanismos de Interação	Técnicas analíticas avançadas como FTIR, MEV e microscopia de fluorescência revelam mistura física e formação de redes entre plásticos e asfalto, melhorando rigidez e elasticidade do ligante (Yu et al., 2023). Compatibilizantes químicos e métodos de extrusão reativa aprimoram a dispersão dos polímeros e a estabilidade de armazenamento (Xu et al., 2023). Modificadores compostos que combinam plásticos com borracha ou grafeno mostram efeitos sinérgicos nas propriedades mecânicas (Lanotte, 2023;Venturini et al., 2021).	A heterogeneidade dos resíduos plásticos pode causar problemas de compatibilidade, separação de fases e instabilidade durante o armazenamento (Alhadidi et al., 2024), enquanto a falta de métodos padronizados de caracterização limita a compreensão dos mecanismos de modificação. Além disso, alguns tipos de plástico apresentam baixo desempenho em baixas temperaturas ou comportamento frágil, restringindo sua aplicação sem ajustes adicionais (Yu et al., 2023; Li et al., 2022).
Durabilidade e Envelhecimento	Estudos com simulações de envelhecimento e modelagem em campo indicam que o asfalto modificado com plástico apresenta maior resistência ao afundamento e à fadiga ao longo do tempo (Abushaban et al., 2024; Xing et al., 2023). Aditivos como SBR aprimoram o desempenho em baixas temperaturas e a resistência ao envelhecimento (Xing et al., 2023). Além disso, a multirreciclabilidade foi comprovada sem perdas significativas de desempenho (Mino et al., 2023).	Dados de campo a longo prazo ainda são escassos, e testes acelerados podem não refletir completamente as condições reais de serviço (Eskandarsefat et al., 2021). A modificação com plástico frequentemente reduz a resistência à fissuração em baixas temperaturas, apresentando riscos em climas frios (Yu et al., 2023).O impacto dos ciclos repetidos de reciclagem sobre propriedades mecânicas e segurança ambiental necessita de mais estudos (Mino et al., 2023).
Viabilidade Econômica e Implementação	Vários estudos reportam economia de custos pela redução do uso de ligante virgem e valorização dos resíduos plásticos. Pesquisas demonstram a viabilidade de integrar resíduos plásticos em usinas convencionais de asfalto com investimento adicional mínimo (Kovács et al., 2024). Modelos de aprendizado de máquina auxiliam na otimização das formulações e previsão de desempenho, melhorando a aplicabilidade prática (Junaid et al., 2024).	Análises econômicas são frequentemente limitadas a escalas laboratoriais ou pilotos, sem avaliações abrangentes em produção em larga escala e custos do ciclo de vida (Sajid et al., 2024). A variabilidade na oferta e qualidade dos resíduos plásticos dificulta a produção padronizada. A necessidade de equipamentos específicos pode elevar custos iniciais (Kovács et al., 2024).
Metodologias e Qualidade dos Dados	Os estudos revisados empregam ampla gama de técnicas experimentais, incluindo ensaios reológicos, avaliação de desempenho mecânico, análise microscópica e modelagem computacional, proporcionando compreensão robusta e multifacetada (Ghani et al., 2022). Revisões sistemáticas e meta-análises sintetizam achados e identificam tendências (Cardoso et al., 2023).	A heterogeneidade metodológica, incluindo diferenças em tipos de plástico, dosagens, métodos de mistura e protocolos de ensaio, dificulta a comparação direta e meta-análise (Cardoso et al., 2023). Muitos trabalhos usam amostras pequenas ou condições laboratoriais que podem não refletir a realidade de campo. A falta de padronização nos ensaios limita a reprodutibilidade (Enfrin & Giustozzi, 2022)

4. CONVERGÊNCIAS E DIVERGÊNCIAS NOS ESTUDOS

A literatura evidencia o alto potencial dos resíduos plásticos na melhoria do desempenho mecânico de misturas asfálticas, com ganhos em rigidez, resistência à deformação e durabilidade, além de benefícios ambientais como a redução do descarte em aterros e a diminuição do uso de matérias-primas virgens, contribuindo para a economia circular. Contudo, persistem desafios quanto à escolha do tipo de polímero, à dosagem adequada e ao desempenho

em baixas temperaturas, especialmente no caso de plásticos mistos. Polímeros como HDPE, LDPE e PET são os mais recorrentes, com dosagens entre 4% e 8% sendo geralmente eficazes.. A via úmida tende a oferecer melhor homogeneidade, enquanto a via seca se destaca pela praticidade e viabilidade econômica, sendo a escolha dependente das condições locais. Além disso, há preocupações crescentes quanto à liberação de microplásticos e à falta de metodologias padronizadas para avaliação ambiental ao longo do ciclo de vida das misturas.

Embora os estudos indiquem melhorias na resistência ao envelhecimento, a falta de dados de longo prazo ainda limita a compreensão completa do desempenho dessas misturas. O avanço da aplicação depende de mais pesquisas que promovam a padronização de métodos, o controle dos impactos ambientais e a validação do desempenho em diferentes condições climáticas e operacionais. A Tabela 2, apresenta esquematicamente alguns critérios de comparação entre os estudos destacando convergências e divergências entre eles.

Tabela 2: Convergência e Divergência dos estudos

Critério	Estudos com Convergência de Resultados	Estudos com Resultados Divergentes
Tipo de Plástico e Dosagem	Estudos destacam o HDPE e LDPE como modificadores eficazes do ligante asfáltico, com dosagens ideais entre 4% e 8%, promovendo maior rigidez e resistência à deformação permanente (Bastola et al., 2024; Ghani et al., 2022; Singh & Gupta, 2024; Mohammed et al., 2023; Malbila et al., 2024). O PET também apresenta bom desempenho mecânico e durabilidade em proporções similares (Jexembayeva et al., 2024; Fahmy et al., 2024; Mahan, 2023; Zair et al., 2021). Já PP melhora a resistência em altas temperaturas, mas pode reduzir a flexibilidade em climas frios (Sukrislistarto et al., 2019).	Alguns estudos indicam que as dosagens ótimas podem variar consideravelmente, podendo chegar a até 20% da massa do ligante, enquanto outros alertam sobre perdas de desempenho com a ultrapassagem da faixa de 8% (Singh et al., 2024; Singh, 2024). A eficácia de plásticos mistos ou multicamadas, como o MPP, ainda carece de consenso (Qabur et al., 2022).
Desempenho Mecânico	Há consenso de que a modificação com plásticos do tipo LDPE entre 3% a 7% melhora a resistência ao afundamento permanente, a rigidez e a resistência à umidade em misturas asfálticas (Ullah et al., 2024; Alhadidi et al., 2024; Al-Shawabkeh et al., 2022; Mohammed et al., 2023; Cardoso et al., 2023; Ghos et al., 2022). A resistência à fadiga também é relatada como beneficiada, embora com menor consistência entre os estudos (Huang et al., 2022).	A resistência ao trincamento em baixas temperaturas para o LDPE no teor de 4% apresenta variabilidade significativa: enquanto alguns estudos indicam piora com a adição de plásticos (Yu et al., 2023; Li et al., 2023), outros observam manutenção ou melhoria do desempenho, especialmente com o uso combinado de PET com elastômeros ou fibras (Huang et al., 2024;Ma et al., 2024).
Modificação: Processos Úmido vs. Seco	Ambos os processos são considerados tecnicamente viáveis. A via úmida promove melhor dispersão e modificação do ligante (Alhadidi et al., 2024; Bennert et al., 2024; Radeef et al., 2021), enquanto a via seca oferece vantagens econômicas e operacionais, como o revestimento direto dos agregados e menor complexidade de aplicação (Jitsangiam et al., 2023; Mahan, 2023).	Alguns autores apontam que a via seca pode gerar problemas de distribuição não uniforme e desafios de mistura, comprometendo a homogeneidade do desempenho (Radeef et al., 2021; Ghos et al., 2022). No entanto, há relatos de sucesso em aplicações em larga escala com desempenho satisfatório (Chiang et al., 2024).
Impacto Ambiental	Há consenso de que a incorporação de resíduos plásticos em misturas asfálticas contribui positivamente para o meio ambiente, reduzindo o volume de resíduos em aterros e a pegada de carbono, além de diminuir o consumo de recursos naturais, conforme apontado por avaliações de ciclo de vida (Bastola et al., 2024; Elnaml et al., 2024; Lanotte, 2023; Firoozi & Firoozi, 2023). Tais modificações são ainda destacadas como promotoras da economia circular (Ashish et al., 2023; Mohankar, 2024; Karim et al., 2023).	Persistem preocupações em relação à liberação de microplásticos, emissão de vapores e possíveis impactos ambientais de longo prazo, aspectos ainda pouco investigados e alvo de debates científicos (Ashish et al., 2023; Enfrin & Giustozzi, 2022).
Durabilidade e Resistência ao Envelhecimento	A literatura destaca melhorias na resistência ao envelhecimento em altas temperaturas e na durabilidade frente à deformação permanente com o uso de aditivos como borracha moída e estireno-butadieno (SBR), os quais também aumentam a rigidez do ligante e reduzem sua suscetibilidade à umidade (Huang et al., 2024; Mainieri et al., 2024; Xing et al., 2023; Abdel-Wahed et al., 2024; Radeef et al., 2021).	A resistência ao envelhecimento em baixas temperaturas podem ser prejudicada pela adição isolada de plásticos, sendo necessária a combinação com elastômeros (como SBR) ou ajustes na dosagem para evitar a fragilização (Xing et al., 2023; Eskandarsefat et al., 2021). A escassez de dados de desempenho em campo de longo prazo ainda gera incertezas (Carone et al., 2022).

5. LIMITAÇÕES DA LITERATURA E DIREÇÕES FUTURAS DE PESQUISA

Apesar dos avanços na utilização de resíduos plásticos pós-consumo em misturas asfálticas, persistem lacunas que comprometem a reprodutibilidade e a aplicação em larga escala. A maioria dos estudos está geograficamente concentrada, limitando a generalização dos resultados (Abushaban et al., 2024; Ma et al., 2024; Elnaml et al., 2023; Alraini et al., 2022). A predominância de ensaios laboratoriais acelerados e a escassez de dados em campo comprometem a avaliação da durabilidade sob condições reais. Além disso, a heterogeneidade dos resíduos plásticos quanto ao tipo e contaminação dificulta a padronização (Bastola et al., 2024; Singh, 2024; Xing et al., 2023; Radeef et al., 2021; Ashish et al., 2023).

A variabilidade nos métodos de incorporação (úmido e seco) e nos parâmetros operacionais afeta a comparabilidade dos estudos, com ênfase excessiva no desempenho em altas temperaturas e negligência à resistência ao trincamento

e à fadiga em climas frios (Jitsangiam et al., 2023; Li et al., 2024; Yu et al., 2023). Faltam validações em escala piloto e análises ambientais sobre liberação de microplásticos e impactos ao longo do ciclo de vida (Ashish et al., 2023; Smith et al., 2023; Mino et al., 2023), além de estudos econômicos abrangentes sobre custos e viabilidade (Yazdani et al., 2022).

Recomenda-se que futuras pesquisas priorizem estudos de campo de longo prazo (Eskandarsefat et al., 2021), métodos padronizados de pré-tratamento (Xu et al., 2023; Jitsangiam et al., 2023), avaliação de microplásticos (Ashish et al., 2023; Radeef et al., 2021), comparação entre métodos úmido e seco (Singh, 2024; Alhadidi et al., 2024), ensaios em baixas temperaturas (Li et al., 2024; Yu et al., 2023) e padronização de protocolos (Cardoso et al., 2023). Diretrizes claras para triagem de resíduos e estudos sobre reciclabilidade múltipla e viabilidade econômica são igualmente fundamentais (Mohankar, 2024; Mino et al., 2023; Singh & Gupta, 2024; Sajid et al., 2024; Kovács et al., 2024).

6. CONCLUSÕES

O uso de resíduos plásticos como modificadores de asfalto tem melhorado o desempenho mecânico e a sustentabilidade, com ganhos em estabilidade térmica, resistência à deformação e vida à fadiga. As dosagens mais eficazes variam entre 2% e 8% do ligante ou dos agregados acima disso, os ganhos se estabilizam ou decrescem.

Os processos de modificação podem ser úmidos, com melhor dispersão e desempenho reológico, ou seco, que se destaca pelo menor custo e simplicidade operacional. Novas técnicas, como uso de aditivos compatibilizantes, buscam superar limitações de compatibilidade e estabilidade. Do ponto de vista ambiental, os benefícios incluem redução da pegada de carbono, economia de recursos naturais e menor descarte em aterros, embora haja preocupações com microplásticos e emissões voláteis. Ensaios demonstram resistência aprimorada ao envelhecimento e à umidade, mas os resultados para trincamento a frio ainda são variáveis.

Conclui-se, portanto, que a integração de resíduos plásticos em materiais asfálticos configura uma solução promissora e multifacetada, contribuindo simultaneamente para a gestão sustentável de resíduos plásticos e para o avanço da infraestrutura viária ambientalmente responsável. Ainda que os progressos nos aspectos de desempenho e benefícios ambientais sejam evidentes, a padronização dos processos de modificação, a avaliação da durabilidade em longo prazo e a realização de análises ambientais aprofundadas são etapas fundamentais para viabilizar a adoção em larga escala e garantir a aplicação segura e eficaz na construção de rodovias sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Wahed, T.; A. Salah e A. Abdel-Raheem (2024) Performance evaluation of asphalt mixtures modified with medical plastic waste. *Sohag Engineering Journal (Print)*, v. 4, n. 2, p. 178–188. DOI: 10.21608/sej.2024.312852.1063.

Abushaban, O. F.; K. Alraini; W. Zeiada; G. G. Al-Khateeb e H. Ezzat (2024) Impact of high-density polyethylene recycled from waste milk bottles on asphalt binder's performance under UAE's climate conditions. *Materials Science Forum*, v. 1142, p. 137–145. DOI: 10.4028/p-y6b1zh.

Al-Shawabkeh, A.; M. O. Thalji e T. Al-Rousan (2022) Using recycled plastic waste to improve the performance of hot-mix asphalt. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, p. 1–29. DOI: 10.1680/jwarm.21.00013.

Alhadidi, Y. I.; I. L. Al-Qadi; U. M. Ali; J. G. Mainieri e B. K. Sharma (2024) Impact of nonrecyclable plastics on asphalt binders and mixtures. *Transportation Research Record*. DOI: 10.1177/03611981241245692.

Ashish, P. K.; A. Sreeram; X. Xu; P. Chandrasekar; A. Jagadeesh; D. Adwani e R. K. Padhan (2023) Closing the loop: Harnessing waste plastics for sustainable asphalt mixtures – a comprehensive review. *Construction and Building Materials*, v. 400, p. 132858. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132858.

Bastola, N. R.; B. Olson; J. E. S. L. Teixeira e H. H. Fatmehsari (2024) Effects of the simultaneous use of post-industrial polypropylene waste plastic and soybean oil recycling additive on the performance of high-rap recycled mixtures. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135945.

Bennert, T.; C. Ericson; E. Haas; E. F. Wass; D. Tulanowski e N. Cytowicz (2024) Assessment of plastic waste modification to asphalt materials using the wet process. *Transportation Research Record*. DOI: 10.1177/03611981241230298.

Cardone, F.; S. Spadoni; G. Ferrotti e F. Canestrari (2022) Asphalt mixture modification with a plastomeric compound containing recycled plastic: Laboratory and field investigation. *Materials and Structures*, v. 55, n. 3. DOI: 10.1617/s11527-022-01954-4.

Cardoso, J.; A. Ferreira; A. Almeida e J. Santos (2023) Incorporation of plastic waste into road pavements: A systematic literature review on the fatigue and rutting performances. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133441.

Chiang, C.; M. Mivehchi e H. Wen (2024) Towards a use of waste polyethylene in asphalt mixture as a compaction aid. *Journal of Cleaner Production*, v. 440, p. 140989. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140989.

Dong, R.; A. Gao; Y. Zhu; B. Xu e S. Ping (2023) The development of a new thermoplastic elastomer (tpe)-modified asphalt. *Buildings*, v. 13, n. 6, p. 1451. DOI: 10.3390/buildings13061451.

Elnaml, I. A.; J. Liu; L. N. Mohammad; H. Dylla; N. M. Wasiuddin e S. Cooper (2024) Recycling waste plastics in asphalt mixture: Engineering performance and environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142180.

Enfrin, M. e F. Giustozzi (2022) Recent advances in the construction of sustainable asphalt roads with recycled plastic. *Polymer International*, v. 71, n. 12, p. 1376–1383. DOI: 10.1002/pi.6405.

Eskandarsefat, S.; F. Meroni; C. Sangiorgi e P. Tataranni (2021) Fatigue resistance of waste plastic-modified asphalt. DOI: 10.1016/b978-0-323-85789-5.00008-3.

Fahmy, E. A.; A. Youssef; E. E. Ali; A. Algabry e O. Elbagalati (2024) Evaluation of asphalt mixtures modified with polyethylene terephthalate (pet). *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 9, n. 11. DOI: 10.1007/s41062-024-01734-9.

Firoozi, A. A. e A. A. Firoozi (2023) Advancing pavement sustainability with recycled materials. *Journal of civil engineering and urbanism*, v. 13, n.

4, p. 85–93. DOI: 10.54203/jceu.2023.10.

Ghani, U.; B. Zamin; M. T. Bashir; M. Ahmad; M. M. S. Sabri e S. Keawsawasvong (2022) Comprehensive study on the performance of waste HDPE and LDPE modified asphalt binders for construction of asphalt pavements application. *Polymers*, v. 14, n. 17, p. 3673. DOI: 10.3390/polym14173673.

Ghos, S.; C. Sumter; P. C. Arevalo; M. Zaman; K. R. Hobson; G. Kalicki e D. Metzer (2022) Performance of asphalt mixes containing postconsumer recycled plastic using balanced mix design approach and dry process. *Transportation Research Record*, v. 2676, n. 9, p. 720–732. DOI: 10.1177/03611981221088200.

Huang, J.; K. Yan; M. Wang; K. Shi e Y. Li (2022) Performance evaluation of sbs-modified asphalt mixtures incorporating waste tire rubber and hdpe. DOI: 10.2139/ssrn.4657909.

Jexembayeva, A.; M. Konkanov; L. Aruova; A. Kirgizbayev e L. Zhaksylykova (2024) Performance optimization approach of polymer-modified asphalt mixtures with pet and pe waste. *Polymers*, v. 16, n. 23, p. 3308. DOI: 10.3390/polym16233308.

Jitsangiam, P.; K. Nusit; P. Teeratitayangkul; G. P. Ong e C. Thienchai (2023) Development of a modified Marshall mix design for hot-mix asphalt concrete mixed with recycled plastic based on dry mixing processes. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133127.

Junaid, M.; C. Jiang; U. Gazder; I. Hafeez e D. Khan (2024) Evaluation of asphalt mixtures modified with low-density polyethylene and high-density polyethylene using experimental results and machine learning models. *Dental science reports*, v. 14, n. 1. DOI: 10.1038/s41598-024-74657-1.

Karim, S. B. A.; S. Norman; S. Koting; K. Simarani; S. Loo; F. A. M. Rahim; M. R. Ibrahim; N. I. M. Yusoff e A. H. N. Mohamed (2023) Plastic roads in Asia: Current implementations and should it be considered. *Materials*, v. 16. DOI: 10.3390/ma16165515.

Kovács, R.; A. Czímerová; A. Fonód e J. Mandula (2024) The use of waste low-density polyethylene for the modification of asphalt mixture. *Buildings*, v. 14, n. 10, p. 3109. DOI: 10.3390/buildings14103109.

Lanotte, M. A. (2023) Recycled plastics and rubber for green roads: The case study of devulcanized tire rubber and waste plastics compounds to enhance bitumen performance. *Resources, conservation & recycling advances*, v. 18, p. 200157. DOI: 10.1016/j.rcradv.2023.200157.

Li, F.; X. Zhang; K. Zhang; F. Li; L. Wang e J. Cao (2023) Exploring the effect of different waste polypropylene matrix composites on service performance of modified asphalt using analytic hierarchy process. *Construction and Building Materials*, v. 405, p. 133292. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133292.

Ma, J.; H. Yuan; H. M. Nawarathna e S. A. Hesp (2024) Sustainable application of recycled plastics in asphalt pavement: Case study of a trial in Newtonville, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*. DOI: 10.1139/cjce-2024-0438.

Mahan, H. M. (2023) Enhancing marshall properties through the integration of waste plastic water bottles in dry process asphalt production. DOI: 10.18280/mmep.100534.

Mainieri, J. G.; I. L. Al-Qadi e R. Ghabchi (2024) Effects of waste high-density polyethylene (hdpe) on asphalt binder and airfield mixes. *International Journal of Pavement Engineering*. DOI: 10.1080/10298436.2024.2303661.

Malbila, E.; E. Z. Awandza; Y. B. Traore; J. Kinda e S. Kam (2024) Investigation to enhanced physical and mechanical properties of road pavement in asphalt incorporating low-density waste plastic bags. *Journal of Materials Science Research*. DOI: 10.5539/jmsr.v13n1p1.

Mino, G. D.; V. Vijayan; S. Eskandarsefat; L. Venturini e K. Mantalovas (2023) Investigating the multi-recyclability of recycled plastic-modified asphalt mixtures. *Infrastructures*, v. 8, n. 5, p. 84. DOI: 10.3390/infrastructures8050084.

Mohammed, L.; T. A. Tagbor; A. Ofori-Nyarko; R. Adomah e J. O. Yeboaa (2023) Performance consideration: Asphalt modified low density polyethylene waste. DOI: 10.1016/b978-0-443-13798-3.00006-1.

Mohankar, M. R. H. (2024) Eco-friendly infrastructure development employing plastic waste for road development: A review. *Indian Scientific Journal of Research In Engineering and Management*, v. 08, n. 10, p. 1–3. DOI: 10.55041/ijsrem37885.

Qabur, A.; H. Baaj e M. El-Hakim (2022) Incorporation of the multi-layer plastic packaging in the asphalt binders: Physical, thermal, rheological, and storage properties evaluation. *Polymers*, v. 14, n. 24, p. 5396. DOI: 10.3390/polym14245396.

Radeef, H. R.; N. A. Hassan; A. R. Z. Abidin; M. Z. H. Mahmud; C. R. Ismail; H. F. Abbas; Z. H. Al-Saffar e S. Redha (2021) Impact of ageing and moisture damage on the fracture properties of plastic waste modified asphalt. *IOP conference series*, v. 971, n. 1, p. 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/971/1/012009.

Saadeh, S.; P. Katawał; S. F. Kabir; E. H. Fini e H. H. Titi (2024) Performance of reclaimed asphalt pavements containing recycled waste plastics. *Journal of Cleaner Production*, v. 442, p. 140935. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140935.

Sajid, Z. W.; A. Hussain; M. U. A. Khan; F. K. Alqahtani e F. Ullah (2024) Technical, economic, and environmental sustainability assessment of reclaimed asphalt and waste polyethylene terephthalate pavements. *Sustainability*, v. 16, n. 12, p. 4911. DOI: 10.3390/su16124911.

Singh, E. D. (2024) A review study: Mechanical and environmental benefits of plastic-modified bitumen in road construction. *International Journal for Science Technology and Engineering*, v. 12, n. 8, p. 434–438. DOI: 10.22214/ijraset.2024.63934.

Smith, M.; J. Beetge; M. I. Souliman e N. R. Bastola (2023) Modification of asphalt binders with ocean plastic waste: Characterization of binder performance. DOI: 10.1061/9780784484906.005.

Sukrislistarto; M. I. Ramli; M. Pasra e A. A. Amiruddin (2019) The sustainable performance challenge of asphalt mixture using polypropylene due to environmental weather. DOI: 10.1088/1755-1315/419/1/012075.

Ullah, S.; A. Qabur; A. Ullah; K. Aati e M. A. Abdelgiom (2024) Enhancing high-temperature performance of flexible pavement with plastic-modified asphalt. *Polymers*, v. 16, n. 17, p. 2399. DOI: 10.3390/polym16172399.

Venturini, L.; P. Mantecca; M. Perucca e L. G. Rizzi (2021) Hybrid combination of waste plastics and graphene for high-performance sustainable roads. DOI: 10.1016/b978-0-323-85789-5.00010-1.

Xing, C.; M. Li; L. Liu e R. Yang (2023) Long-term aging behavior of plastic/styrene butadiene rubber (sbr) composite modified bitumen. *Materials*, v. 16, n. 13, p. 4567. DOI: 10.3390/ma16134567.

Xu, X.; Y. Chu; Y. Luo; Y. Peng; N. Yang; J. Yan; X. Chen; F. Zou e A. Sreeram (2023) Thermal-and-mechanochemical recycling of waste polypropylene into maleated-epoxided degradation products as warm-mix asphalt modifier: Performance improvement and production mechanism analysis. *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139222.

Yazdani, L., Hoornahad, H., & Akbarpour, A. (2022). Eco-friendly asphalt containing recycled high-density polyethylene (hdpe): Performance assessment and cost analysis. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology, 13 (3). https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.03.0011

Yu, H., Wu, S., Chen, A., & Li, Y. (2023). Modification mechanism and technical performance of recycled pe-modified asphalt. Sustainability, .https://doi.org/10.3390/su151612273

Zair, M. M. B., Jakarni, F. M., Muniandy, R., & Hassim, S. (2021). A brief review: Application of recycled polyethylene terephthalate in asphalt pavement reinforcement. Sustainability, 13 (3) https://doi.org/10.3390/SU13031303

Nailton Silva Costa Mafra (nailton.mafra@aluno.unb.br)
Universidade de Brasília, Pós-Graduação em Geotecnia .Departamento de Engenharia Civil , Campus Universitário Darcy Ribeiro Asa Norte, Brasília-DF, CEP 70910-900
Marcio Muniz de Farias (marcio@.unb.br)

SOLO-CINZA DE EUCALIPTO PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Maisa Sabugari Escobar, Jairo Salim Pinheiro de Lima
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Unesp Câmpus de Ilha Solteira

RESUMO
A indústria de celulose gera resíduos, cujo manejo inadequado causa significativos impactos ambientais. Por outro lado, o uso desses materiais em obras proporciona benefícios econômicos e ambientais. Esta pesquisa avaliou a adição de cinzas de cavaco de eucalipto (CCE) na estabilização de um solo laterítico, para aplicação em pavimentos rodoviários. Foram moldados corpos-de-prova com adição de 0%, 10% e 20% de CCE e submetidos aos ensaios de compactação com energia intermediária, resistência à compressão simples e mini-CBR. A amostra com 10% de CCE apresentou o melhor desempenho, com aumento da máxima massa específica aparente seca (2,050 g/cm³) e redução do teor ótimo de umidade (10,30%). O ensaio de resistência à compressão registrou 164,27 kgf inicialmente, com redução para 62,87 kgf aos 84 dias de cura. No mini-CBR, houve elevação da capacidade de suporte de 26,23% para 51,30%. Concluiu-se que a CCE atuou como fíler, contribuindo para a melhoria das propriedades do solo.

1. INTRODUÇÃO

Diversas indústrias utilizam a madeira de eucalipto como fonte de energia em caldeiras, seja na forma de lenha, cascas ou cavacos (Resende, 2013). O Brasil é o segundo maior produtor mundial de celulose, com produção de 24,3 milhões de toneladas em 2023 (Ibá, 2024). Para cada 100 toneladas de celulose, são geradas cerca de 48 toneladas de resíduos (Bellote et al., 1998). A maior parte das cinzas provenientes da queima do cavaco de eucalipto ainda é descartada em aterros, o que acarreta impactos ambientais, como a ocupação de grandes áreas, a saturação precoce e a consequente redução da vida útil dos aterros, o risco de contaminação do lençol freático, os elevados custos com transporte e gerenciamento dos resíduos, além da resistência das comunidades locais diante da expansão dessas estruturas (Resende, 2013; Borlon e Bhoi, 2023; Keskin et al., 2024).

Muitas indústrias enfrentam dificuldades quanto ao destino final dos rejeitos (Vicente, 2022), aumentando a importância do aproveitamento destes materiais. Uma das alternativas é a estabilização de solos para a construção rodoviária. A estabilização é um processo simples e eficiente que melhora as características de resistência e durabilidade do solo, além de reduzir as suas permeabilidade e compressibilidade (Abdulwahab et al., 2018). Estudos de Baracho e Correia (2021) com cinzas da queima do bagaço de cana (CBCA) e Silva et. al (2025) com CCE, confirmam o potencial promissor de solo-cinza para a construção rodoviária.

A adição de cinzas na estabilização de solos gera também benefícios resultantes da redução do volume em depósitos, da necessidade de transporte e da extração de recursos naturais, o que contribui para mitigar o desgaste em infraestruturas rodoviárias e a emissão de poluentes (Resende, 2013; Borlon e Bhoi, 2023; Vicente, 2022). Além de reduzir a pressão sobre áreas de depósito de rejeitos, o uso de resíduos industriais na construção civil permite melhor aproveitar os solos locais e a consequente redução de áreas de empréstimos. Os materiais estabilizantes podem desempenhar funções pozolânicas, cimentícias ou de fíler (Mehta e Monteiro, 2008). Os cimentantes possuem a capacidade de autocimentação (Resende, 2013). Os pozolânicos, compostos por altos teores de sílica e/ou alumínio com estrutura amorfa, reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados, com características cimentantes (Mehta e Monteiro, 2008). Os materiais com função de fíler não reagem quimicamente, mas preenchem os poros, provocando melhor empacotamento dos grãos e redução dos vazios no solo (Mehta e Monteiro, 2008). No caso das cinzas, a reatividade está diretamente ligada à sua estrutura mineralógica – influenciada pela temperatura e processo de queima da biomassa –, às dimensões das partículas e ao teor de adição na mistura (Resende, 2013).

O presente trabalho visa analisar as melhorias decorrentes da estabilização de solos lateríticos com cinzas de cavaco de eucalipto e o seu potencial de aplicação em pavimentos rodoviários.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. O solo e a cinza empregados no estudo

No caso so solo, adotaram-se como referência as classificações TRB (Transportation Research Board) e MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), além da análise da composição mineralógica por meio de ensaio físico-químico. Dentre os ensaios relacionados, destacam-se: Limite de Plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016) –, Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016) –, perda de massa por imersão – DNER-ME (256/94) – e fluorescência de raios-X (FRX). A cinza do cavaco de eucalipto foi previamente moída em moinho de bolas e, em seguida, submetida à análise por FRX para determinar a sua composição mineralógica.

2.2. Preparação e ensaios das amostras

Foram moldados corpos-de-prova sem adição de cinza e com 10% e 20% de adição em relação ao peso seco do solo, semelhantes às dosagens avaliadas por Vicente (2022). Dentre os ensaios realizados:

- mini-Proctor com energia intermediária – DNER-ME 228/94: os corpos-de-prova foram compactados para obter os valores de máxima massa específica aparente seca e teor ótimo de umidade. Com as condições ótimas, realizaram-se os ensaios de resistência, CBR e expansão;
- resistência à compressão simples – DNER-ME 180/94: o ensaio de compressão simples foi realizado após 0, 7, 14, 28 e 84 dias de cura em câmara úmida. As amostras foram rompidas sem imersão em água, conforme as Figuras 1 (a, b, e c), pois desejava-se apenas verificar se a cinza teria (ou não) efeito significativo sobre a resistência à compressão simples do solo;

(a) (b) (c)

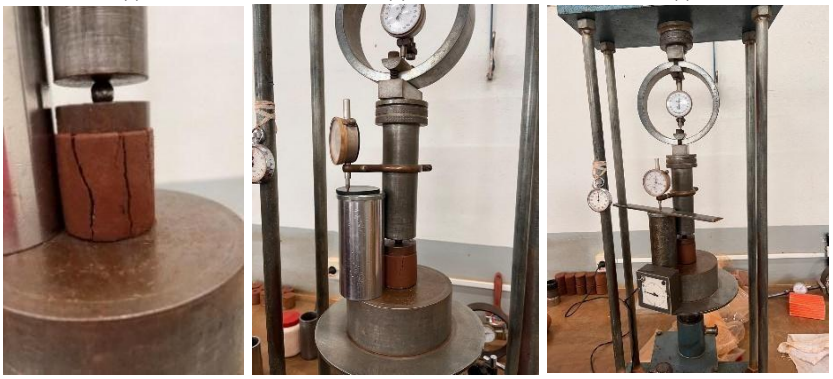


Figura 1: Ensaio de resistência à compressão simples

- mini-CBR (DNER-ME 254/97) com imersão e expansão: após o tempo de cura de 0, 7, 14, 28 e 84 dias, os corpos-de-prova foram imersos em água por 20h para determinar a expansão e, então, submetidos ao ensaio de penetração, conforme ilustrado na Figuras 2 (a, b, e c).

(a) (b) (c)

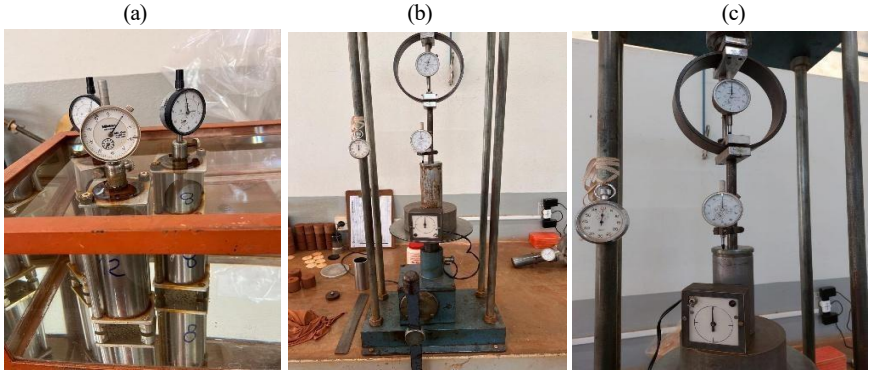


Figura 2: Ensaio de mini-CBR com imersão e expansão

3. RESULTADOS

3.1. Ensaios de caracterização do solo e da cinza

Na classificação TRB, o solo pertence ao grupo A-4(5): material fino, silto-argiloso com predominância de silte, baixa plasticidade e desempenho limitado para aplicação em subleito ou sub-base de pavimentos. Pela classificação MCT, o solo apresenta comportamento laterítico arenoso (LA'), caracterizado por baixa expansibilidade, boa coesão e elevada capacidade de suporte, o que indica potencial para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos de baixo custo, caso seja compactado adequadamente.

Com base nos resultados do ensaio de FRX, verificou-se que o solo apresenta majoritariamente silício (59,6%), alumínio (21,2%) e ferro (14,3%) em sua composição, característica de solos com comportamento laterítico, típicos de regiões tropicais. Todos os elementos identificados na amostra estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do solo

Elemento	Si	Al	Fe	Ti	S	Zr	Ca	K	Mn	Cr
(%)	59,6	21,2	14,3	3,8	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

Na cinza empregada neste estudo, predominam o silício (53,1%) e o cálcio (26,6%), indicando possível potencial pozolânico, característica favorável à sua aplicação como material estabilizante em misturas com solos. Os elementos encontrados na amostra estão discriminados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química da cinza

Elemento	Si	Ca	Fe	K	Al	S	Ti	Mn	Sr	P	Zr	Cu
(%)	53,1	26,6	5,5	5,0	4,2	2,8	1,1	1,1	0,3	0,1	0,1	0,1

3.2. Mini-Proctor com energia intermediária

Após a compactação dos corpos-de-prova, foram elaborados os gráficos relacionando a massa específica aparente seca com o teor de umidade (Figura 3), destacando-se os seus parâmetros ótimos respectivos: massa específica aparente seca máxima (ρmáx,) e teor ótimo de umidade (Wot).

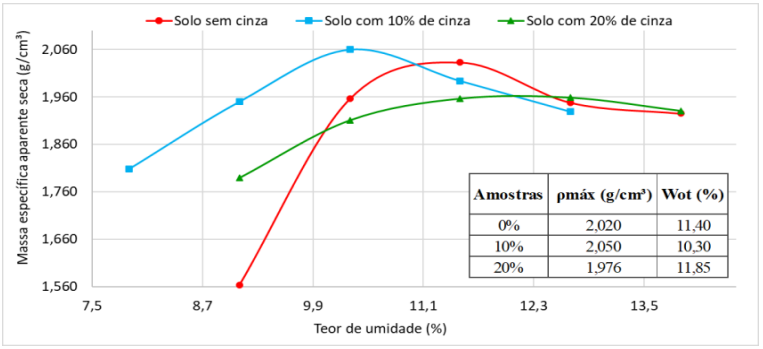


Figura 3: Comparação das curvas de compactação

Com 10% de cinza houve deslocamento da curva para a esquerda, aumentado ρmáx (2,050 g/cm³) e reduzindo Wot (10,30%). Esse comportamento indica que a cinza, ao preencher os vazios do solo, gerou estrutura mais densa, com menor quantidade de água para a compactação. Por outro lado, a adição de 20% não apresentou o mesmo desempenho, talvez derivado do excesso de material fino, que aumentou a área superficial e demandou maior teor de umidade (11,85%) para acomodar e lubrificar as partículas. Como resultado, a curva é deslocada para a direita, com ρmáx (1,976 g/cm³) é menor.

3.3. Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados após períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 84 dias em câmara úmida. A Figura 4 mostra as curvas de resistência ao longo do tempo de cura.

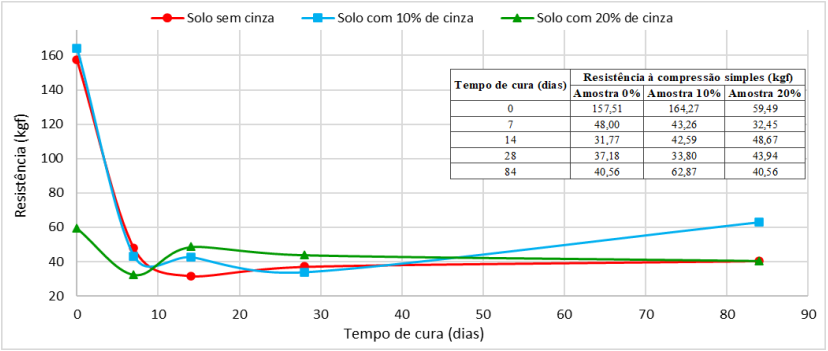


Figura 4: Comparação das curvas de resistência à compressão simples

Os resultados indicam que, no tempo de cura zero, as amostras com 0% e 10% de cinza obtiveram os maiores valores de resistência (157,51 kgf e 164,27 kgf, respectivamente), o que pode estar relacionado à compactação eficiente e à maximização do contato entre partículas. A mistura com 10% de cinza favoreceu a densificação inicial e atuou como material de preenchimento, enquanto a dosagem de 20% provavelmente excedeu o limite ideal, reduzindo a coesão. Todas as amostras apresentaram queda acentuada nos primeiros dias de cura, com posterior estabilização dos valores, sem ganhos significativos, o que indica ausência de reações pozolânicas. Essas variações ao longo do tempo podem estar atribuídas a fatores físicos como perda de umidade, rearranjo interno das partículas e redistribuição de água. Em relação ao tempo de cura, os resultados e os ganhos

comparativos à amostra de referência, são equivalentes aos alcançados por Baracho e Correia (2021): a amostra com 10% resultou no comportamento mais vantajoso, com discreta recuperação de resistência aos 30 dias de cura.

3.4. Mini-CBR com imersão e expansão

Após o tempo em câmara úmida de 0, 7, 14, 28 e 84 dias, os corpos-de-prova foram imersos em água durante 20h para medir a expansão (Figura 5). Depois, realizou-se o teste de penetração para determinar o mini-CBR. A Figura 6 ilustra as curvas de mini-CBR em função do tempo de cura.

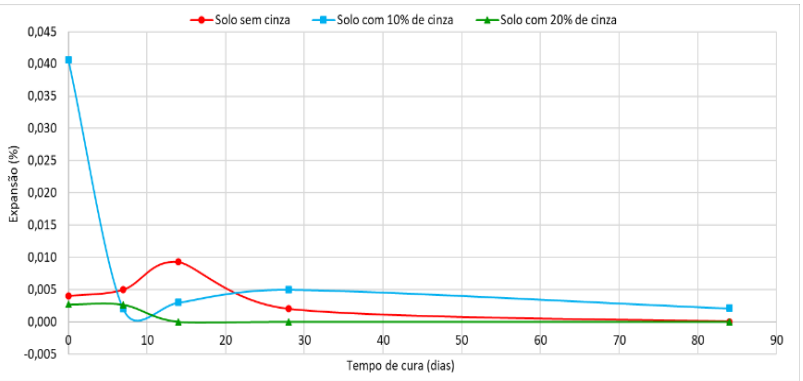
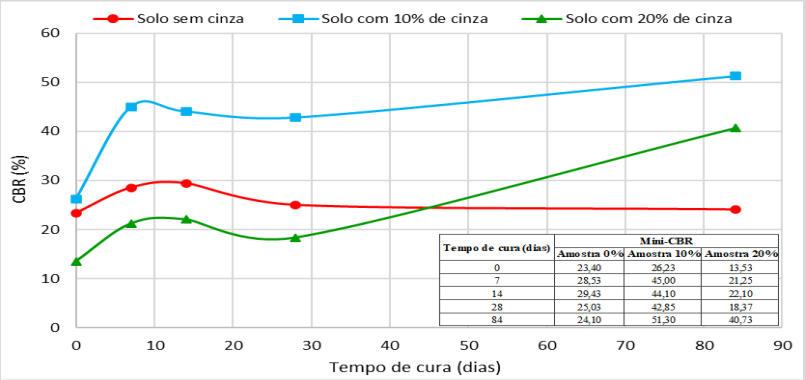


Figura 5: Comparação das curvas de expansão



Tempo de cura (dias)	Mini-CBR		
	Amostra 0%	Amostra 10%	Amostra 20%
0	23,40	26,23	13,53
7	28,53	45,00	21,25
14	29,43	44,10	22,10
28	25,03	42,85	18,37
84	24,10	51,30	40,73

Figura 6: Comparação das curvas de mini-CBR

A Figura 6 evidencia que a adição de 10% promoveu os melhores valores de capacidade de suporte, ao atingir 45% em 7 dias e 51,3% aos 84 dias – crescimento aproximado de 113% em relação ao solo natural. Para Silva et al (2025) os melhores resultados foram medidos em misturas com 15% de cinza. A amostra com 20% também obteve elevação do CBR, embora de forma mais lenta e menor eficiência, alcançando 40,73% no final do tempo de cura. O solo sem cinza manteve valores mais estáveis: entre 23% e 30%, o que indica que a estabilização com cinza produziu importante melhoria na resistência, possivelmente devido ao melhor empacotamento dos grãos, redistribuição da umidade e acomodação gradual das partículas ao longo do tempo de cura. Estudos de Vicente (2022) com ruptura imediata, portanto sem tempo de cura, resultaram ganhos de CBR de 7, 72, 181, 226 e 112% para amostras com 10, 30, 40, 50 e 60% de cinza, respectivamente.
As amostras registraram baixos valores de expansão, todos inferiores a 0,5%, atendendo aos critérios para uso em camadas de base, sub-base e reforço do subleito. A amostra com 10% obteve a maior expansão inicial (0,041%). Pode-se afirmar que a baixa expansividade está relacionada ao comportamento laterítico do solo e que a adição de cinza alterou a distribuição dos grãos, sem comprometer a estabilidade volumétrica.

4. CONCLUSÃO

Apesar de a classificação TRB indicar desempenho limitado, o solo apresentou comportamento laterítico, com baixa expansividade, boa coesão e elevada capacidade de suporte. A análise por FRX identificou a presença de sílica, alumínio e ferro no solo e revelou altos teores de cálcio e sílica na cinza.
A incorporação de 10% de cinza melhorou a compactação, com a maior máxima massa específica aparente seca e menor teor ótimo de umidade, devido à densificação da mistura com o preenchimento dos vazios. No

entanto, a adição de 20% não promoveu o mesmo desempenho, provavelmente pelo excesso de material fino. Nos ensaios mecânicos, a resistência à compressão simples diminuiu bastante após os primeiros dias de cura, sugerindo ausência de reações cimentantes, mas estabilizou posteriormente, com destaque para a amostra com 10%, que apresentou melhor eficiência. O ensaio de mini-CBR demonstrou ganhos expressivos na capacidade de suporte ao longo do tempo, sobretudo com 10% de cinza, com valor inicial de 26,23% e 51,30% aos 84 dias de cura. Todas as misturas apresentaram baixos valores de expansão (menores que 0,5%), o que confirma a estabilidade volumétrica e viabiliza o seu uso em sub-base e reforço do subleito nas camadas do pavimento. Os resultados obtidos apontam que a mistura com 10% de cinza é a alternativa mais eficiente entre as estudadas. O aproveitamento de CCE em misturas estabilizadas implica em ganhos mecânicos e higroscópicos do solo natural, com potencial promissor para a construção rodoviária. Contudo, o uso regular destes materiais enseja controle adequado das dosagens, dos procedimentos de umectação e misturação, compactação, de modo a obter os melhores resultados. Da mesma forma, recomenda avaliações periódicas que permitam aferir as suas serventias e desempenho na estrutura de pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulwahab, R.; B. A. Ibitoye; M. T. Akinleye e N.T. Ahmed. (2018) The Effects of Wood ash on the Geotechnical Properties of Lateritic Soil. *USEP: Journal of Research Information in Civil Engineering*, v. 15, n. 1. University of Ilorin Department of Civil Engineering. Dept. of Civil Engineering, University of Ilorin. Ilorin, Nigeria.

ABNT (2016) *NBR 7180* – Solo: determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2016) *NBR 6459* – Solo: determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Baracho, Gabriela O.; Correia, Natália de S. *Viabilidade de misturas de solo laterítico argiloso com cinza de bagaço de cana para construção de estradas rurais*. (2021) Resvista Geama – Ciências Ambientais e Biotecnologia. Edição: 7 (2): 21-27. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pe.

Bellote, A. F. J.; H. D. Silva; C. A. Ferreira e G. C. Andrade. (1998). Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n.37, p.99-106.

Borlon, D. S. e M. K. Bhoi. (2023) A review on the stabilization of soft soil using industrial waste. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, v. 5, n. 3. Idus Satellite Greens, Indore, Madhya Pradesh (Indian).

DNER (1994) Norma DNER *256/94* – ME: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNER (1994) Norma DNER *228/94* – ME: Solos – Ensaio de compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNER (1994) Norma DNER *180/94* – ME: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNER (1997) Norma DNER *254/97* – ME: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

IBÁ (2024) *Relatório anual de 2024*. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf (acesso em 02/07/2025).

IBRACON. Resende, D. S. (2013) *Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

Keskin, T.; E. Yilmaz; T. Kasap; M. Sari e S. Cao. (2024) Toward viable industrial solid residual waste recycling: a review of its innovative applications and future perspectives. *Minerals*, v. 14, n. 9, p. 943.

Mehta, P. K. e P. J. M. Monteiro. (2008) *Concreto*: microestrutura, propriedades e materiais. 3.ed. São Paulo:

Silva, Mateus J. De; Park, Janaina A.; Lima, Gustavo F. C.; Bezerra, Augusto, C. da S. (2025) *Cinza de cavaco de eucalipto na estabilização de solos aplicados na pavimentação*. In: IX Encontro Nacional de Aproveiramento de Resíduos na Construção (ENARC). Anais,v. 9, n. 1. Centro Federal de Educação Tecnológica e Minas Gerais, Nova Suiça, MG.

Vicente, G. O. (2022) *Estabilização de solo com adição de resíduo de celulose para aplicação em pavimentação rodoviária*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Unesp, São Paulo.

Maisa Sabugari Escobar (maisa.sabugari@unesp.br)
Jairo Salim Pinheiro de Lima (jairo.lima@unesp.br)
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Departamento de Engenharia Civil, Ilha Solteira, São Paulo

Materiais Alternativos

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

GESTÃO SUSTENTÁVEL DA LOGÍSTICA REVERSA DO RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) NO BRASIL: EFICIÊNCIA, DESAFIOS E LIÇÕES INTERNACIONAIS

Alan Marcos Ribeiro de Morais[1], **Renato da Silva Lima** [2],
[1]Escola de Engenharia de São Carlos/USP, [2]Universidade Federal de Itajubá

RESUMO
O reaproveitamento do *Reclaimed Asphalt Pavement* (*RAP*) constitui estratégia sustentável e tecnicamente viável para a pavimentação rodoviária, promovendo redução no consumo de matérias-primas, mitigação de resíduos e ganhos econômicos. Este artigo analisa a eficiência da logística reversa do *RAP* no Brasil, com base em revisão bibliográfica, análise de dados operacionais e *benchmarking* internacional. Os resultados evidenciam que, apesar do elevado potencial de reaproveitamento, o Brasil enfrenta desafios estruturais como ausência de regulamentações, carência de infraestrutura adaptada e logística ineficiente. Em contrapartida, países como Estados Unidos e Alemanha apresentam modelos avançados de coleta, estocagem e reaplicação do *RAP*, sustentados por diretrizes normativas e incentivos fiscais. A partir dessa análise, são propostas ações estratégicas para a padronização técnica, modernização da logística e fomento ao uso sustentável do *RAP* no Brasil.

Palavras-chave: *RAP*; logística reversa; pavimentação sustentável; reuso de materiais.

1. INTRODUÇÃO

O *Reclaimed Asphalt Pavement* (*RAP*) é subproduto gerado por operações de fresagem, demolição ou reabilitação de pavimentos, composto por agregados minerais revestidos com ligante envelhecido. Em cenário global de pressões ambientais, o reaproveitamento do *RAP* alinha-se à economia circular, reduzindo recursos não renováveis, custos de produção e volumes de resíduos (Zaumanis & Mallick, 2015; Langer et al., 2023).
Nos Estados Unidos, a *Federal Highway Administration (FHWA)* estima reaproveitamento anual acima de 90% do *RAP* (NAPA, 2020; FHWA, 2021). Na Alemanha, as *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)* permitem até 50% em camadas de ligação e 100% em bases (Tsakoumaki & Plati, 2024). No Brasil, o uso é fragmentado, sem regulamentação nacional, com inconsistências na coleta de dados e variabilidade regional (Lopes et al., 2024).
Assim, este artigo avalia a logística reversa do *RAP* no Brasil, comparando práticas internacionais e propondo modelo adaptado às condições nacionais.

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi estruturada em cinco etapas:

(i) Revisão bibliográfica: artigos científicos, relatórios técnicos e normas nacionais e internacionais;
(ii) Análise documental: avaliação de normas brasileiras (DNIT, ABNT) e internacionais (*FHWA, RStO*);
(iii) Levantamento de dados operacionais: diagnóstico de usinas e concessionárias;
(iv) *Benchmarking* internacional: comparação com práticas dos Estados Unidos e Alemanha;
(v) Proposição de modelo logístico: adaptação de ciclos internacionais para a realidade brasileira.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Diagnóstico do Brasil

O reaproveitamento do *RAP* no Brasil é limitado e pouco sistematizado. Falta política pública nacional, diretrizes técnicas e banco de dados público. Obstáculos principais incluem:

(i) ausência de regulamentação e incentivos (Lopes et al., 2024);
(ii) resistência de usinas, associando *RAP* a instabilidade mecânica (Tsakoumaki & Plati, 2024);
(iii) carência de equipamentos adequados (Mascarenhas & Piao, 2022);
(iv) problemas logísticos estruturais, com grandes distâncias e altos custos de transporte (Rocha, 2020).

3.2 Práticas internacionais

EUA reaproveitam >94% do *RAP* com rastreabilidade, transporte médio de 53 km e 272 usinas preparadas (FHWA, 2021). Alemanha utiliza até 100% em bases com controle rigoroso. Destaques: estocagem padronizada, documentação obrigatória, uso de rejuvenescedores e aplicação de *Balanced Mix Design (BMD)*.

3.3 Comparativo Brasil × EUA

Tabela 1: Comparativo utilização RAP – EUA X Brasil

Aspecto	EUA (NAPA)	Brasil (Atual)
Uso de RAP	Mais de 94% de reaproveitamento anual (2019), com metas claras e rastreamento nacional	Uso pontual, sem metas nem controle centralizado
Política pública	Políticas de incentivo fiscal, normas AASHTO/ASTM e exigência de relatórios anuais	Ausência de regulamentação federal específica ou incentivos
Logística	Presença de centros regionais de coleta, processamento e estocagem	Infraestrutura dependente de canteiros ou usinas locais, com alta variabilidade
Controle de qualidade	Projetos com Balanced Mix Design (BMD), ensaios de fadiga, deformação e rastreabilidade	Práticas ainda restritas a poucos projetos e sem exigência de desempenho real
Tecnologias adotadas	Rejuvenescedores e usinas com silos dedicados ao RAP, possibilitando teores >30%	Uso eventual de rejuvenescedores e pouca padronização nas usinas brasileiras

4. APERFEIÇOANDO A LOGÍSTICA DO RAP NO BRASIL

A eficiência na logística reversa do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) depende diretamente do planejamento integrado entre etapas operacionais, critérios técnicos e estratégias adotadas em campo. Em países como os Estados Unidos, a estruturação do reaproveitamento do RAP segue diretrizes específicas que otimizam desde a coleta até a reintegração do material nas novas misturas asfálticas (FHWA, 2021; NAPA, 2020). Inspirado nessas experiências, o presente trabalho propõe um ciclo logístico adaptado à realidade brasileira, iniciado pela coleta e fresagem dos pavimentos e seguido por quatro ações estratégicas, ilustradas na Figura 1:



Figura 1: Ciclo de logística reversa do RAP com base em lições internacionais

4.1 Coleta e fresagem dos pavimentos: o que fazer?

i. **Estimar a distância da obra até a usina de asfalto:** Antes do início das operações de fresagem, é fundamental calcular a distância média entre o local da obra e a usina de beneficiamento do RAP. Esse dado permite planejar a logística de transporte, prever o custo operacional e avaliar a viabilidade do reaproveitamento. Segundo estudos norte-americanos, distâncias superiores a 80 km tendem a inviabilizar economicamente o uso do RAP não tratado (Zaumanis & Mallick, 2015).

ii. **Verificar intervenções anteriores no pavimento:** A consulta aos registros de manutenção permite identificar se o segmento já recebeu algum tipo de intervenção significativa. A existência de projetos de dosagem anteriores, bem como o tipo de ligante utilizado, pode fornecer informações relevantes sobre a qualidade esperada do RAP e o potencial de reaproveitamento. Nos EUA, essa prática é comum por meio de sistemas digitais de rastreabilidade (FHWA, 2021).

iii. **Identificar quais caminhões serão coletados para reaproveitamento:** Nem todo material fresado apresenta condições adequadas para reuso. Por isso, é necessário definir quais caminhões transportarão o RAP elegível para reincorporação. Essa triagem deve levar em conta fatores como presença de contaminação superficial, sinais de bombeamento de finos, manchas de óleo ou outros elementos que comprometam a qualidade do material.

iv. **Avaliar as características iniciais do RAP coletado:** Logo após a fresagem, é recomendável realizar uma avaliação visual e granulométrica preliminar do RAP. Devem ser observadas a homogeneidade do material, a distribuição das partículas, o teor de finos aderidos e a presença de agregados graúdos soltos. Esses elementos ajudam a definir se será necessário peneiramento, secagem, mistura com RAP mais nobre ou adição de rejuvenescedores antes da reutilização.

4.2 Transporte até o local de estocagem ou usina: como otimizar?

i. **Definir rotas otimizadas entre o local de fresagem e a usina de asfalto:** A escolha das rotas deve considerar não apenas a distância geográfica, mas também as condições operacionais das vias, o tráfego local e a capacidade de carga. O uso de ferramentas de georreferenciamento e logística integrada pode reduzir o tempo de deslocamento e os custos com combustível e manutenção da frota (Plati & Loizos, 2012).

ii. **Minimizar o tempo de transporte e descarga:** O tempo de transporte influencia diretamente na qualidade do material fresado, especialmente em regiões de clima úmido, onde há risco de aumento da umidade e contaminação superficial. Operações mais ágeis evitam a degradação do RAP e melhoram o fluxo de recebimento nas usinas.

iii. **Evitar o uso de caçambas contaminadas ou inadequadas:** A utilização de caçambas com resíduos de outros materiais (solo,antiaderentes, óleo, etc.) compromete a qualidade do RAP. Portanto, é necessário definir procedimentos de limpeza prévia, inspeção visual e, se possível, utilização de caçambas dedicadas ao transporte do fresado, seguindo as práticas utilizadas nos Estados Unidos (FHWA, 2021).

iv. **Utilizar caminhões de maior capacidade e eficiência:** A renovação da frota com caminhões de maior volume útil e menor consumo energético é uma tendência nas práticas sustentáveis. Em estados norte-americanos, há incentivo ao uso de veículos elétricos ou híbridos em rotas fixas entre obras e centros de estocagem (NAPA, 2020).

v. **Criar centros intermediários de estocagem e beneficiamento de RAP:** Em áreas com grande volume de obras ou em regiões com baixa capilaridade de usinas, recomenda-se a implantação de polos regionais de estocagem e triagem de RAP. Essa estratégia reduz a distância média de transporte, viabiliza a separação por granulometria ou tipo de mistura original e permite o planejamento prévio da dosagem (Tsakoumaki & Plati, 2024). Esses centros podem funcionar como hubs logísticos, conectando múltiplos trechos de obras a uma ou mais usinas de destino.

4.3 Estocagem e manuseio: como fazer?

i. **Formar pilhas sobre base pavimentada e drenada:** As pilhas de RAP devem ser posicionadas sobre superfícies com pavimentação rígida e sistemas de drenagem que evitem o acúmulo de água de chuva ou infiltrações. Isso reduz o aumento de umidade e a contaminação por materiais do solo. Normas técnicas internacionais, como a ASTM D6473, indicam que a base deve ser impermeável e inclinada para escoamento eficiente.

ii. **Identificar cada pilha com origem, tipo de mistura e data de recebimento:** A rastreabilidade é essencial. Cada lote de RAP deve estar identificado com informações mínimas: origem (trecho de pavimento), tipo de camada (CBUQ, binder, base), data de fresagem e, se possível, tipo de ligante utilizado originalmente. Esse controle facilita a seleção adequada de materiais na fase de dosagem (NAPA, 2020).

iii. **Evitar compactação e empilhamento excessivo (altura máxima de 6 m):** O empilhamento acima de 6 metros pode levar à compactação interna do material, dificultando o manuseio posterior, a homogeneização e o controle de umidade. A FHWA recomenda altura máxima de 5 a 6 metros, com pilhas ventiladas e protegidas lateralmente em ambientes chuvosos (FHWA, 2021).

iv. **Realizar amostragem periódica e controle da umidade e variabilidade:** Durante a estocagem, é necessário monitorar periodicamente a umidade, a granulometria, o teor de finos e, quando aplicável,

o ligante residual. Essa caracterização permite ajustes no momento da dosagem e favorece o uso mais técnico do RAP, evitando misturas instáveis ou com desempenho inferior (Tsakoumaki & Plati, 2024).

4.4 Reaplicação em novas misturas asfálticas: o que fazer?

i. **Realizar a caracterização completa do RAP:** Antes da dosagem, o RAP deve ser submetido a ensaios de caracterização física, química e mecânica. Os principais parâmetros a serem avaliados incluem: (a) Granulometria dos agregados (extraídos do RAP); (b) Teor de ligante residual; (c) Características do ligante do RAP (medido por DSR, BBR ou viscosidade); (d) Contaminações ou presença de materiais indesejados. Esse diagnóstico permite ajustar a dosagem e identificar a necessidade de correções ou tratamentos adicionais (Zaumanis & Mallick, 2015; Lopes et al., 2024).

ii. **Avaliar a compatibilidade dos ligantes:** A compatibilidade entre o ligante envelhecido presente no RAP e o CAP virgem a ser utilizado na nova mistura deve ser analisada. Essa análise evita reações indesejadas, segregação de fases ou perda de desempenho mecânico. Alguns estados norte-americanos utilizam ensaios reológicos e químico-físicos para ajustar o blend (FHWA, 2021).

iii. **Aplicar rejuvenescedores quando necessário:** Quando o ligante do RAP apresenta alto nível de envelhecimento (alto módulo ou baixa ductilidade), é possível incorporar rejuvenescedores – aditivos que restauram parcialmente as propriedades reológicas do asfalto oxidado. A escolha do rejuvenescedor deve considerar: (a) Compatibilidade química com o ligante envelhecido e com o CAP virgem; (b) Efeitos no desempenho a longo prazo (fadiga, trincamento térmico e deformações permanentes). Estudos mostram que, com o uso adequado de rejuvenescedores, é possível incorporar até 40–50% de RAP sem comprometer o desempenho (Tsakoumaki & Plati, 2024).

iv. **Utilizar metodologias de dosagem por desempenho:** A dosagem baseada apenas em volumetria, como na Marshall ou Superpave tradicional, pode ser insuficiente para garantir o desempenho de misturas com altos teores de RAP. Por isso, recomenda-se aplicar o conceito de Balanced Mix Design (BMD), que combina: (a) Ensaios de resistência à fadiga; (b) Avaliações de deformação permanente (trilho de roda); (c) Verificações volumétricas (vazios, VMA, etc.). Esse modelo permite equilibrar resistência e durabilidade, mesmo com elevados níveis de RAP (NAPA, 2020; FHWA, 2021).

5. CONCLUSÃO

O Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) é uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para a pavimentação rodoviária, mas seu uso requer rigor técnico. A simples reutilização do material fresado, sem controle de qualidade, pode comprometer o desempenho das misturas. No Brasil, além da ausência de regulamentação e políticas públicas, há o risco de que o uso do RAP seja adotado de forma simbólica, sem avaliação de ciclo de vida ou impacto ambiental — configurando práticas de greenwashing. Enquanto países como Estados Unidos e Alemanha já reaproveitam mais de 94% do RAP com rastreabilidade e apoio normativo, o Brasil ainda enfrenta barreiras técnicas, logísticas e institucionais. Para viabilizar seu uso em larga escala, é necessário estruturar a logística reversa, adotar metodologias como o Balanced Mix Design (BMD) e promover uma articulação entre governo, indústria e academia. O sucesso do RAP no país depende de ações integradas e compromisso com desempenho, sustentabilidade e eficiência operacional.

A adoção de um modelo logístico integrado, aliado a incentivos regulatórios e mecanismos de rastreabilidade, é fundamental para transformar o potencial do RAP em prática consolidada no Brasil. Além de reduzir a pegada de carbono, tais medidas fortalecem políticas de economia circular e alinham o setor rodoviário às metas ambientais globais. Nesse sentido, este estudo não apenas diagnostica desafios, mas também oferece subsídios técnicos para a formulação de diretrizes públicas e privadas voltadas ao uso sustentável do RAP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

B., B. L.; L. M. G. Motta e J. A. P. C. Soares (2022) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: IBP.

Q., A.; I. L. Al-Qadi; H. O. Yang e R. (2014) Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Construction and Building Materials*, v. 66, p. 662–668. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.021.

FHWA – Federal Highway Administration (2021) *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. U.S. Department of Transportation.

Langer, J. L.; M. R. M. H. Pasindu e H. R. (2023) A review on the performance of recycled asphalt mixtures in flexible pavements. *Infrastructures*, v. 8, n. 1, p. 10. DOI: 10.3390/infrastructures8010010.

Lopes, F. A.; G. A. S. Meirelles e L. (2024) *Geração e utilização do RAP no Brasil: diagnóstico e oportunidades*.

Mascarenhas, M. e M. Z. G. Piao (2022) *Comparative Environmental Analysis of Pavement Structures with Recycled*

Asphalt Mixtures Produced in Brazil and in Switzerland. SSRN.

NAPA – National Asphalt Pavement Association (2020) *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019*.

Loizos, P. C. e T. M. Plati (2012) Reclaimed asphalt pavement logistics: Best practices and challenges. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 48, p. 1477–1486. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1137.

Valente, S. R.; L. L. B. B. Motta e R. S. (2019) Hot recycled asphalt mixtures with the incorporation of milled material. *Revista Matéria*, v. 24, n. 1.

Tsakoumaki, K. e T. M. Plati (2024) A critical overview of using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in pavement construction: challenges, benefits, and prospects. *Infrastructures*, v. 9, n. 8, p. 128. DOI: 10.3390/infrastructures9080128.

Rocha, M. F. (2020) *Aplicabilidade do material fresado (RAP) para o planejamento logístico de pavimentação asfáltica: estudo de caso em rodovia concessionada*. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Williams, B. A.; J. R. W. Shacat e J. (2020) *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2019*. National Asphalt Pavement Association.

Mallick, R. B. e Z. M. (2015) Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 16, n. 1, p. 39–55. DOI: 10.1080/10298436.2014.893331.

Yang, Y.; D. G. Peterson e D. (2021) Recycled Asphalt Pavement Materials in Transport Pavement Infrastructure: Sustainability Analysis & Metrics. *Sustainability*, v. 13, n. 14, p. 8071. DOI: 10.3390/su13148071.

Alan Marcos Ribeiro de Morais (alanmarcos.morais@arteris.com.br)
1 Escola de Engenharia de São Carlos/USP, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos - SP, Brasil

Renato da Silva Lima (rslima@unifei.edu.br)
2 Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Av. BPS, 1303, Itajubá - MG, Brasil

Materiais Alternativos

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM ÓLEO DE PALMA COMO AGENTE REJUVENESCEDOR

Vitória Vicente Coltri[1], **Liseane Padilha Thives**[1], **Lélio Antônio Teixeira Brito**[2]
[1]Universidade Federal de Santa Catarina
[2]Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO
O uso de óleos vegetais como rejuvenescedores do asfalto envelhecido do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) representa uma alternativa sustentável que contribui para a preservação de recursos naturais e a redução dos impactos ambientais. No entanto, existe uma lacuna na literatura quanto à avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas rejuvenescidas com óleos vegetais, especialmente com óleo de palma. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é analisar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente utilizando óleo de palma como agente rejuvenescedor. A metodologia adotada compreende a caracterização dos materiais, a dosagem, a produção das misturas asfálticas e a avaliação de seu desempenho mecânico por meio dos ensaios de IDEAL-CT, módulo dinâmico, resistência à deformação permanente e à fadiga, além da simulação da estrutura do pavimento no FlexPAVE™. Com isso, busca-se contribuir para a utilização de misturas recicladas rejuvenescidas com óleos de fonte renovável na pavimentação.

1. INTRODUÇÃO

A construção e a manutenção de rodovias geram impactos significativos sobre os recursos naturais e representam um desafio para o desenvolvimento sustentável, que busca equilibrar as necessidades ambientais, econômicas e sociais (FHWA, 2022). Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas (ONU) apresentou a Agenda 2030, que estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem alcançados por países membros (ONU, 2015a). O setor de transportes está direta e indiretamente relacionado ao cumprimento desses objetivos, tornando-se, assim, fundamental nesse processo (ONU, 2015b).

Diante disso, a construção de pavimentos sustentáveis e reciclados, que visam reduzir o impacto ambiental, surge como uma alternativa à preservação dos recursos naturais e ao desenvolvimento sustentável (Bonfim, 2021). Uma das principais técnicas adotadas para esse fim é o uso do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) na produção de novas misturas asfálticas. Contudo, o RAP contém asfalto envelhecido devido ao tempo de serviço e às intempéries, o que altera suas propriedades físicas, químicas e reológicas (NCAT, 2018). Para restaurar essas propriedades e possibilitar o aumento do percentual de RAP incorporado à mistura, têm sido utilizados agentes rejuvenescedores comercias, óleos vegetais ou modificados (Kaseer *et al*., 2019), como o óleo de palma (Rabelo, 2023).

O óleo de palma ou azeite de dendê, é extraído da palmeira *Elaeis guineensis*, ou palma de óleo, nativa do continente africano (Brasil, 2018). O óleo vegetal de palma é o considerado o tipo mais produzido e consumido no mundo. O Brasil ocupa a oitava posição entre os maiores produtores (USDA, 2025) e ainda, a produtividade deste óleo é superior comparativamente a outras culturas, sendo de aproximadamente 4,2 t/ha, enquanto a do óleo de soja é de 0,4 t/ha (Dey *et al*., 2021).

No Brasil, Rabelo (2023) utilizou o óleo de palma no rejuvenescimento de um asfalto convencional CAP 50/70 envelhecido em laboratório. Com base nos parâmetros reológicos, concluiu que, para aquele material, um teor mínimo de 4,3% de óleo é necessário para reverter integralmente os efeitos do envelhecimento sobre o comportamento à fadiga do asfalto. Esse valor também se mostrou adequado para manter um bom desempenho em relação à deformação permanente. Desse modo, esse será o teor adotado nesta pesquisa.

Embora os óleos vegetais tenham demonstrado resultados satisfatórios como agentes rejuvenescedores, a maioria das pesquisas desenvolvidas concentrou-se na avaliação das propriedades físicas e reológicas do rejuvenescimento em nível de asfalto, sendo ainda incipientes os estudos sobre sua aplicação em misturas asfálticas recicladas. Além disso, em relação ao óleo de palma, apesar de sua crescente produção e disponibilidade no Brasil, seu uso em misturas asfálticas recicladas ainda não foi abordado na literatura nacional.

Nesse contexto, a pesquisa em desenvolvimento tem como objetivo analisar o desempenho mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente utilizando óleo de palma como agente rejuvenescedor. Espera-se

contribuir para a ampliação do uso de misturas recicladas e rejuvenescidas com óleos de fonte renovável, bem como para o desenvolvimento de soluções alinhadas aos princípios da sustentabilidade na pavimentação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, serão utilizados agregados minerais virgens, asfalto virgem (CAP 50/70), *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), óleo de palma (OP) e aditivo asfáltico de reciclagem comercial tipo AR-5. O procedimento experimental adotado consiste em cinco etapas. Na Etapa 1 foi realizada a caracterização física dos materiais utilizados. A Etapa 2 compreende a dosagem das misturas asfálticas. Inicialmente, será realizada a determinação da disponibilidade do asfalto presente no RAP, por meio do método *Availability Adjusted Mix Design* (AAMD) (Mocelin, 2023), e a estimativa da ativação desse asfalto, conforme o método proposto por Pires (2018). Com base nesses resultados, será realizada a dosagem SUPERPAVE das misturas. Os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas recicladas serão estabelecidos conforme o método AAMD.

A Etapa 3 consiste na produção e moldagem dos corpos de prova das misturas asfálticas para os ensaios de desempenho mecânico. Serão produzidos seis tipos de misturas, sendo duas de referência: uma convencional e outra reciclada com 20% de RAP. As misturas rejuvenescidas com óleo de palma serão formuladas com 20% e 25% de RAP, em combinação com 4,3% de óleo de palma. Optou-se, neste estudo, por avaliar as misturas rejuvenescidas com o AR-5, utilizando o teor indicado pelo fabricante, com 20% e 25% de RAP.

Na Etapa 4, será avaliado o desempenho mecânico das misturas asfálticas por meio de diferentes ensaios. O potencial de trincamento será analisado pelo ensaio *Indirect Tensile Asphalt Cracking Test* (IDEAL-CT) (ASTM D8225). Serão determinados o módulo dinâmico (DNIT 416/2019), a resistência à deformação permanente pelo ensaio *Stress Sweep Rutting* (SSR) (AASHTO TP 134) e a resistência à fadiga por meio do ensaio de tração direta uniaxial cíclica (AASHTO TP 107). A Etapa 5 corresponde à simulação e à previsão do desempenho das misturas asfálticas investigadas, quando aplicadas como camada de revestimento em uma estrutura de pavimento, utilizando o *software* FlexPAVE™. O fluxograma da pesquisa está apresentado na Figura 1.

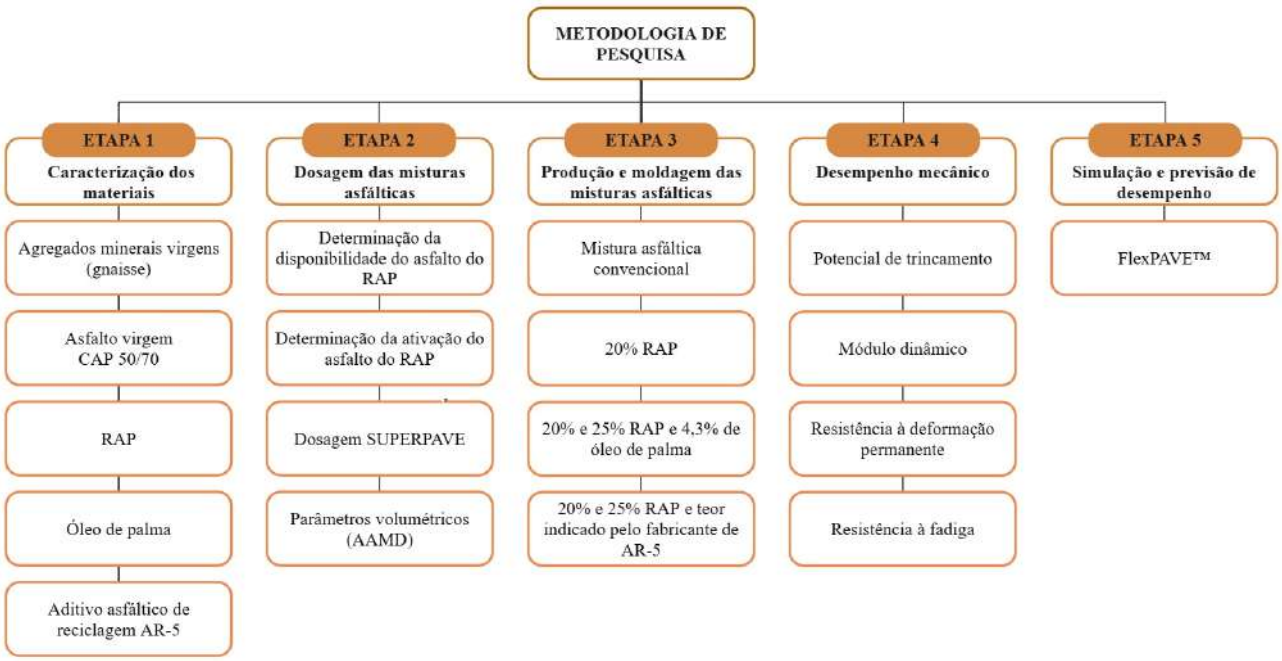


Figura 1: Fluxograma das etapas de pesquisa

3. RESULTADOS PRELIMINARES E ESPERADOS

Os ensaios da Etapa 1 da pesquisa foram concluídos, e a análise dos resultados obtidos indica a viabilidade de utilização dos materiais selecionados. Além disso, a partir deste trabalho, espera-se que:

- A adição do óleo de palma a uma mistura reciclada proporcione um melhor desempenho mecânico em termos de rigidez, resistência à deformação permanente e à fadiga;
- O desempenho mecânico das misturas recicladas e rejuvenescidas com óleo de palma seja comparável ao de uma mistura reciclada com um agente rejuvenescedor comercial, podendo até alcançar um comportamento similar ao da mistura virgem;
- O uso de óleo de palma como agente rejuvenescedor permita o aumento dos teores de RAP, mantendo um desempenho mecânico satisfatório;
- O uso de RAP e do óleo de palma em uma mesma mistura asfáltica contribua para a reutilização de materiais asfálticos e para a substituição de insumos de origem fóssil por materiais provenientes de fontes renováveis, como o óleo vegetal;
- A dissertação contribua para o desenvolvimento de soluções alinhadas com os princípios da economia circular e se torne uma ferramenta no avanço para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Agradecimentos
Esta pesquisa foi realizada com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bonfim, V. (2021) *Pavimento Sustentável* (1ª. ed.). São Paulo: Exceção.

BRASIL (2018) Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341050524_Diagnostico_da_producao_sustentavel_da_palma_de_oleo_Brazilian_Oil_Palm_Sustainable_production_Diagnosis (acesso em 02/07/2025).

Dey, S. *et al*. (2021) A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. *Journal of Cleaner Production*, v.286, p.124981. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124981.

FHWA (2022) Pavement Sustainability Basics. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/start-here (acesso em 02/07/2025).

Kaseer, F. *et al*. (2019) Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction and Building Materials*, v. 211, p. 974-987. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286.

Mocelin, D. M. (2023) *Understanding and Addressing the Role of RAP and RAS in Asphalt Mixture Design and Performance*. Tese (doutorado) North Carolina State University, NCSU. Disponível em: https://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.20/41169 (acesso em 03/07/2025).

NCAT (2018) Aging: Avoiding the inevitable. Disponível em: https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/newsroom/2018-spring/aging.html (acesso em 02/07/2025).

ONU (2015a) Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf (acesso em 01/07/2025).

ONU (2015b) Analysis of the transport relevance of each of the 17 SDGs. Disponível em: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/8656Analysis%20of%20transport%20relevance%20of%20SDGs.pdf (acesso em 01/07/2025).

Pires, G. M. (2018) *A new methodology for the measurement of the reclaimed asphalt degree of binder activation*. Tese (doutorado). Nottingham: University of Nottingham. Nottingham. Inglaterra. Disponível em: https://eprints.nottingham.ac.uk/55470/1/PIRES_GM_DoBA_Thesis_UNOTT.pdf (acesso em 03/07/2025).

Rabelo, R. S. (2023) *Aplicação do óleo de palma como agente rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos*. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/254116 (acesso em 03/07/2025).

USDA (2025) Oilseeds: World Markets and Trade. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf (acesso em 04/07/2025).

Vitória Vicente Coltri (vitoria.coltri@posgrad.ufsc.br)
Liseane Padilha Thives (liseane.thives@ufsc.br)
Lélio Antônio Teixeira Brito (lelio.brito@ufrgs.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte Silva, 205, Córrego Grande, Florianópolis, SC, Brasil)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS, Brasil)

CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARCO)

Queila Lages Teixeira Souza, Junia Nunes de Paula
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC)

RESUMO
A intensificação do processo de urbanização e as mudanças climáticas têm agravado problemas como inundações e descarte inadequado de resíduos da construção civil (RCD), demandando soluções sustentáveis para a infraestrutura urbana. Este estudo visa desenvolver concreto permeável (CP) com diferentes teores de substituição (40%,80% e 100%) de agregado natural por agregado reciclado de concreto (ARCO), oriundo da britagem de blocos intertravados. A pesquisa envolve a caracterização dos materiais, dosagem experimental do concreto e ensaios para avaliação das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Resultados preliminares indicam desempenho compatível com os critérios normativos de resistência e permeabilidade exigidos para aplicações em infraestrutura de transportes. A pesquisa contribui para a gestão sustentável dos RCDs, promovendo práticas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável(ODS), especialmente o ODS 11 e 13, e busca evidenciar o potencial técnico do material para aplicações urbanas de baixo impacto, contribuindo para o desenvolvimento de "cidades esponjas" e economia circular.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As cidades drenantes, ou a concepção de "cidade esponja", vinculada à absorção de água e a capacidade de armazenamento do solo, têm ganhado cada vez mais destaque nos últimos anos (Liu *et al*., 2024). Nesse cenário, tem despontado a adoção de tecnologias que promovam a infiltração de água e a gestão eficiente de águas. O concreto permeável (CP), especialmente quando incorporado com resíduos de construção e demolição (RCD), destaca-se como solução promissora para pavimentação urbana sustentável, por sua capacidade de reduzir o escoamento superficial, melhorar a qualidade das águas pluviais, potencial para recarregar o lençol freático e reduzir o efeito das ilhas de calor urbano (ACI, 2010;Yang *et al*., 2023).

A maior parte da literatura ressalta que o CP convencional (com agregados naturais) já foi amplamente estudado e que seu comportamento mecânico e hidráulico é fortemente influenciado pelas propriedades do agregado (granulometria, porosidade e absorção de água), da relação água/ cimento (a/c), do teor de cimento, da relação cimento/agregado além da energia de compactação (Nazeer *et al*., 2023; Strieder *et al*., 2022).

Estudos indicam que concretos permeáveis com agregados reciclados apresentam desenvolvimento significativo nas propriedades hidráulicas. Em conformidade com a ACI PRC-522-10 (ACI,2010) e a norma NBR 16416 (ABNT, 2015), concretos com ARCO apresentaram coeficiente de permeabilidade superior ao mínimo especificado pelas normas de 0,1 cm/s (Liu *et al*.,2024; Nazeer *et al.,*2023; Strieder *et al.,*2022).

Quanto ao comportamento mecânico, a substituição de agregado natural por ARCO resultou em redução na resistência à flexão. Os estudos apontam que com o aumento do teor de substituição e com o aumento do tamanho máximo dos agregados reciclados, as propriedades físicas e mecânicas do CP com RCD apresentam valores inferiores de compressão, tração, flexão e resistência à abrasão, em comparação com concretos com agregados naturais (Liu *et al*., 2024; Strieder *et al*., 2022). Contudo, os resultados permaneceram dentro das faixas aceitáveis pelas normas, variando entre 1,00 MPa e 3,8 MPa, conforme a ACI PRC-522-10, e atendendo aos limites mínimos estabelecidos pela NBR 16416, que exige 1,00 MPa para pavimentos destinados ao tráfego de pedestres e 2,00 MPa para tráfego leve. As pesquisas atuais sobre CP com ARCO ainda são limitadas, às aplicações em áreas de tráfego leve ou exclusivamente para pedestres, devido às restrições de desempenho do material.

Neste contexto, a pesquisa de Mestrado propõe-se a avaliar o comportamento físico, mecânico e hidráulico do CP fabricado com resíduos de compósitos cimentícios, analisando a influência do ARCO em sua permeabilidade, resistência e durabilidade. Os resíduos utilizados são provenientes de blocos intertravados (*pavers*) descartados no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) campus VIII. Esses resíduos foram processados na usina de RCD ECOVIA, localizada no município de Varginha-MG. Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos 5 objetivos específicos: (i) avaliar o efeito da substituição do agregado natural (NA) por ARCO; (ii) avaliar a influência da granulometria do agregado nas propriedades do CP;(iii) investigar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis fabricados com

ARCO; (iv) comparar os resultados obtidos com os critérios normativos e parâmetros de literatura para CP, visando verificar a viabilidade técnica de uso do ARCO; e (v) verificar para quais aplicações as propriedades mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do concreto permeável fabricado com ARCO são adequadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção do CP com a utilização de ARCO serão utilizados cimento Portland CP V-ARI, agregado reciclado, agregado natural e água. Para a elaboração do CP utilizou-se como base as recomendações da NBR 16416 e sete macroetapas principais foram propostas: (i) caracterização dos agregados (natural e reciclado), (ii) dosagem do concreto permeável, (iii) moldagem dos corpos de prova, (iv) ensaios de resistência, (v) ensaios de permeabilidade, (vi) determinação do índice de vazio e (vii) microscopia eletrônica de varredura (MEV). Serão moldados dois conjuntos de corpos de prova para cada teor de substituição do agregado reciclado de concreto (ARCO): 40% ,80% e 100% , além de dois conjuntos para a mistura de referência com 100% de agregado natural (NA). Cada conjunto corresponde a uma gradação do agregado, definida pelo diâmetro o material (retido na peneira 9,5 mm ou 12,5 mm). Após a obtenção dos resultados, será realizada uma análise para identificar possíveis diferenças estatisticamente significativas entre as propriedades do CP com e sem ARCO.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

De acordo com a NBR 7211 (ABNT,2022), a análise granulométrica é exigida para caracterização e verificação do atendimento aos limites estabelecidos para cada tipo de agregado. Neste estudo, os agregados graúdos utilizados, natural (NA) e reciclado (ARCO), foram previamente classificados e utilizados exclusivamente na faixa granulométrica entre as peneiras #12,5 mm e #9,5 mm. Ou seja, foram utilizadas apenas as frações retidas nessas peneiras. Ressalta-se que a ACI 522 recomenda, para concretos permeáveis, o uso de agregados com granulometria uniforme, ou seja, grãos de mesmo tamanho. Os resultados da caracterização física dos agregados estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados utilizados

Agregado	Massa específica (g/cm³)	Absorção de água (%)	Massa unitária (kg/m³)	Módulo de finura
ARCO	2,22	5,98	1245,78	6,68
NA	2,45	1,61	1362,28	6,22

Os resultados obtidos indicam que os agregados reciclados (ARCO) apresentaram menor densidade, maior absorção de água e menor massa unitária em comparação à brita natural, evidenciando sua maior porosidade. Característica que constitui um dos dificultadores associados ao uso de resíduos na produção do concreto, uma vez que aumenta a perda da água de amassamento do traço para o agregado reciclado (Paula Junior,2019).

Para avaliação preliminar do comportamento do CP com resíduos provenientes de *pavers*, foram moldados corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) das misturas M0 (NA#9,5) e M1 (40%ARCO#9,5) para o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias. Ambos os métodos de compactação e vibração foram utilizados.

Embora, Balbo (2020) afirme que o CP não deve ser adensado por meio de vibração ou por compactação enérgica, o maior valor de resistência à compressão aos 7 dias foi obtido com mesa vibratória na mistura com teor de substituição de 40% de ARCO (6,40 Mpa). Contudo, conforme Cai *et al.(*2020), observou-se que a vibração provocou o afundamento excessivo da pasta de cimento na base dos corpos de prova produzidos com NA (Figura 1a) e com ARCO (Figura 1b). Já os corpos de prova que foram adensados por compactação manual, NA (Figura 1c) e ARCO (Figura 1d), apresentaram comportamento distinto.

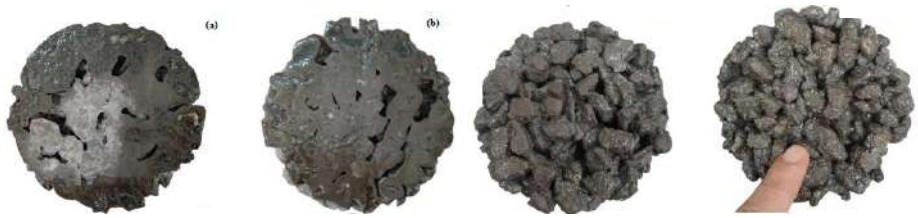


Figura 1: Efeito do adensamento por vibração e compactação na base dos corpos de prova

Observa-se nas Figuras 1a e 1b que a precipitação da pasta para o fundo da camada pode reduzir ou anular a permeabilidade desejada para o concreto permeável. Testes para verificar a permeabilidade do CP, serão executados nas etapas posteriores. Na ruptura dos corpos de prova, diferentemente do concreto convencional com agregados naturais, cuja ruptura ocorre principalmente na zona de interface pasta-agregado, no CP com agregados reciclados a falha se concentrou, em grande parte no próprio agregado, indicando, conforme Costa (2019) pondera, a possibilidade de obtenção de maiores resistências mecânicas com a utilização de um agregado mais resistente. De acordo com Liu *et al.* (2024), a rota de falha no CP com ARCO não revelou uma preferência óbvia por determinadas fases do material. Na Figura 2 são apresentadas as fissuras observadas após a ruptura dos corpos de prova.



Figura 2: Fissuras observadas após a ruptura dos corpos de prova

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2015) Norma NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABNT (2022) Norma NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *Committee 522. ACI 522R-10: Pervious Concrete*. Farmington Hills, Michigan, 40 p. 2010.

Balbo, José Tadeu**.** *Pavimentos de concreto permeáveis : uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente.* São Paulo: Oficina de Textos, 2020. 175 p.

Cai X,Wu, K;Huang ,W;Yu ,J;Yu, H. Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base. *Road Materials and Pavement Design*,vol 22,p.2182-2196,2021. ISSN 21647402. Disponível em: < https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2020.1742193 > Acesso em: 20 Jun. 2024. doi: https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193.

Costa,F.B.P.; Lorenzi, A.; Haselbach,L.; Silva Filho, L.C.P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests.*Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, volume 11, n. 5 ,p. 1151-1159,out.2018.ISSN 1983-4195. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500013 >Acesso em:12 maio 2025.

Liu,W; Zhang,H;Chen,Z; Tao,J;Zhang,X; Zhao,B. Performance of pervious concrete influenced by typical properties of recycled concrete aggregate and suggestions for practical use. *Road Materials and Pavement Design*, vol 25, n. 5, p.1090-1111,2024. ISSN 14680629. Disponível em: < https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2023.2238082> Acesso em: 20 jun. 2024. doi https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2238082.

Paula Junior, Adilson Campos de. *Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis* / Adilson Campos de Paula Junior. -- 2019. 141 f. : il.

Nazeer M; Kapoor K; Singh S. Impact of recycled concrete aggregates on the strength and durability properties of pervious concrete.*Magazine of Concrete Research,* vol 76, p.272-291,2023.ISSN 1751763X. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/374494418_Impact_of_recycled_concrete_aggregates_on_the_strength_and_durability_properties_of_pervious_concrete> Acesso em:20 jun. 2024. doi: 10.1680/jmacr.23.00089.

Strieder, H L et al, Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials,* vol 315,2022.ISSN 09500618. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821031251 > Acesso em:20 jun. 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125384.

Yang, J;Guo, Y;Tam ,V;Tan, J;Shen, A;Zhang, J;Zhang ,C;Lyu, Z. Research on pore-clogging behavior and mechanism in pervious concrete prepared with recycled aggregate. *Construction and Building Materials***,**vol 384,2023. ISSN 09500618.Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823011339 > Acesso em:20 jun. 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131420.

Queila Lages Teixeira Souza (engcivilqueilages@gmail.com), *Junia Nunes de Paula (*juniapaula@cefetmg.br*)*
CEFET-MG Campus II, Departamento de Engenharia Civil, Prédio 18, Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Aspectos Ambientais em Pavimentação

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES MODIFICADOS: ESTUDO DE CASO DA RODOVIA PRESIDENTE DUTRA - CCR

Marcelino Aurélio Vieira da Silva[1], Camilla Espírito Santo Almeida[1], Matheus Neiva Dias[1], Sandra Oda[1], Felipe Costa Dias[1], Luís Miguel Gutierrez Klinsky[2], Jorge Abel Barberan[2], Mariana de Jesus Siqueira[2].

[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Grupo CCR

RESUMO

Este estudo avaliou os impactos ambientais da produção de três misturas asfálticas utilizadas na rodovia Presidente Dutra, com asfalto convencional (MA01), modificado por borracha (MA02) e por polímero (MA03). Foi realizada uma Análise do Ciclo de Vida (ACV), com abordagem "berço ao portão" utilizando como unidade funcional uma tonelada de mistura produzida. Os dados foram processados no *SimaPro* com o método *ReCiPe* 2016, considerando o Potencial de Aquecimento Global (GWP). A mistura MA01 apresentou as menores emissões (42,54 kg CO_2-eq/t), seguida por MA02 (46,40 kg) e MA03 (57,97 kg), sendo a produção do asfalto a principal responsável pelas emissões . Apesar das maiores emissões iniciais, MA02 e MA03 oferecem maior durabilidade, o que pode compensar impactos ao longo do ciclo de vida. A MA02 destacou-se como alternativa mais sustentável entre as modificadas, devido ao uso de borracha reciclada.

1. INTRODUÇÃO

A busca por desenvolvimento sustentável tem impulsionado práticas que reduzem os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos pavimentos, promovendo a reutilização de resíduos e a redução da extração de recursos naturais. Soluções como o uso de asfaltos modificados com borracha de pneus ou polímeros sintéticos em misturas asfálticas, têm mostrado ganhos em desempenho mecânico, embora com possíveis aumentos nos impactos ambientais iniciais (Elnaml *et al.*, 2024).

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para quantificar impactos ambientais desde a extração até a disposição final dos materiais, considerando a produção, transporte, execução, uso e reabilitação (Harvey *et al.*, 2014; Gulotta *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). A ACV permite ponderar os benefícios de durabilidade frente aos custos ambientais. Os resultados da ACV são fortemente influenciados por fatores como matriz energética, tecnologias e disponibilidade regional de insumos, o que reforça a importância de análises locais, como evidenciado por Mascarenhas *et al*. (2023).

Os principais impactos concentram-se na produção do asfalto, dada sua elevada demanda energética (Giani *et al.,* 2015; Oreto *et al.,* 2021; Mascarenhas *et al.,* 2023). A produção dos agregados também gera impactos relevantes, influenciados pela origem, processos de beneficiamento e transporte (Vega A. *et al.*, 2022). A usinagem consome muita energia térmica, dependendo do combustível empregado, enquanto o impacto da construção é devido ao uso de equipamentos e às condições operacionais (Harvey *et al.*, 2014; Santos *et al*., 2018).

Este estudo tem como objetivo comparar os impactos ambientais da produção de misturas asfálticas utilizadas em trechos da rodovia Presidente Dutra, sob concessão da CCR, com asfaltos modificados por borracha e por polímero, a partir de uma ACV com base em dados primários e secundários, oferecendo subsídios técnicos à escolha de soluções mais sustentáveis.

2. MÉTODO

Este estudo de ACV foi conduzido conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009a; 2009b), abrangendo as quatro etapas fundamentais da metodologia: definição de objetivo e escopo, elaboração do inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados obtidos. No estudo, foram avaliadas três misturas asfálticas (MA01, MA02 e MA03), que representam traços reais utilizados pela concessionária responsável. Essas misturas se diferenciam principalmente quanto ao tipo de asfalto empregado (convencional, modificado com borracha e com polímero) e às proporções dos agregados utilizados, conforme Tabela 01.

Tabela 01: Proporções dos materiais

Materiais	Quantidade (%)		
	MA01	MA02	MA03
Brita 1	19,0	38,0	-
Pedrisco	33,4	23,8	63,6
Pó de pedra	41,0	31,9	29,9
Cal	1,9	1,4	1,4
CAP 50-70 (convencional)	4,7	-	-
ECOFLEX B (modificado com borracha)	-	4,9	-
NTAFLEX (modificado com polímero)	-	-	5,1

A unidade funcional adotada foi uma tonelada de mistura asfáltica produzida, assegurando comparabilidade entre as alternativas e foco na fase de produção. A fronteira do sistema considerou a abordagem "berço ao portão", que inclui produção e transporte dos materiais e usinagem da mistura, excluindo aplicação em campo e fim de vida (Figura 01).



Figura 01: Fronteira do sistema

Os dados primários foram obtidos diretamente com a concessionária, enquanto os dados secundários foram extraídos da base de dados *Ecoinvent* 3.11, com abordagem *cut-off*. Para os agregados, utilizaram-se processos correspondentes à produção de brita, pedrisco, pó de pedra e cal, e para os asfaltos (CAP 50-70, *ECOFLEX B* e *NTAFLEX*) foram modelados baseados em equivalentes técnicos do *Ecoinvent*, buscando-se estimar o processo de modificação, desconsiderando-se os impactos da borracha de pneu, uma vez que esse material é resíduo. O transporte foi modelado segundo composições do SICRO-3 para os veículos utilizados, de forma a melhor representar o contexto brasileiro, com distâncias médias específicas para cada material dado a localização do fornecimento dos materiais e das diferentes usinas.

Para a etapa de usinagem, foi considerada uma usina descontínua de produção a quente, com taxa média de 99,6 t/h, considerando o consumo energético de equipamentos à diesel como gerador, carregadeira, tanques e aquecedor de fluido térmico. As energias de usinagem das misturas asfálticas foram calculadas de acordo com a Equação (1), adaptado de Santos *et al*. (2018), esse dado foi utilizado como entrada no Simapro para etapa de fabricação das misturas:

$$E = [M_{AV} \times C_{AV} \times (T_{AV} - T_0) + M_A \times C_A \times (T_A - T_0) + M_{AV} \times W_{AV} \times C_W \times (100 - T_0) + L_V \times M_{AV} \times W_{AV} + M_{AV} \times W_{AV} \times C_{vap} \times (T_U - 100)]/(\eta \times 1000) \quad (1)$$

Onde:

E - Energia para usinagem, em MJ/t;

M_{AV} - Massa de agregado virgem, em kg;

M_A - Massa de asfalto, em kg;
C_{AV} - Calor específico do agregado virgem, em kJ/kg°C;
C_A - Calor específico do asfalto, em kJ/kg°C;
C_W - Calor específico da água a 15°C, em kJ/kg°C;
C_{vap} - Calor específico do vapor de água, em kJ/kg;
T_0 - Temperatura ambiente, em °C;
T_{AV} - Temperatura de usinagem do agregado virgem, em °C;
T_A - Temperatura de usinagem do asfalto, em °C;
T_U - Temperatura de usinagem da mistura, em °C;
W_{AV} - Teor de umidade do agregado virgem, em % de massa de agregado;
L_V - Calor latente de vaporização da água, em kJ/kg
η - Eficiência do equipamento (1 - Perda energética), em %.

A AICV foi conduzida no software *SimaPro* v9.3, utilizando o método *ReCiPe* 2016 *Midpoint* (H) v1.07 e a categoria Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*), expressa em kg CO_2-eq. Essa escolha visa quantificar e comparar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à produção das misturas.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 02 apresenta os resultados da ACV, considerando o GWP, para as três misturas asfálticas estudadas: MA01 (asfalto convencional - CAP 50/70), MA02 (asfalto com borracha - *ECOFLEX B*) e MA03 (asfalto com polímero - *NTAFLEX*).

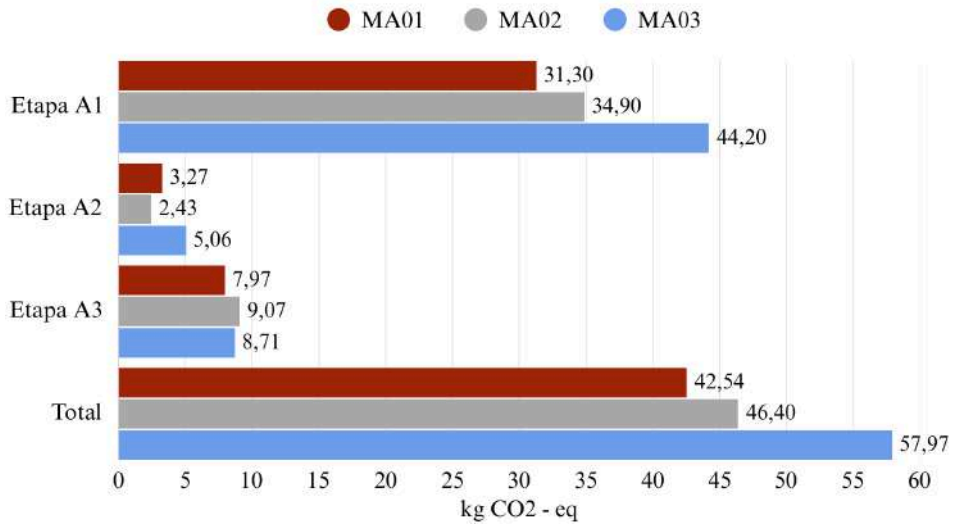


Figura 2: Emissão de GEE por etapa do ciclo de vida.

Os resultados indicaram que a mistura MA01 apresentou a menor emissão total de gases de efeito estufa, com 42,54 kg de CO_2 equivalente por tonelada de mistura produzida. Em seguida, a mistura MA02 registrou 46,40 kg CO_2-eq, enquanto a maior emissão foi observada na MA03, com 57,97 kg CO_2-eq. Esses dados evidenciam a influência do tipo de asfalto utilizado. A etapa de produção dos materiais (Etapa A1) foi a maior responsável pelas emissões em todas as formulações, com destaque para a fabricação dos asfaltos. As emissões associadas à produção dos asfaltos foram de 23,9 kg CO_2-eq para MA01, 27,5 kg CO_2-eq para MA02 e 36,9 kg CO_2-eq para MA03, representando respectivamente 56,2%, 59,3% e 63,6% do total de emissões de cada mistura. Vale ressaltar que os porcentuais de asfalto são diferentes para cada mistura. Na etapa de transporte (Etapa A2), os valores variaram em função da distância entre a origem dos materiais e a

usina, sendo menores para a MA02 (2,43 kg CO_2-eq) e maiores para a MA03 (5,06 kg CO_2-eq). Na etapa de fabricação das misturas (Etapa A3) as emissões foram impactadas pelas diferentes temperaturas e quantidades de materiais que influenciaram as energias de usinagem calculadas, sendo de 187 MJ/t, 212 MJ/t e 210 MJ/t, respectivamente para as misturas MA01, MA02 e MA03.

Apesar das maiores emissões totais observadas para as misturas com asfaltos modificados (MA02 e MA03), ambas apresentam desempenho mecânico superior quando comparadas à mistura convencional (MA01). Essa superioridade técnica pode implicar no aumento da vida útil do pavimento e na redução da frequência de manutenções, o que tende a compensar as emissões iniciais ao longo do ciclo de vida completo do pavimento. No entanto, ao se considerar exclusivamente o aspecto ambiental, a mistura MA02 se mostra mais vantajosa do que a MA03. Isso se deve, ao uso de borracha como modificador do asfalto, classificada como resíduo pós-consumo. Conforme os critérios da base de dados *Ecoinvent* 3.11, sob a abordagem *cut-off*, os impactos ambientais associados à produção da borracha não são atribuídos ao sistema avaliado, o que resulta em um crédito ambiental para a mistura MA02. Já no caso da MA03, a complexidade de fabricação do polímero e os insumos adicionais contribuem para um impacto ambiental mais elevado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o desempenho ambiental de três formulações de misturas asfálticas, MA01 (com asfalto convencional), MA02 (com asfalto modificado por borracha) e MA03 (com asfalto modificado por polímero), com base na ACV, com foco nas emissões de GEE ao longo das etapas de produção de materiais, transporte e usinagem (berço ao portão). Os resultados revelaram que a produção dos asfaltos é a principal fonte de impacto ambiental em todas as misturas, respondendo por mais de 50% das emissões totais. A mistura MA03 apresentou o maior valor de emissões (57,97 kg CO_2-eq/t), seguida por MA02 (46,40 kg CO_2-eq/t) e MA01 (42,54 kg CO_2-eq/t). Esse comportamento é explicado, sobretudo, pela complexidade do processo produtivo dos asfaltos modificados, pelas temperaturas mais elevadas de usinagem, diretamente relacionadas ao tipo de asfalto utilizado, e pelas diferentes distâncias de transporte dos insumos até a usina.

Apesar das maiores emissões nas fases iniciais do ciclo de vida, as misturas modificadas (MA02 e MA03) apresentam vantagens técnicas relevantes, como maior resistência mecânica e maior durabilidade, o que pode reduzir a frequência de intervenções e estender a vida útil do pavimento. Quando analisado sob uma perspectiva de ciclo de vida completo (berço ao túmulo), esse desempenho pode compensar os impactos ambientais iniciais, tornando essas soluções mais sustentáveis no longo prazo. Entre as duas misturas modificadas, destaca-se a MA02 por apresentar menor impacto ambiental em relação à MA03, em parte devido ao uso de borracha proveniente de pneus descartados, um resíduo pós-consumo.

Diante dos achados, observa-se a importância de ampliar futuras investigações para uma ACV completa, incorporando as fases de aplicação, uso, manutenção e fim de vida do pavimento. Essa abordagem permitiria avaliar com maior precisão os reais benefícios das misturas modificadas ao longo de sua vida útil. Além disso, recomenda-se que análises futuras considerem outros impactos ambientais além do GWP, como acidificação, toxicidade e uso de recursos naturais. A avaliação de diferentes cenários logísticos, com foco na origem e transporte dos materiais, e a realização de análises de custo do ciclo de vida (LCCA, do inglês *Life Cycle Cost Analysis*) integradas à ACV também são fundamentais para embasar decisões mais sustentáveis e economicamente viáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2009a) ABNT NBR ISO 14040 Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT (2009b) ABNT NBR ISO 14044 Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

Elnaml, I.; Liu, J.; Mohammad, L.; Dylla, H.; Wasiuddin, N.; Cooper, S.; Cooper, S. (2024) Recycling waste plastics in asphalt mixture: Engineering performance and environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 453, p. 142180. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142180

Giani, M. I.; Dotelli, G.; Brandini, N.; Zampori, L. (2015) Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 104, p. 224-238. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006

Gulotta, T. M.; Mistretta, M.; Praticò, F. G. (2019) A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for

urban roads. *Science of The Total Environment*, v. 673, p. 585–593. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.046

Harvey, J. T.; Meijer, J.; Kendall, A. (2014) *Life Cycle Assessment*. FHWA-HIF-15-001. Federal Highway Administration, Washington, DC. https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/hif15001.pdf

Li, J.; Xiao, F.; Zhang, L.; Amirkhanian, S. N. (2019) Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 233, p. 1182–1206. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061

Mascarenhas, Z. M. G.; Piao, Z.; Vasconcelos, K. L.; Poulikakos, L. D.; Bernucci, L. L. B. (2023) Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. *Science of the Total Environment*, v. 858. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159862

Oreto, C.; Veropalumbo, R.; Viscione, N.; Biancardo, S. A.; Russo, F. (2021) Investigating the environmental impacts and engineering performance of road asphalt pavement mixtures made up of jet grouting waste and reclaimed asphalt pavement. *Environmental Research*, v. 198, p. 111277.https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111277

Santos, J.; Bressi, S.; Cerezo, V.; Lo Presti, D.; Dauvergne, M. (2018) Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. *Resources, Conservation and Recycling,* v. 138, p. 283-297. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.012

Vega A., D. L.; Santos, J.; Martinez-Arguelles, G. (2022) Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 4, p. 923–936. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778694

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DO APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA DE PAVIMENTOS DRENANTES E USO PARA FINS NÃO POTÁVEIS EM EDIFICAÇÕES

Nicole Santini Baratto, **Liseane Padilha Thives**, **Luciana Rohde**, **Hedelvan Emerson Fardin**
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
Neste trabalho foi realizado um estudo de caso para avaliar o potencial de economia de água potável a ser substituída por água de chuva coletada em um pátio de estacionamento com pavimento drenante. A água captada a partir do pavimento drenante tem uso destinado a atividades para fins não potáveis como descarga de bacias sanitárias e mictórios de edificações não residenciais localizadas no entorno do pátio de estacionamento. Foram considerados quatro cenários com diferentes estruturas de pavimentos drenantes numa área de captação estimada de 4.247 m². A espessura da camada de armazenamento temporário de água para atender à chuva de projeto adotada resultou em 30,0 cm. Por meio do programa Netuno 4, avaliou-se o volume necessário do reservatório de armazenamento de água e o potencial de economia de água potável, os quais resultaram em 35.000 litros e 73,0%, respectivamente, comprovando-se a viabilidade de implantação do sistema.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização no Brasil tem apresentado um crescimento acelerado, sendo que entre 2010 e 2022, houve um aumento de 9,2 milhões de pessoas residentes em centros urbanos (IBGE, 2022). A ocupação urbana desordenada provoca impactos no meio ambiente, principalmente aqueles relacionados às modificações do ciclo hidrológico. A urbanização acelerada também tem como consequência a impermeabilização do solo natural e, em conjunto com a inadequada gestão dos recursos hídricos, contribuiu para a escassez de água potável no planeta e alagamentos nas cidades (Humbal *et al*., 2023).

Os pavimentos drenantes estão incluídos no âmbito de técnicas sustentáveis de uso e planejamento do solo e são estruturas compostas por camadas permeáveis constituídas por materiais com elevado volume de vazios interconectados, as quais permitem que a água pluvial se infiltre (Woods Ballard *et al.*, 2015). Considerando a elevada permeabilidade, os pavimentos drenantes contribuem na redução do volume de escoamento superficial e estão inseridos no conceito de "cidades esponjas". Devido à capacidade filtrante, estas estruturas promovem a redução da concentração de poluentes do escoamento superficial e ainda, possibilitam a coleta e armazenamento da água de chuva e posterior uso em atividades para fins não potáveis (Kia *et al*., 2019; Wendling e Holt, 2020; Tziampou *et al.*, 2020; Li *et al*., 2021).

No Brasil, a coleta de água da chuva por telhados para fins não potáveis é uma prática reconhecida e aplicada, porém, a utilização de pavimentos drenantes para essa finalidade ainda não foi amplamente explorada. Ghisi *et al.* (2020) consideraram que diversas atividades consuntivas com uso de água potável (limpeza de pisos, descarga de bacias sanitárias e mictórios e resfriamento de ar-condicionado) podem ser substituídas por água de chuva, uma vez que o padrão de exigência pode ser de não potável. A Lei nº 14.546 (BRASIL, 2023), que estabelece medidas de prevenção a desperdícios, de aproveitamento das águas de chuva e de reuso não potável das águas cinzas, reflete a necessidade crescente de diferentes alternativas sustentáveis.

Em edificações de universidades e não residenciais, autores estimaram os usos finais de consumo de água potável. Botelho (2008) verificou que o consumo de água potável em descargas de bacias sanitárias e mictórios representou 73% do consumo total, enquanto Estrada *et al*. (2021) comprovaram que o consumo total em bacias sanitárias e mictórios (60,3%) e em torneiras destinadas a limpeza de calçadas (1,6%) foi de 61,9%.

A eficiência de infiltração da água de chuva e a capacidade de redução da concentração de poluentes contidos na água de escoamento foram mensuradas e avaliadas por diversos autores, cujas pesquisas comprovaram que a captação de água por meio de pavimentos drenantes e uso em atividades para fins não potáveis é uma alternativa viável. Os principais benefícios atribuídos foram: minimizar a escassez hídrica, aumentar as áreas permeáveis nas cidades, reduzir da sobrecarga nos elementos de drenagem e de alagamentos em eventos de chuva intensa (Hammes *et al.*, 2018; Ghisi *et al*., 2020; Holzer e Poor, 2024).

Nesse contexto, a captação de água para fins não potáveis por meio de pavimentos drenantes surge como uma opção, especialmente em edificações não residenciais, cujo consumo de água potável é mais elevado

considerando as atividades que não demandam padrões de potabilidade.

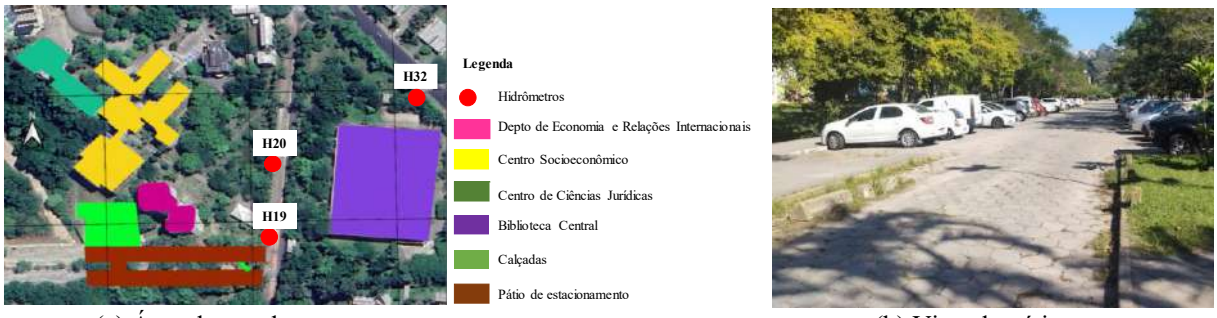
Este trabalho tem o objetivo de avaliar o potencial de economia de água potável em edificações não residenciais a partir da captação de água de chuva de pavimentos drenantes. O estudo de caso foi conduzido em um pátio de estacionamento da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Trindade em Florianópolis (Santa Catarina) e a água captada será utilizada na descarga de bacias sanitárias e mictórios de edificações anexas ao pátio de estacionamento.

2. METODOLOGIA

A metodologia consiste nas seguintes etapas: (i) Levantamento de dados da área de coleta, consumo hídrico das edificações e dados pluviométricos da região; (ii) Estabelecimento de cenários com diferentes estruturas de pavimentos drenantes e cálculo da espessura da camada de armazenamento temporário de água; (iii) Cálculo do volume do reservatório de água e avaliação do potencial de economia de água potável.

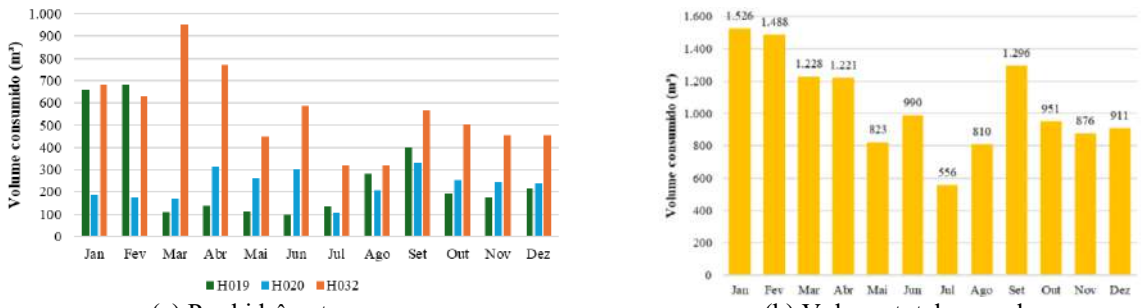
2.1. Área de coleta

A água coletada visa atender conjuntos de edificações anexas ao pátio de estacionamento, cuja rede pública abastece os hidrômetros H019, H020 e H032 (Figura 1a). A edificação abastecida pelo hidrômetro H019 (em rosa – Figura 1 a) é composta por cinco pavimentos, cada andar possui seis banheiros (três femininos e três masculinos), num total de 45 bacias sanitárias e 14 mictórios. Cada edificação alimentada pelo hidrômetro H020 (em amarelo e em verde escuro – Figura 1a) tem três pavimentos, cada andar possui dois banheiros (um feminino e um masculino), com 54 bacias sanitárias e 36 mictórios. A Biblioteca Central (hidrômetro H032) tem dois pavimentos, possui 12 banheiros (três femininos três masculinos por andar), onde estão distribuídos 30 bacias sanitárias e 18 mictórios. O pátio de estacionamento está localizado lateralmente às edificações e é pavimentado com lajotas sextavadas de concreto (Figura 1b). A área de coleta e substituição do pavimento em lajotas por drenante foi estimada a partir das plantas baixas do Campus (DPAE, 2024) e resultou em 4.247 m² e a área das calçadas foram incluídas. Os dados de consumo de água nos hidrômetros foram fornecidos pela Coordenadoria de Gestão Ambiental (CGA, 2024), no período de janeiro a dezembro de 2023 (Figura 2a). A Figura 2b mostra o volume mensal total de água potável consumido nas edificações no período, com média diária de 35,0 m^3. Os dados pluviométricos foram obtidos nos registros da Estação Meteorológica de Florianópolis nº 1006 – CETRE/EPAGRI (EPAGRI, 2024) nos anos de 2005 a 2023 (Figura 3).



(a) Área de estudo (b) Vista do pátio

Figura 1: Área de coleta e pátio existente



(a) Por hidrômetro (b) Volume total mensal

Figura 2: Consumo de água potável de janeiro a dezembro de 2023 (Adaptado de CGA, 2024)

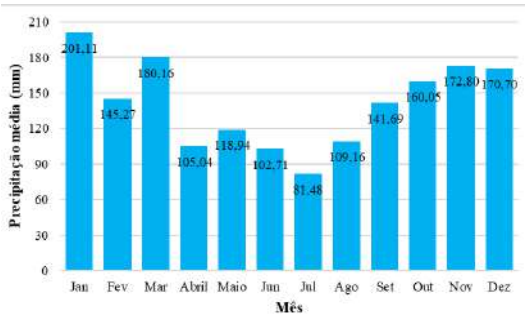


Figura 3: Médias mensais de precipitação entre 2005 e 2023 (adaptado de EPAGRI, 2024)

2.2. Cenários avaliados e cálculo da espessura da camada de reservatório temporário

Na área de coleta foram avaliados quatro cenários com diferentes modelos de estruturas de pavimentos drenantes (Figura 4) estabelecidas por Hammes *et al.* (2018) – modelos A e B, e Ghisi *et al.* (2020) – modelos C e D. Nos modelos de Hammes *et al.* (2018), a camada de revestimento é em concreto asfáltico drenante, enquanto os de Ghisi *et al.* (2020), em blocos intertravados de concreto drenante. A diferença entre os modelos é a presença das camadas filtrante (areia comercial grossa) e de separação (brita com tamanho nominal máximo de 9,5 mm), nos modelos A e C. De acordo com os autores, todos os modelos apresentaram capacidade de redução da concentração de poluentes e elevados coeficientes de infiltração (Figura 4).

Estrutura tipo	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Revestimento	5,0 cm	5,0 cm	6,0 cm	6,0 cm
Regularização	3,0 cm	3,0 cm	6,0 cm	6,0 cm
Filtrante	25,0 cm	-	25,0 cm	-
Separação	4,0 cm	-	4,0 cm	-
Reservatório	5,0 cm	7,0 cm	5,0 cm	7,0 cm
Espessura total	**42,0 cm**	**15,0 cm**	**46,0 cm**	**19,0 cm**
Coeficiente de infiltração	**0,701**	**0,800**	**0,781**	**0,888**

Figura 4: Modelos avaliados nos cenários (Adaptado de Hammes *et al.,* 2018; Ghisi *et al.,* 2020)

A espessura da camada de reservatório para armazenamento temporário da água foi calculada para este estudo considerando a área de coleta e precipitação local da região, conforme Equação 1.

$$h = \frac{t_p(Ri\text{-}q)}{n} \quad (1)$$

Em que: h é a espessura da camada de reservatório (mm); i é a intensidade da chuva de projeto correspondente ao período de retorno e duração (mm/h); t_p é a duração da chuva de projeto (h); R é a razão entre a área drenada e a área do pavimento drenante; q é a condutividade hidráulica do solo do subleito (mm/h); n é o volume de vazios do material componente da camada de reservatório e adotado como 40%.

2.3. Cálculo do volume de reservatório e do potencial de economia de água potável

No estudo, foi utilizado o programa computacional Netuno 4 (Ghisi e Cordova, 2014), cujos dados de entrada são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de entrada do Programa Netuno 4

Variáveis de entrada	Valores
Dados diários de precipitação pluviométrica do local em análise	Dados pluviométricos (Figura 3)
Quantidade de descarte do escoamento inicial	0 mm
Área de captação da água pluvial	4.247 m^3
Demanda diária de água potável total	Figura 2
Percentual da demanda total de água que pode ser substituída	73%
Coeficiente de aproveitamento de água (A/B/C/D)	0,701/0,800/0,781/0,881, respectivamente
Volume máximo do reservatório inferior	100.000 litros
Intervalo entre volumes do reservatório inferior	2.500 litros
Volume do reservatório superior	26.000 litros
Volume de água no reservatório superior abaixo do qual há recalque	10%

O programa Netuno 4 realiza simulações de sistemas de captação de água pluvial em telhados de edificações e estima a economia de água potável para diferentes volumes de reservatório e foi adaptado para aplicação neste estudo. O volume médio diário consumido é de 35,00 m³ (35.000 litros), e o percentual máximo de substituição por água não potável adotado foi de 73% (Botelho, 2008).

3. RESULTADOS

3.1. Espessura da camada de reservatório temporário do pavimento drenante

A espessura da camada de reservatório foi dimensionada para um período de retorno de 10 anos e a chuva de projeto foi de 60 minutos, que corresponde à intensidade de 102,65 mm/h. Para a precipitação incidente de 102,65 mm sobre a área drenada de 4.247 m², correspondeu a 435,97 m³ de água de chuva em 24 horas. A área drenada efetiva, ou seja, aquela coberta pelo pavimento drenante, foi aproximadamente 3.600 m², resultando na vazão de saída específica de 5,05 mm/h. A razão entre a área drenada total (4.247 m²) e a área drenada efetiva (3.600 m²) resultou em 1,18. Assim, a espessura da camada de reservatório, estabelecida pela Equação (1), resultou em 290,14 mm, para a qual foi adotado o valor de 300 mm (30,0 cm). Esta foi a espessura da camada de reservatório de armazenamento temporário considerada nos quatro cenários avaliados (Figura 4).

3.2. Volume de reservatório e do potencial de economia de água potável

Os resultados das simulações realizadas no programa Netuno 4, considerando os quatro cenários e volume de reservatório de até 40.000 litros, são apresentados na Tabela 2. Pode-se observar que os resultados foram similares devido ao volume de água extravasado, calculado nas simulações. Como exemplo, no cenário A, volume de reservatório de 5.000 litros, o volume consumido de água seria de 10.59,07 litros/dia e o volume extravasado de 12.960,06 litros/dia, indicando que, para atender as edificações, a área de coleta poderia ser menor tendo em conta a elevada pluviosidade da região.

Tabela 2: Resultados das simulações – Programa Netuno 4

Volume do reservatório (L)	Potencial de economia de água potável (%)				Diferença entre os cenários (%)			
	Cenário A	Cenário C	Cenário D	Cenário D	A e B	C e D	A e C	B e D
5.000	65,4	65,8	51,6	51,6	0,54	0,44	1,56	1,46
10.000	70,7	70,8	70,8	71,0	0,07	0,21	0,15	0,28
15.000	72,0	72,1	72,0	72,1	0,20	0,17	0,01	-0,02
20.000	72,6	72,6	72,6	72,6	-0,02	-0,03	0,02	0,02
25.000	72,7	72,6	72,6	72,9	-0,11	0,34	-0,11	0,34
30.000	72,8	72,8	72,9	72,9	-0,02	0,03	0,10	0,16
35.000	72,9	73,0	73,0	73,0	0,02	0	0,023	0
40.000	73,0	73,0	73,0	73,0	0	0	0	0

A diferença percentual entre os Cenários A e B e Cenários C e D indicou ainda que a presença da camada filtrante não influenciou significativamente no potencial de economia de água potável mesmo com capacidade de infiltração diferente, nos modelos com revestimento em concreto asfáltico drenante e em blocos intertravados de concreto drenante. Considerando o uso da água coletada para fins não potáveis é recomendado a presença da filtrante que contribui na redução da concentração de poluentes. Neste estudo, indica-se o uso da estrutura do pavimento do modelo C, com camada de reservatório de armazenamento temporário de água com espessura de 30,0 cm e reservatório com volume de 35.000 litros, resultando para o sistema, um potencial de economia de água potável de 73,0%. Considerou-se ainda que a capacidade de infiltração do modelo pode contribuir para a redução dos alagamentos que frequentemente ocorrem no pátio de estacionamento durante eventos de precipitação. Assim como ocorre na água coletada de telhados, é necessário o controle dos poluentes e uso de processos de desinfecção como cloração. O estudo apresenta limitações, sendo necessária a implantação em campo para confirmação dos dados mensurados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo visou a substituição da água potável nas edificações não residenciais destinada a descarga em bacias sanitárias e mictórios pela água de chuva coletada em uma área de um pátio de estacionamento com pavimento drenante. Foram analisados modelos de estruturas de pavimentos drenantes e calculada a espessura da camada de reservatório temporária de água do pavimento requerida e que resultou em 30,0 cm. No sistema, a água coletada no pavimento drenante deve ser armazenada em um reservatório permanente, o qual foi dimensionado

por meio de simulações no programa computacional Netuno 4 que também avalia o potencial de economia de água potável. Como resultado e uso da estrutura do pavimento do modelo C foi considerada a necessidade de um reservatório permanente com volume de 35.000 litros. Caso implantado, o sistema resultaria num potencial de economia de água potável de 73,0%. Não foram calculados neste estudo os volumes dos reservatórios superiores das edificações.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Botelho, A. N. (2008) Estimativa dos usos finais de água potável na Universidade Federal de Santa Catarina. Relatório de iniciação cientifica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BRASIL (2023) Lei nº 14.546, de 04 de abril de 2023. Brasília: Presidência da república, Casa Civil, Secretaria Especial para assuntos Jurídicos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/l14546.htm

CGA (2023) Mapa de setores, subsetores, redes de abastecimento de água, hidrômetros e reservatórios da UFSC. Florianópolis: Coordenadoria de Gestão Ambiental. Disponível em: https://ufscsustentavel.ufsc.br/mapas-e-cadastros/

DPAE (2024) Mapas do Campus. Florianópolis: Departamento de Arquitetura e Engenharia – UFSC. Disponível em: https://dpae.ufsc.br/mapas/

EPAGRI (2024) Dados meteorológicos. Florianópolis: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural De Santa Catarina. Disponível em: https://ciram.epagri.sc.gov.br/

Estrada, A. V.; A. Kalbusch e E. Henning (2021) Usos finais de água em um edifício de um Campus Universitário. Anais do XIV Simpósio Nacional de Sistemas Prediais (SISPRED): Gestão, Eficiência e Sustentabilidade. Porto Alegre: ANTAC. https://doi.org/10.46421/sispred.v2i.1069

Ghisi, E. e M. M. Cordova (2014) Netuno 4. Programa computacional. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/743

Ghisi, E.; T. Belotto e L. P. Thives (2020) The use of permeable interlocking concrete pavement to filter stormwater for non-potable uses in buildings. *Water*, n.12, v. 2045. https://doi.org/10.3390/w12072045

Hammes, G.; L. P. Thives; E. Ghisi (2018) Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. *Journal of Environmental Management*, v. 222, p. 338–347. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.094

Holzer, K. e C. Poor (2024) Reduction of runoff pollutants from major arterial roads using porous pavement. *Sustainability*, v. 16, 7506. https://doi.org/10.3390/su16177506

Humbal, A., N. Chaudhary e B. Pathak (2023) Urbanization trends, climate change, and environmental sustainability. In: Pathak, B., Dubey, R.S. (eds) Climate Change and Urban Environment Sustainability. Disaster Resilience and Green Growth. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6_9

IBGE (2022) Censo 2022. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama .

Kia, A.; H. S. Wong; C. R. Cheeseman (2019) High-strength clogging resistant permeable pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 3, p. 271–282. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1600693

Li, Z.; Y. Cao; J. Zhang e W. Liu (2021) Urban rainfall characteristics and permeable pavement structure optimization for sponge road in North China. *Water Science & Technology*, v. 83, n. 8, p.1932-1945. https://doi.org/10.2166/wst.2021.091

Tziampou, N.; S. J. Coupe; L. A. Sañudo-Fontaneda; A. P. Newman e D. Castro-Fresno (2020) Fluid transport within permeable pavement systems: a review of evaporation processes, moisture loss measurement and the current state of knowledge. *Construction and Building Materials*, v. 243, 118179. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118179

Wendling, L.A. e E. E. Holt (2020) Integrating engineered and nature-based solutions for urban stormwater management. In: O'Bannon, D. (eds) Women in Water Quality. Women in Engineering and Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17819-2_2

Woods Ballard, B.; S. Wilson; H. Udale-Clarke; S. Illman; T. Scott; R. Ashley e R. Kellagher (2015) The SuDS Manual. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). Disponível em: https://www.ciria.org/CIRIA/CIRIA/Item_Detail.aspx?iProductCode=C753

Nicole Santini Baratto (nicole.santini@grad.ufsc.br)
Liseane Padilha Thives (liseane.thives@ufsc.br)
Luciana Rohde (l.rohde@ufsc.br)
Hedelvan Emerson Fardin (hedelvan.fardin@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte Silva, 205, Córrego Grande, Florianópolis - SC, Brasil, CEP: 88040-900

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA RESILIÊNCIA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NA CIDADE DE SÃO PAULO

Rafael Vicente Mota, Kamilla Vasconcelos
Universidade de São Paulo

RESUMO
As mudanças climáticas têm ampliado os desafios para a durabilidade de infraestruturas viárias urbanas, especialmente em regiões densamente povoadas como a cidade de São Paulo. Neste contexto, este estudo teve como objetivo quantificar os efeitos de cenários futuros de aumento de temperatura no desempenho estrutural de pavimentos flexíveis. Utilizou-se o software FlexPAVE™ v2.2 para simular a evolução de danos em cinco regiões da cidade (Centro, Norte, Sul, Leste e Oeste), considerando três modelos climáticos (BESM, CanESM2 e HADGEM2-ES), dois cenários de emissões (RCP 4.5 e 8.5) e dois horizontes temporais (2021–2040 e 2041–2060). Os resultados indicaram aumentos médios de 30% em trincas por fadiga, 40% em afundamento no revestimento e 70% no afundamento total. A região Norte apresentou maior resiliência às mudanças climáticas. Concluiu-se que as elevações de temperatura agravam significativamente os danos ao pavimento, reforçando a necessidade de estratégias regionais de adaptação.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm provocando alterações significativas nas dinâmicas sociais, ambientais e econômicas ao redor do mundo. Eventos extremos, como ondas de calor, inundações e secas, tornaram-se mais frequentes e intensos, afetando diretamente setores essenciais da sociedade, como a mobilidade urbana e a infraestrutura de transportes (Coumou e Rahmstor, 2012). Estruturas viárias, projetadas com base em condições climáticas históricas, enfrentam agora um cenário de incertezas, em que a variabilidade e o aumento das temperaturas comprometem sua durabilidade e desempenho ao longo do tempo (Abad *et al.*, 2022).

Diversos estudos internacionais têm buscado entender os efeitos das mudanças climáticas no desempenho de pavimentos, com foco em países como Estados Unidos, Canadá e França (Gudipudi, Underwood e Zalghout, 2017; Qiao *et al.*, 2019; Ktari *et al.*, 2022). As abordagens mais comuns utilizam ferramentas de dimensionamento mecanístico-empírico, como o AASHTOWare Pavement ME e o FlexPAVE™, integrando dados climáticos, de tráfego e de materiais para simular a deterioração dos pavimentos ao longo do tempo. Em geral, esses estudos apontam para um aumento nos danos estruturais, como trincas por fadiga e afundamentos plásticos, especialmente sob cenários de aumento de temperatura. Além disso, há evidências de que soluções como o uso de ligantes mais resistentes ao calor e o aumento da espessura das camadas asfálticas podem mitigar parte desses efeitos (Qiao *et al.*, 2019).

Apesar dos avanços internacionais, ainda são limitadas as pesquisas que analisam, de forma integrada, os efeitos das projeções climáticas sobre o desempenho de pavimentos no contexto brasileiro (Santos, Ribeiro e Souza de Abreu, 2020). Grande parte dos estudos concentra-se em aspectos pontuais, sem considerar diferentes modelos climáticos, cenários de emissões e variações regionais. A ausência de análises voltadas para países tropicais, como o Brasil, dificulta a formulação de estratégias de adaptação compatíveis com as realidades locais. No caso da cidade de São Paulo, uma das maiores metrópoles da América Latina, essa lacuna é especialmente preocupante, dado o volume de tráfego, a complexidade da malha viária e os impactos crescentes das ilhas de calor urbanas.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo avaliar os impactos do aumento de temperatura, resultantes das mudanças climáticas, sobre o desempenho estrutural de pavimentos flexíveis na cidade de São Paulo. Para isso, são utilizadas diferentes projeções climáticas, considerando dois cenários de emissão e dois períodos futuros, com apoio do software FlexPAVE™ v2.2. A análise busca comparar o comportamento dos pavimentos sob condições históricas e projetadas, fornecendo subsídios técnicos para a priorização de investimentos e a formulação de estratégias de adaptação da infraestrutura viária urbana.

2. METODOLOGIA

Este estudo avaliou os impactos de mudanças climáticas no desempenho estrutural de pavimentos flexíveis em 5 pontos espalhados nas regiões da cidade de São Paulo (Centro, Norte, Sul, Leste e Oeste), conforme apresentado na Tabela 1. A metodologia adotada baseou-se em simulações de desempenho de pavimento asfáltico utilizando o software FlexPAVE™ v2.2, comparando o comportamento estrutural sob condições

climáticas históricas e futuras.

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos locais analisados na cidade de São Paulo

Região	Latitude (°)	Longitude (°)
Centro	-23,549	-46,621
Norte	-23.,475	-46,611
Sul	-23,651	-46,640
Leste	-23,543	-46,434
Oeste	-23,567	-46,737

Neste estudo, foram adotados os *Representative Concentration Pathways* (RCP) 4.5 e 8.5 por representarem, respectivamente, um cenário de estabilização intermediária (forçamento radiativo ~4,5 W/m² em 2100) e um cenário alto de emissões (~8,5 W/m² em 2100). Também foram selecionados três modelos amplamente documentados e disponíveis para a região: BESM (modelo brasileiro do INPE), CanESM2 (Canadá/CCCma) e HadGEM2-ES (Met Office, Reino Unido). O BESM é relevante por incorporar parametrizações voltadas à América do Sul e boa representação de variabilidades de grande escala no Atlântico, úteis a estudos regionais. O CanESM2 inclui componentes de ciclo do carbono acoplados, sendo recorrentemente usado em projeções CMIP5. O HadGEM2-ES possui estratosfera bem resolvida e componentes de sistema terrestre, com bom desempenho comparativo em múltiplos processos climáticos.

As projeções futuras, portanto, consideraram três modelos climáticos (BESM, CanESM2 e HadGEM2-ES), sob dois cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5), em dois períodos: futuro próximo (2021–2040) e futuro distante (2041–2060), totalizando 12 cenários por região. As análises utilizaram dados históricos do banco de dados climático MERRA, incorporado ao FlexPAVE™, enquanto os dados futuros foram extraídos de modelos regionais disponibilizados pelo INPE, com resolução espacial de 20 km.

Para gerar os arquivos horários exigidos pelo software, foi empregada a técnica *Modified Imposed Offset Morphing Method* (M-IOMM), que ajusta projeções diárias mínimas e máximas com base em distribuições históricas de temperatura. Apenas os dados de temperatura foram modificados nas projeções, mantendo constantes outras variáveis climáticas como precipitação, umidade, velocidade do vento e insolação (a serem abordado em estudos futuros). O modelo estrutural adotado foi padronizado para todas as simulações, com dados de entrada obtidos da base do FlexPAVE™, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Dados de entrada para as simulações estruturais

Dado de Entrada	Variável	Valor
Tráfego	Volume Diário Médio	15.000
	Carga por eixo (kN)	80,07
	Pressão dos Pneus (kPa)	827,4
	Velocidade (km/h)	100,0
Projeto	Profundidade do Lençol Freático (m)	150
	Mês de Abertura do Tráfego	Janeiro
	Período de Projeto (anos)	20
Camada 1 – Concreto Asfáltico (CA)	Espessura (cm)	12,00
	Densidade (kg/m³)	2370
	Condutividade Térmica (W/(m.°C))	1,16
	Capacidade Calorífica (J/(kg.°C))	963
Camada 2 – Base Granular	Espessura (cm)	25,00
	Módulo de Resiliência (MPa)	206,8
Subleito	Módulo de Resiliência (MPa)	79,29

Para quantificar o impacto das mudanças climáticas, utilizou-se a seguinte equação de variação relativa:

$$Variação_j = \frac{DanoFuturo_j - DanoBase_j}{DanoBase_j}$$

Em que j representa os tipos de dano: afundamento total, afundamento no revestimento asfáltico e percentual de trincas por fadiga ao final do período de análise. Foram realizadas 61 simulações (5 regiões × 12 cenários futuros + 1 cenário histórico de referência), permitindo avaliar como diferentes projeções climáticas influenciam o desempenho dos pavimentos urbanos.

3. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a variação percentual dos danos estruturais previstos – trincamento por fadiga, afundamento na camada de revestimento e afundamento total – em relação ao cenário histórico. Observa-se uma diferença significativa entre as regiões da cidade de São Paulo. A região Norte demonstrou maior resiliência às mudanças climáticas, com menores variações em todos os tipos de dano. As demais regiões (Centro, Sul, Leste e Oeste) apresentaram resultados bastante semelhantes entre si, com maior sensibilidade às projeções de aumento de temperatura.

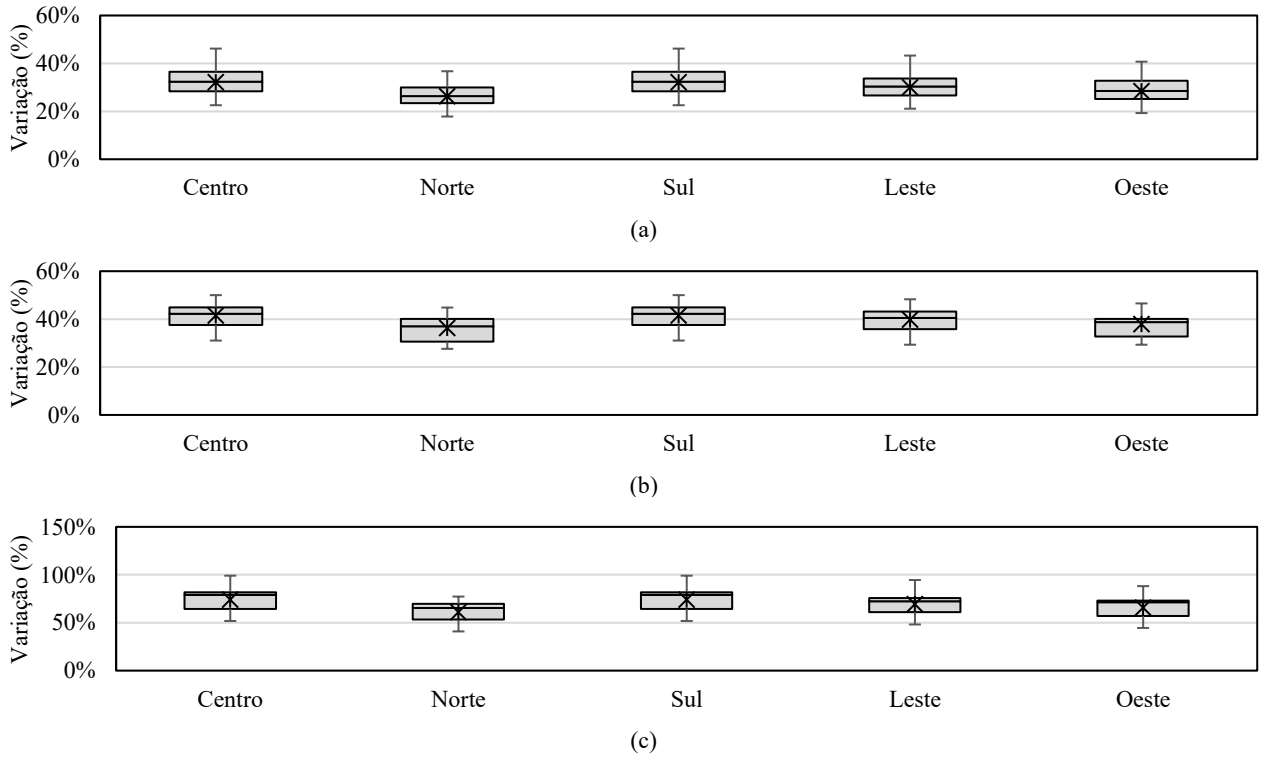


Figura 1: Variação percentual dos danos estruturais previstos em relação à base histórica para: (a) trincamento por fadiga, (b) afundamento no revestimento e (c) afundamento total

Em termos médios, os resultados indicam que as mudanças climáticas causam um aumento de aproximadamente 30% nas trincas por fadiga, 40% no afundamento da camada de revestimento e 70% no afundamento total da estrutura. Esses valores reforçam que o aumento da temperatura decorrente das mudanças climáticas impacta negativamente não apenas as camadas superficiais, mas compromete de forma significativa o desempenho estrutural completo do pavimento ao longo do tempo.

A Figura 2 detalha os resultados conforme os cenários climáticos (RCP 4.5 e RCP 8.5) e os dois períodos futuros analisados (2021–2040 e 2041–2060). Observa-se que o cenário RCP 4.5 apresenta resultados semelhantes ao futuro próximo, enquanto o RCP 8.5 mostra um comportamento compatível com o futuro mais distante. Isso indica que quanto mais crítico o cenário climático e mais distante o horizonte temporal, maiores são os danos previstos, o que reforça a progressividade dos efeitos das mudanças climáticas sobre o pavimento.

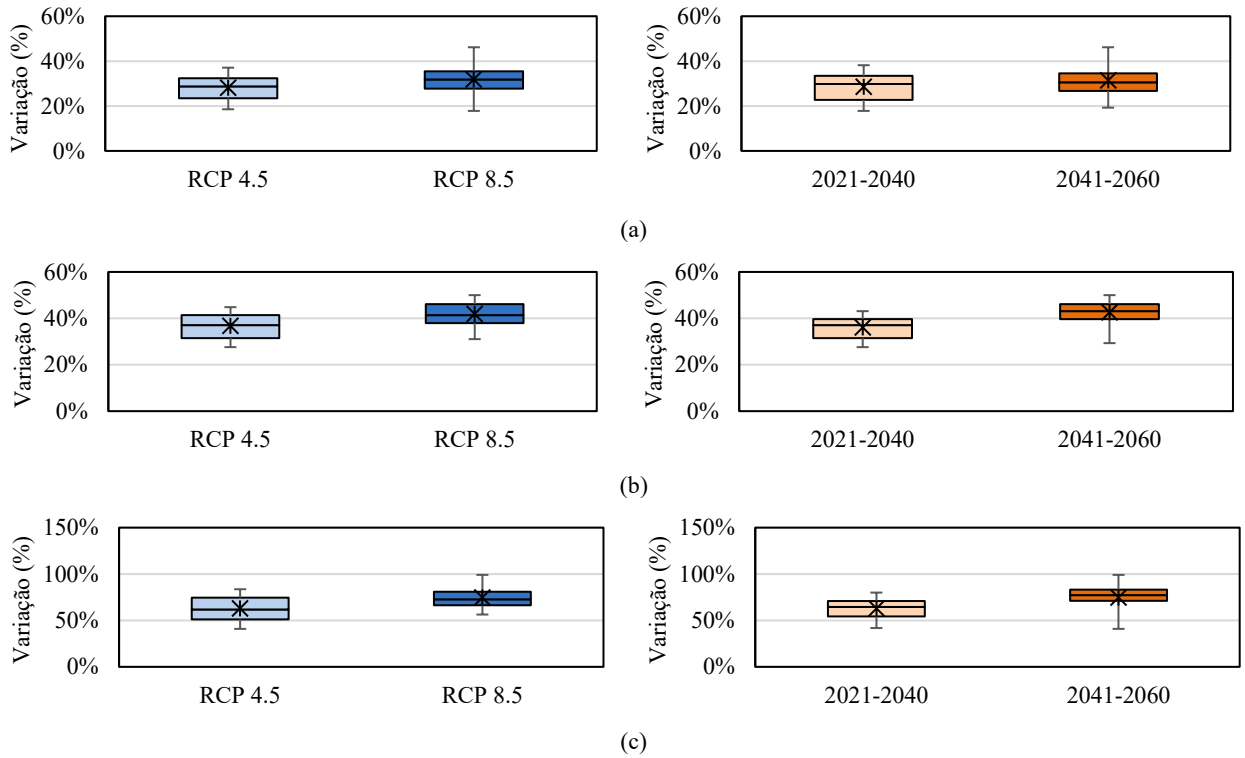


Figura 2: Variação percentual dos danos previstos conforme cenários RCP e períodos futuros para: (a) trincamento por fadiga, (b) afundamento no revestimento e (c) afundamento total

A Figura 3 apresenta os resultados conforme os três modelos climáticos utilizados neste estudo (BESM, CanESM2 e HADGEM2-ES). De forma geral, os modelos apresentaram resultados semelhantes quanto ao impacto da temperatura nos diferentes cenários climáticos. A única exceção significativa ocorreu para o trincamento por fadiga, em que o modelo BESM, desenvolvido no Brasil, apresentou os resultados mais críticos, destacando a importância de utilizar múltiplos modelos em análises locais para capturar a sensibilidade regional das projeções.

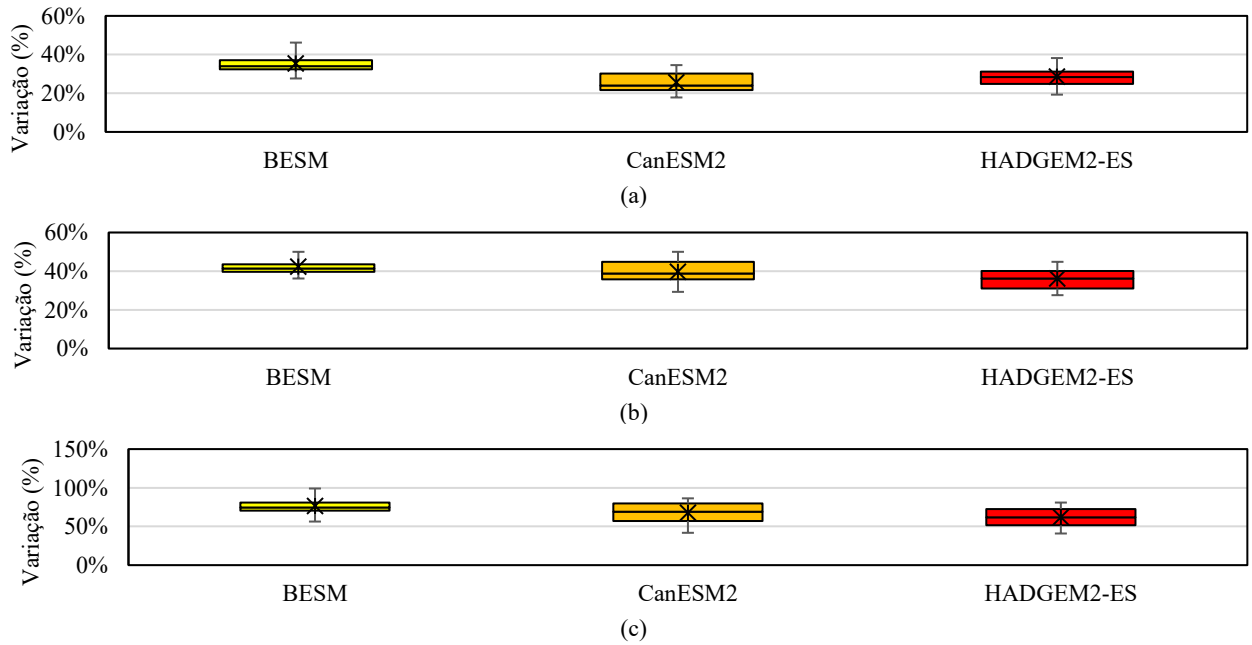


Figura 3: Variação percentual dos danos previstos conforme o modelo climático utilizado para: (a) trincamento por fadiga, (b) afundamento no revestimento e (c) afundamento total

De maneira geral, os resultados obtidos evidenciam a necessidade de adoção de estratégias de adaptação específicas para cada região da cidade, considerando o tipo de dano mais significativo e o nível de resiliência observado. A baixa variabilidade entre os modelos climáticos também sugere que há um grau considerável de confiabilidade nas projeções, o que contribui para a definição de políticas públicas e ações de engenharia mais eficazes frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

4. CONCLUSÕES

Este estudo analisou os impactos das mudanças climáticas no desempenho estrutural de pavimentos flexíveis na cidade de São Paulo, com foco exclusivo na variável temperatura. Foram utilizadas simulações no software FlexPAVE™ v2.2 para avaliar a evolução dos danos estruturais ao longo de 20 anos, considerando diferentes cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5), dois períodos futuros (2021–2040 e 2041–2060) e três modelos climáticos (BESM, CanESM2 e HADGEM2-ES). As análises foram realizadas para cinco regiões da cidade (Centro, Norte, Sul, Leste e Oeste), com características estruturais e de tráfego padronizadas.

Os resultados apontaram que, em todos os cenários e regiões, os pavimentos sofrerão maior deterioração devido ao aumento das temperaturas, com acréscimos médios de 30% nas trincas por fadiga, 40% no afundamento do revestimento e 70% no afundamento total da estrutura. A região Norte se destacou como a mais resiliente, com menores variações percentuais em todos os tipos de dano, enquanto as demais regiões apresentaram comportamentos semelhantes e mais sensíveis. Os cenários mais críticos (RCP 8.5 e futuro distante) intensificaram os danos, e o modelo BESM, de origem nacional, indicou os resultados mais severos para fadiga, demonstrando a importância de considerar diferentes modelos climáticos em análises locais.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a calibração local dos modelos de previsão climática, incorporando dados integrados para melhorar a precisão das projeções. Além disso, seria relevante expandir a análise para outros fatores climáticos, como a precipitação, e não apenas a temperatura. Sugere-se também ampliar o número de pontos analisados na cidade de São Paulo, permitindo um mapeamento mais contínuo das áreas mais e menos resilientes. Por fim, destaca-se a importância de aumentar a base de dados de temperatura real dos pavimentos, visando melhorar a calibração dos modelos, especialmente na comparação entre diferentes tipos estruturais de pavimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro. Agradecem também ao Dr. Shane Underwood e ao Dr. Richard Kim pela disponibilização do software de análise, que foi fundamental para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abad, R. P. B.; T. Schwanen e A. M. Fillone (2020) Commuting behavior adaptation to flooding: an analysis of transit users' choices in Metro Manila. Travel Behaviour and Society, v. 18, p. 46–57.

Coumou, D. e S. Rahmstorf (2012) A Decade of Weather Extremes. Nature Climate Change, v. 2, p. 491–496. DOI: 10.1038/nclimate1452

Gudipudi, P. P.; B. S. Underwood e A. Zalghout (2017) Impact of climate change on pavement structural performance in the United States. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 57, p. 172–184.

Ktari, R.; M. D. Radeef; C. Gabet; J. D. Paulhiac e Y. Brosseaud (2022) Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. International Journal of Pavement Engineering, v. 23, n. 5, p. 1433–1458.

Qiao, Y.; J. Santos; A. M. Stoner e G. Flintscht (2019) Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States. Journal of Industrial Ecology, v. 24, n. 2, p. 342–355.

Santos, A. S.; S. Kahn Ribeiro e V. H. Souza de Abreu (2020) Addressing Climate Change in Brazil: Is Rio de Janeiro City Acting on Adaptation Strategies? Proceedings of the 2020 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE), Pattaya, Thailand, 20–22.

Rafael Vicente Mota (rafael.vicente.mota@usp.br)
Kamilla Vasconcelos Savasini (kamilla.vasconcelos@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Prof. Almeida Prado – Travessa 2, No 83, Cidade Universitária, São Paulo-SP

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO IMPACTO DAS IRREGULARIDADES DO PAVIMENTO RODOVIÁRIO NOS PADRÕES DE EMISSÕES VEICULARES

Rafael Henrique de Oliveira[1], Felipe Gennari Rosa[2], Felipe Santos Rossi Baumeister[2], Gabriel Soares Machado[2], Wei Lin Bing Sen Chen[2], Lucas Vilela Spartani de Godoy[2], Kamilla Vasconcelos Savasini[2], Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho[2], Laura Nascimento Mazzoni[2]
[1]Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, [2]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
Este estudo experimental investiga a influência das irregularidades do pavimento rodoviário nas emissões veiculares, comparando dois trechos urbanos distintos quanto à serventia. Utilizando um veículo instrumentado, foram coletados dados de acelerações verticais, parâmetros operacionais do motor via sistema OBD-II e concentrações de gases por meio de analisador portátil de gases (CO, CO_2, HC, NO_x e O_2). Os resultados demonstram que o pavimento irregular provoca: (i) aumento médio de 35% nas emissões de HC; (ii) picos em NO_x de pouco mais de 300 ppm; e (iii) maiores níveis e maior variabilidade nas concentrações de CO; e (iv) maior variabilidade nas concentrações de CO_2. Os testes estatísticos indicam diferenças significativas em média e variância entre os dois cenários, atribuíveis tanto ao aumento da resistência ao rolamento quanto às alterações no padrão de condução em pavimentos deteriorados. Oferece-se, assim, subsídios técnicos e metodológicos para políticas de infraestrutura sustentável em sua fase de uso.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As mudanças climáticas associadas às emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) representam um dos maiores desafios contemporâneos e impulsionam esforços globais de redução dessas emissões. Em escala global, estima-se que o setor de transportes tenha 90% de sua demanda energética suprida por combustíveis fósseis e seja responsável por aproximadamente um quarto das emissões globais de dióxido de carbono relacionadas à produção de energia (IEA, 2024). No Brasil, devido à menor participação das fontes fósseis na geração de eletricidade, o setor de transportes tem contribuição predominante nas emissões de carbono e é responsável por 50% do total relacionado à produção de energia, o que representa cerca de 217 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente ($MtCO_2e$) (EPE, 2024). O modo rodoviário, majoritário na matriz de transportes brasileira e amplamente dependente de combustíveis fósseis, é o principal responsável por esse cenário, representando mais de 94% das emissões do setor de transportes. (cerca de 206 $MtCO_2e$) (Observatório do Clima, 2024, 2025).

Do ponto de vista da infraestrutura viária, as características geométricas (alinhamentos horizontal e vertical) e as características funcionais e estruturais do pavimento (textura, irregularidades, anomalias pontuais e deflexões) determinam a resistência ao movimento de um veículo e, consequentemente, a energia necessária para seu deslocamento (Harvey *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2020). Essa resistência inclui uma componente diretamente associada à interação pneu-pavimento e influenciada pelas condições do pavimento, identificada como resistência ao rolamento (Michelin, 2003). Relatório do *Transportation Research Board* (TRB) demonstrou empiricamente que o consumo de combustível em veículos de passeio pode aumentar até 13% em pavimentos com baixo desempenho funcional (comparando trechos com IRI médio de 6 m/km contra uma seção de referência com IRI médio de 1 m/km, em terreno plano) (Chatti e Zaabar, 2012). Outros estudos complementam a caracterização do impacto das irregularidades no consumo de combustível e seu efeito nas emissões, seja através de modelagem (Wang et al., 2020) ou medições diretas (Nobre Junior *et al.*, 2021).

Em avaliações do ciclo de vida (ACV) de pavimentos rodoviários, essas emissões excedentes durante sua fase de uso podem representar a principal contribuição para as emissões totais, especialmente em vias com alto volume de tráfego (Huang *et al.*, 2009; Trupia *et al.*, 2017). Para além dos aspectos quantitativos, a caracterização do perfil de emissões, incluindo a dinâmica temporal das concentrações dos diferentes gases, representa uma dimensão analítica essencial. Durante o ciclo de combustão em motores, a reação ideal resultaria na formação de CO_2 e água, apenas. Entretanto, devido às variações nas condições de operação do motor, mistura ar-combustível, temperatura e pressão, a combustão não ocorre completamente, resultando em emissões de gases como o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) não queimados e óxidos de nitrogênio (NO_x). O aumento das emissões desses gases nocivos ao meio ambiente está associado, entre outras coisas, ao aumento do IRI em pavimentos rodoviários (Chang *et al.*, 2017).

Dada a criticidade da contribuição das condições superficiais do pavimento em avaliações ambientais, assim

como as lacunas existentes no levantamento de dados de consumo e emissões em condições reais, o presente trabalho tem como objetivo investigar essa relação de forma aprofundada, por meio do levantamento de emissões em dois trechos claramente distintos quanto à qualidade funcional do pavimento. Busca-se fornecer subsídios metodológicos para a estruturação de bases de dados e métodos analíticos que permitam quantificar, de forma mais precisa, a influência das condições do pavimento sobre o consumo energético e as emissões veiculares. Entende-se que, com uma coleta de dados mais robusta e sistemática em etapas futuras, será possível caracterizar adequadamente a contribuição desses fatores em microescala (isto é, na escala dos trechos viários) e gerar resultados utilizáveis em sistemas de otimização ambiental de rotas (voltados à definição de trajetos com menor impacto ambiental) e em sistemas de gerenciamento de pavimentos que considerem explicitamente as emissões durante a fase de uso.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Trechos avaliados

Os dados foram coletados em trechos de 2,0 km (Figura 1) em duas vias distintas com pavimentos asfálticos e condições topográficas similares e aproximadamente planas (declividades próximas de 0%, com variação de ±0,5% como monitorado pelo barômetro contido no instrumental empregado) na cidade de São Paulo (SP), Brasil. As vias selecionadas foram a Av. Prof. Mello Moraes (identificada como Raia) e a Av. Eng. Billings (identificada como Marginal), sendo classificadas como via coletora e via de trânsito rápido pela Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo - CET/SP, respectivamente. Os trechos foram selecionados devido às condições funcionais distintas entre as vias, conforme apresentado por de Oliveira *et al.* (2024): IRI (em m/km) de 2,04 ± 0,77 para a Marginal e de 8,53 ± 3,76 para a Raia.

Foram realizadas coletas de dados em seis passagens distintas na faixa de rolamento mais à esquerda de cada uma das vias utilizando o veículo instrumentado da marca Ford, modelo Fiesta Hatch S, ano 2015, com motorização 1,5 litro, câmbio de transmissão manual de cinco marchas, abastecido com etanol. Buscou-se manter a velocidade constante em 40 km/h para os dois trechos. Reporta-se, ainda, que as condições meteorológicas foram de ausência de chuva e ventos fracos (média de 0,6 m/s e rajadas de até 2 m/s), conforme registrado por estação meteorológica adjacente às vias de estudo (CGESP, estação Butantã/USP).

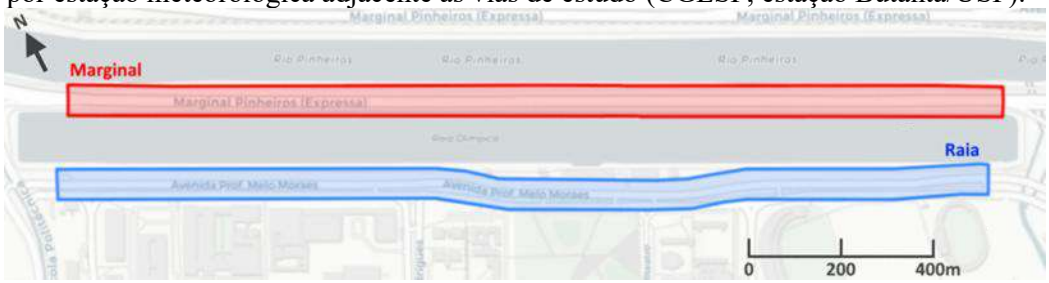


Figura 1: Trechos avaliados (de Oliveira *et al.*, 2024)

2.2. Dispositivos empregados e variáveis monitoradas

O veículo utilizado para o teste foi instrumentado com os dispositivos listados a seguir:

- **Dispositivo de medição de vibrações** baseado em Raspberry Pi W Zero, integrando uma Unidade de Medida Inercial (*Inertial Measurement Unit* – IMU, com acelerômetro e giroscópio triaxiais integrados a magnetômetro triaxial e módulo de pressão) e um receptor *Global Positioning System* (GPS) de posicionamento por ponto simples. Descrição detalhada em de Oliveira *et al.* (2024). Variáveis de interesse: do IMU, acelerações triaxiais (g), velocidades angulares triaxiais (º/s) e altimetria barométrica (m), todos a 83 Hz; do GPS: posição geográfica (latitude e longitude em º), tempo UTC e velocidade (m/s), todos a 1 Hz.
- **Leitor OBD-II**, modelo ELM327. Trata-se de leitor de dados do sistema de diagnóstico a bordo (*On-board Diagnostic System,* OBD) do veículo, padrão OBD-II. Variáveis de interesse: velocidade (km/h), consumo instantâneo de combustível (l/h, medido diretamente do injetor), potência instantânea do motor (CV, baseado no consumo de combustível), RPM do motor, distância percorrida (km), aceleração (g), consumo instantâneo de combustível (l/100k), com taxa variável entre 1 e 1,3 Hz. Os dados são coletados e registrados por um *smartphone* conectado via *bluetooth* ao leitor.
- **Analisador portátil de gases veiculares,** modelo NAPRO PC-Multigás. Utiliza técnica de medição

por infravermelho não dispersivo (NDIR) para análise das amostras coletadas por uma sonda inserida no escapamento do veículo de teste. Atende aos requisitos da norma ISO 3930. Concentrações analisadas a 1 Hz: monóxido de carbono (CO, %), dióxido de carbono (CO_2, %), oxigênio (O_2, %), hidrocarbonetos (HC, ppm) e óxidos de nitrogênio (NO_x, ppm).

Apesar de submetido à influência da suspensão, testes anteriores revelaram uma elevada aderência entre o *International Roughness Index* (IRI) e o valor eficaz das acelerações no eixo vertical devidamente processadas conforme descrito em (Loprencipe *et al.*, 2021). Para o presente trabalho, considerando a previamente estabelecida diferenciação funcional entre os trechos, os dados de vibrações foram utilizados somente para confirmar essa distinção e identificar, em etapas futuras de análise, influências sobre a vibração decorrentes de variações de velocidade e relações com eventuais variações de consumo de combustível e emissão. Outra relevante função dos dados iniciais é viabilizar a identificação e posterior filtragem de trechos associados a lombadas, como descrito na seção 2.3.

2.3. Tratamento dos dados

A primeira etapa de tratamento considera a sincronização dos sensores. Uma vez que há quatro bases temporais distintas (sistema operacional do dispositivo de vibração, sistema GPS, computador de bordo do veículo e o sistema operacional do computador que controla o analisador de gases), adotou-se procedimento de campo de anotação do horário de início de funcionamento de cada dispositivo por um mesmo cronômetro. A partir da sincronização, foi possível também georreferenciar os dados a partir da correspondência temporal entre as bases e atribuição das coordenadas geodésicas fornecidas pelo receptor GPS.

Após a sincronização e georreferenciação dos dados, implementou-se protocolo de filtragem que rotulou registros correspondentes a passagem por lombadas para posterior análise em separado. Os critérios estabelecidos para identificação de comportamentos atípicos incluíram: aceleração vertical (eixo Z) fora da faixa de 0,4-1,6 m/s²; velocidade angular em torno do eixo X superior a 0,6 rad/s ou inferior a -0,5 rad/s; e velocidade angular no eixo Y acima de 0,45 rad/s ou abaixo de -0,5 rad/s. Esses limiares foram determinados para este conjunto de dados e não têm por objetivo definir critério replicável em qualquer contexto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, avalia-se o perfil de velocidades (Figura 2) em cada trecho. Verificam-se diferenças significativas entre os dois trechos: enquanto na Marginal Pinheiros a velocidade manteve-se estável próxima aos 40 km/h objetivados, o perfil de velocidades da Raia da USP apresentou variações mais acentuadas e frequentes, refletindo não apenas o impacto das lombadas, mas dificuldades de controle decorrentes das irregularidades do pavimento (efeito reportado pelo condutor do veículo nos testes em questão). Além das diferenças em velocidade, os resultados em vibração vertical (valor eficaz para a aceleração no eixo Z descontada a componente associada à gravidade) foram aproximadamente 2,5 vezes maiores para o Raia (média = 0,12 m/s² *vs* 0,05 m/s² para a Marginal), condizente com a magnitude da diferença em IRI entre os trechos e com os resultados prévios (de Oliveira *et al.*, 2024).

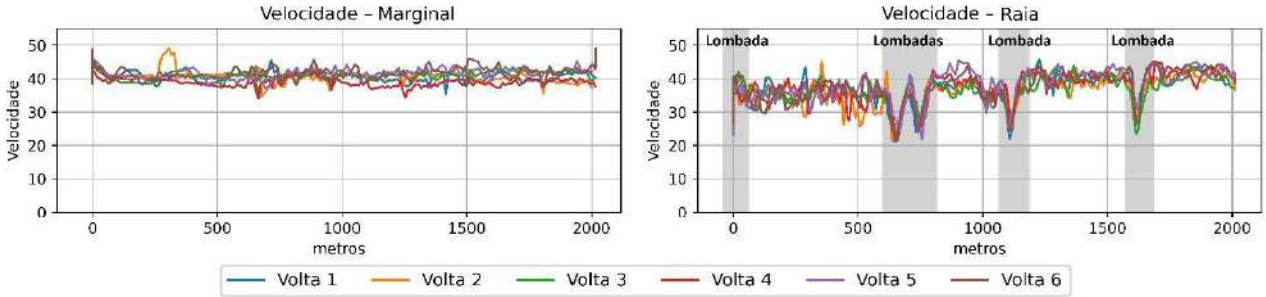


Figura 2: Perfil de velocidades para as viagens de teste

Após a remoção dos trechos sob influência das lombadas (intervalos de influência bem delimitados nos perfis de velocidades), a aplicação dos testes U de Mann-Whitney para a média ($p < 0,05$; tamanho do efeito $r > 0,4$ para todas as variáveis) e Levene para a variância ($p < 0,05$) demonstrou diferenças estatisticamente significativas nos padrões de emissão entre os dois trechos. Na Marginal Pinheiros, as concentrações de CO e HC (Figura 3) mantiveram-se baixas e estáveis, enquanto na Raia da USP registraram-se médias mais elevadas

e picos indicativos de combustão incompleta. Esse comportamento sugere que, mesmo fora dos intervalos de influência das lombadas, a irregularidade do pavimento da Raia induz instabilidades no funcionamento do motor e uma maior distância para seu funcionamento ótimo, o que favorece a emissão de produtos da queima incompleta de combustível. Similarmente, os níveis de CO_2 foram similares para os dois trechos (ligeiramente mais baixos para a Raia em efeito complementar à combustão incompleta), mas apresentaram maior estabilidade na Marginal, contrastando com as variações observadas na Raia. Quanto ao O_2, os níveis verificados na Raia são ligeiramente mais elevados e apresentam maior variação, sugerindo momentos em que o oxigênio não é totalmente consumido, um indicativo de combustão menos eficiente. As emissões de NO_x, por sua vez, atingiram picos de pouco mais de 300 ppm (sem considerar trechos de lombada) na Raia, em oposição a valores próximos de zero na Marginal. Essa constatação fornece evidência adicional dos efeitos negativos da irregularidade do pavimento na eficiência da combustão.

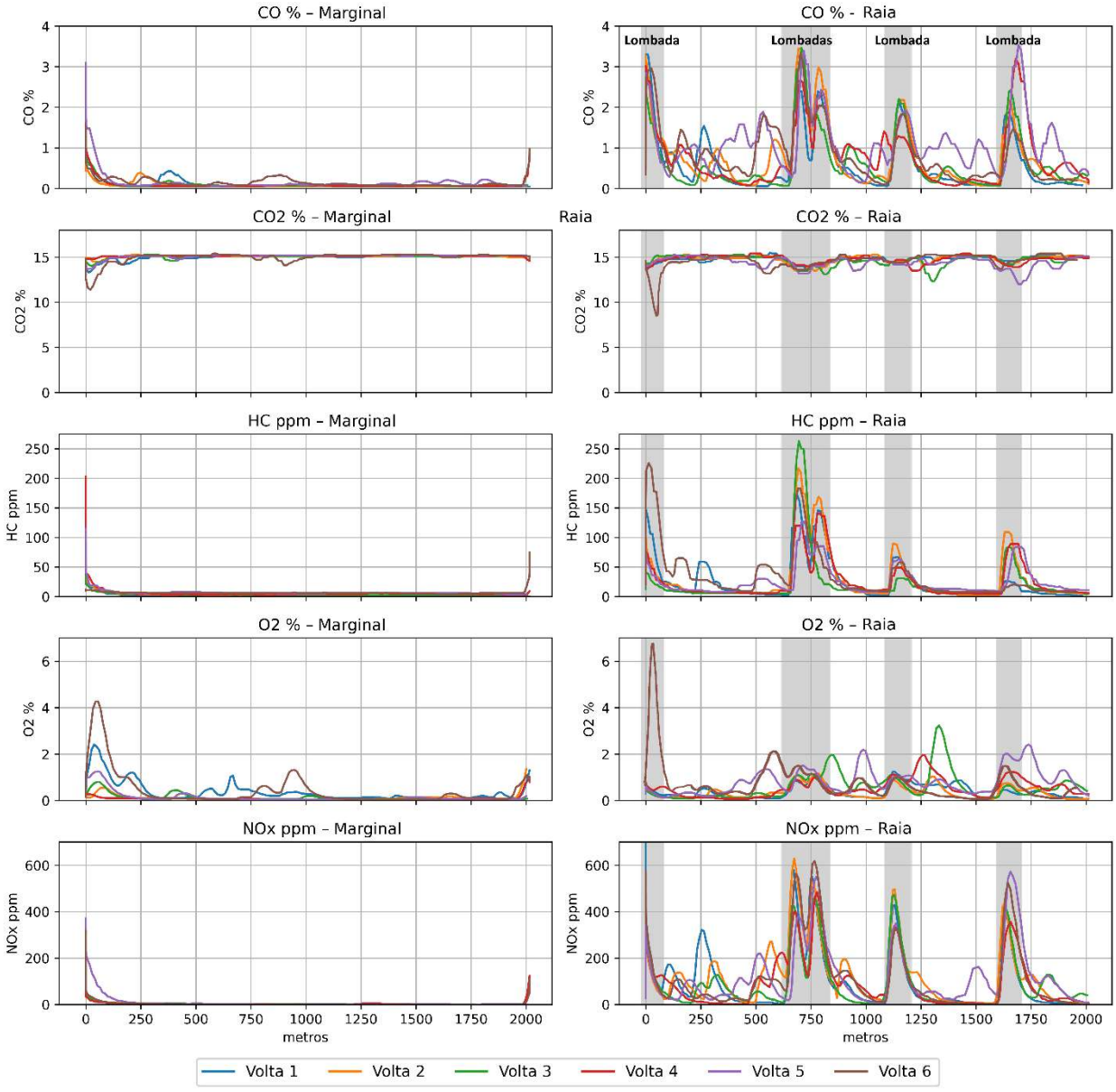


Figura 3: Gráficos das concentrações de gases para as viagens de teste

Os resultados obtidos demonstram que pavimentos irregulares, como o da Raia da USP, provocam maior instabilidade operacional e alteram significativamente o perfil de emissões. Como consequência, observa-se um maior impacto ambiental, considerando tanto o potencial de aquecimento global (evidenciado pelo aumento dos hidrocarbonetos, incluindo o metano) quanto a emissão de poluentes atmosféricos como o monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), que têm impactos significativos na saúde e nos ecossistemas. Em contraste, vias bem conservadas como a Marginal Pinheiros favorecem a eficiência

energética e tem potencial de redução dos impactos ambientais. Estes achados reforçam a importância estratégica da manutenção viária adequada como fator crucial para a sustentabilidade do transporte urbano, oferecendo evidências quantitativas que sustentam a hipótese central do trabalho. O método empregado mostrou-se eficaz na identificação de variações no padrão de emissões como resposta às irregularidades do pavimento e ao desempenho veicular.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa comprovam que pavimentos irregulares alteram significativamente o padrão das emissões veiculares. Esse efeito ocorre por dois mecanismos principais: primeiro, por meio do aumento direto da resistência ao rolamento, que eleva o consumo energético do veículo; segundo, pelas alterações indiretas no padrão de condução que essas irregularidades provocam, levando a uma operação menos eficiente do motor. Para avançar nesta linha de pesquisa, torna-se necessário implementar metodologias complementares que permitam estimar os volumes de escape, convertendo as concentrações medidas em valores absolutos de massa emitida. Para tanto, baseia-se em experiências anteriores do grupo de pesquisa e de trabalhos relacionados quanto ao uso bem-sucedido dos dados oriundos do sistema OBD combinados aos dados do analisador de gases. Tal aprofundamento metodológico, somado à reprodução dos testes em cenários, veículos e padrões de condução diversos proporcionará uma avaliação mais completa dos impactos ambientais decorrentes da má conservação das vias, oferecendo assim subsídios técnicos mais robustos para a formulação de políticas públicas no setor de transportes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento do Fundo Patrimonial Amigos da Poli (Projeto 2024-013, Edital 1/2024).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chang, C. M., Qiao, F., Abdallah, I. N., Azimi, M., Gonzalez, O. D., Nabi, M., Khan, M., Li, Q., Ghadimi, S. J., Buhaya, N., Nazarian, S., e Yu, L. (2017) Quantification of the Impact of Roadway Conditions on Emissions. El Paso.

Chatti, K., e Zaabar, I. (2012) Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs. NCHRP Report 720. Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. ISBN 978-0-309-25821-0.

de Oliveira, R. H., Mazzoni, L. N., Savasini, K. V., Almeida Filho, F. G. V. de, e Ho, L. L. (2024) Estudo experimental em tráfego real do impacto das irregularidades do pavimento no consumo de combustível. In: Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis: ANPET.

EPE. (2024) Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese 2024 - Ano Base 2023. Brasília.

Harvey, J. T., Meijer, J., Ozer, H., Al-Qadi, I., Saboori, A., e Kendall, A. (2016) Pavement Life Cycle Assessment Framework. Fhwa-Hif-16-014, 244.

Huang, Y., Bird, R., e Bell, M. (2009) A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 14(3), 197–204.

IEA. (2024) World Energy Outlook 2024. Paris. Obtido de www.iea.org/terms

Michelin. (2003) The tyre - Rolling resistance and fuel savings.

Nobre Junior, E. F., Arantes, A. E., e Azevedo, P. O. (2021) Effects of international roughness index on vehicle emissions. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 15(1), 41.

Observatório do Clima. (2024) Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil.

Observatório do Clima. (2025) Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

Trupia, L., Parry, T., Neves, L. C., e Lo Presti, D. (2017) Rolling resistance contribution to a road pavement life cycle carbon footprint analysis. International Journal of Life Cycle Assessment, 22(6), 972–985.

Wang, H., Al-Saadi, I., Lu, P., e Jasim, A. (2020) Quantifying greenhouse gas emission of asphalt pavement preservation at construction and use stages using life-cycle assessment. International Journal of Sustainable Transportation, 14(1), 25–34. doi:10.1080/15568318.2018.1519086

Rafael Henrique de Oliveira (rafaelho@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia
Rua Paschoal Marmo, 1888 - Jd. Nova Itália, Limeira - SP, CEP: 13484-332

Kamilla Vasconcelos Savasini (kamilla.vasconcelos@usp.br)
Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho (flaviovaz@usp.br)
Laura Nascimento Mazzoni (laura.mazzoni@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica
Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2, 83 - Butantã, São Paulo – SP, CEP: 05508-070

EFEITOS AMBIENTAIS RELACIONADOS A FALTA DE CONTROLE TECNOLÓGICO NA CONSTRUÇÃO DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Felipe Costa Dias, Sandra Oda
Programa de Engenharia de Transportes – COPPE/UFRJ

RESUMO
O setor de transportes é um dos principais responsáveis pelas emissões globais de gases de efeito estufa destacando a necessidade de soluções mais sustentáveis na infraestrutura rodoviária. Este estudo avaliou o impacto ambiental da etapa de compactação de misturas asfálticas, considerando diferentes combinações de temperatura e energia de aplicação. Foram simulados nove cenários com variações nesses parâmetros, utilizando modelagem com o software MeDiNa e análise ambiental via Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com apoio do Simapro® e base Ecoinvent®. Os resultados apontam que temperaturas baixas e energia de compactação acima do projetado são condições críticas ao revestimento em termos ambientais, reforçando a necessidade de um rigoroso controle tecnológico de execução. A pesquisa evidencia que o desempenho ambiental do pavimento está relacionado à qualidade de execução, e que desvios em relação às condições ideais podem comprometer a durabilidade da estrutura e ampliar significativamente os impactos ao longo do ciclo de vida.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor de transportes desempenha um papel central na economia global, sendo responsável pela movimentação de pessoas, mercadorias e insumos em diversas escalas. No entanto, suas atividades também representam uma das principais fontes de degradação ambiental, seja pelas elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE), seja pelo impacto no uso do solo e nos ecossistemas naturais. A implantação de rodovias, por exemplo, frequentemente requer a supressão de vegetação nativa, modifica a drenagem natural e provoca fragmentação de habitats. Além disso, a operação contínua dos sistemas de transporte — em especial os modais rodoviário e aéreo — contribui de maneira significativa para a poluição atmosférica devido à queima de combustíveis fósseis.

Segundo o IPCC (2014), o setor de transportes emitiu aproximadamente 7,0 $GtCO_2$ equivalente em 2010, com projeções indicando um aumento para 12,0 $GtCO_2$ equivalente por ano até 2050, caso medidas de mitigação mais efetivas não sejam implementadas. Nos Estados Unidos, dados de 2019 mostram que o setor foi responsável por 28,6% das emissões de CO_2 equivalente, o que o posiciona como a maior fonte individual de emissões entre os setores da economia (United States Environmental Protection Agency, 2021). Esse panorama reforça a necessidade de repensar a forma como se planeja, projeta, constrói e mantém a infraestrutura de transportes, em especial no que diz respeito às rodovias.

No Brasil, onde a matriz logística é fortemente dependente do transporte rodoviário, a busca por soluções mais sustentáveis no setor tornou-se não apenas desejável, mas urgente. A necessidade de compatibilizar desempenho técnico e redução de impactos ambientais tem levado ao desenvolvimento novos critérios na seleção de materiais e nas técnicas de execução de obras (Sukhija e Coleri, 2025). Nesse sentido, observa-se uma crescente valorização de soluções construtivas que busquem reduzir o consumo de energia e as emissões de GEE ao longo de toda a vida útil da infraestrutura (Araujo et al., 2014; Hasan et al., 2020; Santos et al., 2021). A adoção de práticas e tecnologias com menor impacto ambiental tem sido reconhecida como uma diretriz essencial para a engenharia viária contemporânea (Celauro et al., 2016; Gulotta et al., 2019).

Um dos instrumentos mais relevantes no apoio à tomada de decisão sustentável é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), metodologia reconhecida internacionalmente por possibilitar a quantificação dos impactos ambientais de produtos, processos ou serviços ao longo de todas as suas fases — desde a extração de matérias-primas até o descarte ou reaproveitamento final. Normatizada pelas ISO 14040 e 14044, a ACV oferece uma abordagem sistêmica que permite não apenas identificar os principais pontos críticos de impacto ambiental, mas também comparar alternativas tecnológicas em termos de energia incorporada, emissões de GEE, consumo de recursos naturais e desempenho estrutural (Batouli et al., 2017).

No campo da infraestrutura rodoviária, a aplicação da ACV tem se consolidado como uma prática estratégica. Dessa for, fica evidente o potencial dessa metodologia na comparação entre diferentes alternativas de pavimentação, considerando aspectos como durabilidade, custo energético e impactos ambientais acumulados

ao longo do ciclo de vida (Chen et al., 2025; Qiao et al., 2025). A possibilidade de incorporar critérios ambientais desde a concepção dos projetos tem incentivado sua adoção não apenas em estudos acadêmicos, mas também em políticas públicas de infraestrutura sustentável.

Além da escolha de materiais e tecnologias de menor impacto, o desempenho ambiental de um pavimento também depende, de forma direta, da qualidade com que a obra é executada. Nesse ponto, destaca-se a importância do controle tecnológico e da gestão de qualidade durante a construção, sobretudo nas etapas relacionadas à aplicação e compactação de misturas asfálticas. Falhas nessas etapas podem comprometer significativamente a durabilidade do revestimento, aumentando a frequência de manutenções corretivas e, por consequência, os impactos ambientais e os custos operacionais ao longo do tempo.

O processo de compactação da camada asfáltica, em especial, tem grande influência sobre o desempenho final do pavimento. A mistura asfáltica, antes de suportar as cargas de tráfego, passa pelas etapas de usinagem, espalhamento e compactação. Durante a usinagem, o ligante asfáltico precisa apresentar comportamento fluido, o que facilita sua homogeneização com os agregados e melhora a eficiência da compactação (NCHRP, 2011). Posteriormente, a correta compactação da mistura depende diretamente da temperatura da mistura no momento da aplicação, sendo essa variável influenciada por diversos fatores, como distância entre a usina e o local da obra, condições meteorológicas e proteção térmica do material durante o transporte (Balbo, 2007).

A trabalhabilidade adequada da mistura está diretamente relacionada à sua temperatura. Caso essa esteja abaixo do limite especificado, a compactação poderá ser insuficiente, resultando em perda de estabilidade, menor resistência à tração, redução do módulo de resiliência e surgimento precoce de deformações permanentes (Balbo, 2007). Além disso, as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico tornam o comportamento da mistura sensível à temperatura e à taxa de aplicação de carga, o que pode gerar variações significativas mesmo quando os materiais constituintes são os mesmos (Motamedi et al., 2020).

A energia de compactação aplicada deve ser ajustada conforme a espessura da camada, a temperatura da mistura, as condições climáticas e o tipo de equipamento utilizado, a fim de garantir as propriedades desejadas (Zhao et al., 2021). Caso contrário, revestimentos com desempenho inferior ao previsto podem ser entregues, reduzindo sua vida útil e aumentando os impactos ambientais indiretos devido à necessidade de manutenções frequentes. Portanto, o controle rigoroso dessas variáveis durante a execução da obra não apenas assegura o desempenho técnico do pavimento, mas também contribui para a redução de impactos ambientais no longo prazo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa teve como objetivo principal investigar os efeitos do controle tecnológico sobre o ciclo de vida de pavimentos flexíveis, com ênfase nas variáveis envolvidas na etapa de execução da camada de revestimento. Parte-se da hipótese de que desvios em relação às condições ideais de aplicação — como temperatura inadequada ou energia de compactação insuficiente — podem comprometer significativamente a durabilidade da estrutura e ampliar os impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida.

A metodologia adotada envolveu inicialmente a modelagem de um cenário de referência para o dimensionamento do pavimento, utilizando uma mesma estrutura básica para todos os casos analisados. A diferença entre os cenários consistiu na variação dos parâmetros de temperatura e energia de compactação aplicados à mistura asfáltica do revestimento. A combinação dessas duas variáveis formou nove diferentes condições de execução, que, embora utilizassem os mesmos materiais constituintes, foram consideradas como misturas distintas devido às diferentes propriedades físico-mecânicas resultantes do processo de compactação.

Para cada combinação de temperatura e energia, foram determinadas as emissões de gases de efeito relacionadas à produção e construção das camadas do pavimento. As análises ambientais consideraram três fases principais do ciclo de vida: extração dos insumos naturais, usinagem dos materiais e execução da obra. O levantamento das quantidades de materiais foi realizado com base nas espessuras projetadas para cada camada e nas características físico-mecânicas dos materiais utilizados, o que permitiu calcular os volumes e massas necessários.

A quantificação das emissões atmosféricas foi expressa em dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), utilizando os fatores de conversão recomendados para os gases CO_2, CH_4 e N_2O, conforme diretrizes do IPCC. Essa abordagem permitiu uma avaliação ambiental mais integrada e comparável entre os diferentes cenários estudados.

Como referência para o comportamento das misturas em diferentes condições de compactação, utilizou-se o estudo experimental de Albuquerque (2005), que analisou os efeitos da variação da energia e da temperatura na compactação de concretos asfálticos. Os dados obtidos indicaram que as alterações nessas variáveis influenciam diretamente não apenas os parâmetros volumétricos, como o Grau de Compactação (GC), mas principalmente as propriedades mecânicas das misturas. Em condições adversas, como baixa temperatura de aplicação (90°C) associada a baixa energia (30 golpes por face), observou-se desempenho abaixo do mínimo especificado, com GC inferior a 97%. As propriedades mecânicas, como resistência à tração e módulo de resiliência, apresentaram variações significativas, chegando até 57% e 46% respectivamente do valor referência, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Características das misturas asfálticas utilizadas

Cenário	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Resiliência		Curva de fadiga: N_{fad}= K1 (1/Δσ)^n1			Grau de Compactação
	RT (MPa)	MR (MPa)	s (MPa)	K1	n1	R1^2	Média (%)
CAUQ_30golpes_90°C	0,76	2817	203	675,5	2,34	0,99	97,1
CAUQ_30golpes_140°C	1,03	4647	295	1490,3	2,23	0,99	98,7
CAUQ_30golpes_160°C	1,06	4664	287	1471,4	2,36	0,97	99,0
CAUQ_60golpes_140°C	**1,34**	**6129**	**250**	**2800**	**2,55**	**0,99**	**100,0**
CAUQ_60golpes_160°C	1,29	5222	209	2641,6	2,58	0,99	100,3
CAUQ_90golpes_90°C	0,91	4391	243	1158,3	2,25	0,97	98,5
CAUQ_90golpes_140°C	1,29	5140	378	3110,3	2,68	0,99	100,8
CAUQ_90golpes_160°C	1,28	5442	991	3368,1	2,82	0,99	101,1

Fonte: Adaptado de Albuquerque (2005)

A mistura de controle, definida com base na dosagem Marshall da mistura, foi executada a 140°C com 60 golpes por face, apresentando os melhores resultados em termos de desempenho mecânico. Essa mistura foi utilizada como referência tanto para o dimensionamento estrutural da seção como para as comparações ambientais.

O dimensionamento do pavimento foi realizado utilizando o software MeDiNa (v1.1.5.0), considerando um tráfego estimado de 5×10^6 solicitações equivalentes. A espessura do revestimento foi ajustada de 7,5 cm, recomendada pelo manual do DNIT IPR719 (2006), para 10,0 cm, a fim de atender às solicitações previstas com segurança. A seção transversal considerada representa uma rodovia com duas faixas de rolamento de 3,6 metros, totalizando 7,2 metros de largura, sem acostamentos, sendo esta a unidade funcional adotada nas análises.

Para a avaliação ambiental, as emissões de GEE e o consumo energético dos materiais foram estimados com apoio do software Simapro® e da base de dados Ecoinvent®, complementados por coeficientes extraídos da literatura técnica, conforme Tabela 2 (Stripple, 2001; Nascimento et al., 2020). Os dados de consumo energético e de emissões por unidade de material foram associados às quantidades extraídas do banco de composições de custos e insumos de obras rodoviárias (SICRO, DNIT, 2021). A consolidação dessas informações permitiu estimar os impactos ambientais associados à etapa de construção do pavimento para cada cenário analisado.

Tabela 2: Emissões de gases de efeito estufa e quantidade de energia relacionadas à produção dos insumos

Insumo	CO_2 (t/t)	N_2O (kg/t)	CH_4 (kg/t)
Óleo combustível 1A	4,31E+02	9,35E-03	1,57E+00
Cimento asfáltico	3,99E+02	2,73E-03	1,71E-01
Cimento Portland CP II - 32 a granel	9,04E+02	5,23E-03	6,75E-01
Areia média	1,13E+01	3,31E-04	1,46E-02
Cal hidratada	9,53E+02	7,01E-03	2,73E-01
Brita	1,69E+01	5,25E-04	3,05E-02
Consumo de Óleo Diesel	4,95E+02	9,34E-03	1,59E+00

Fonte: Nascimento et al. (2020)

A estimativa de vida útil para cada cenário foi realizada utilizando o software MeDiNa (v1.1.5.0) e expressa em termos de Número N, o qual representa a quantidade de repetições de carga que o pavimento pode suportar antes de atingir a condição de falha definida. As variações observadas nos resultados demonstraram a influência expressiva dos parâmetros de compactação na durabilidade do revestimento, com cenários executados a temperaturas inadequadas e baixa energia de compactação apresentando vidas úteis significativamente menores.

A Tabela 3 apresenta as emissões em termo de CO_{2eq} e a estimativa da vida útil dos pavimentos em termos de Número N. O fim da vida útil do pavimento, do ponto de vista estrutural, foi definido a partir do parâmetro de área trincada como 30%. Dessa forma, fica evidente quais cenários não atingem a durabilidade necessária para atendimento do projeto. O cenário CBUQ_60golpes_90º foi retirado da análise por limitações de tratamento encontradas durante a simulação com o *software*.

Tabela 3: Vida útil e Emissão de CO2eq dos cenários

Cenários	Energia de compactação	Temperatura	Vida útil (Número N)	CO_{2eq}
CBUQ_30golpes_90ºC	30	90	4,56E+06	185,01
CBUQ_30golpes_140ºC	30	140	5,53E+06	187,4
CBUQ_30golpes_160ºC	30	160	4,94E+06	187,77
CBUQ_60golpes_140ºC	**60**	**140**	**5,15E+06**	**189,73**
CBUQ_60golpes_160ºC	60	160	5,27E+06	190,16
CBUQ_90golpes_90ºC	90	90	4,99E+06	187,99
CBUQ_90golpes_140ºC	90	140	5,41E+06	205,85
CBUQ_90golpes_160ºC	90	160	4,91E+06	206,39

3. RESULTADOS E CONCLUSÃO

Entre os cenários obtidos, o que apresentou o melhor desempenho ambiental em termos relativos foi o CBUQ_30golpes_140ºC. Esse caso demonstrou a menor taxa de emissão de gases de efeito estufa por unidade de vida útil (CO_2 eq/VU), sendo 8,0% mais eficiente que a mistura padrão. Apesar da aplicação de uma energia de compactação inferior ao valor recomendado, esse cenário alcançou a vida útil projetada e contribuiu para a redução das emissões. Essa vantagem ambiental está associada, em grande parte, à menor demanda energética durante a etapa de compactação, sem comprometer a durabilidade do pavimento.

Por outro lado, o cenário CBUQ_90golpes_160ºC apresentou o pior resultado entre os casos avaliados, registrando um aumento de 14,1% nas emissões de CO_2 eq/VU em comparação à mistura padrão. A utilização simultânea de alta energia e elevada temperatura durante a compactação resultou em uma densidade final maior, e levou à redução da vida útil projetada do pavimento. Isso evidencia que a compactação além dos

limites especificados não necessariamente melhora o desempenho da estrutura — podendo, inclusive, prejudicá-lo do ponto de vista ambiental e estrutural.

De forma geral, todos os cenários compactados com 90 golpes apresentaram desempenho ambiental inferior à referência, com apenas uma das combinações resultando em vida útil acima do esperado. Tendência semelhante foi observada para os cenários executados a 90 °C, reforçando que temperaturas abaixo da ideal e aplicação de energia excessiva são condições críticas para o desempenho ambiental do revestimento. Dessa forma, os resultados apontam que temperaturas baixas e energia de compactação acima do projetado são condições críticas ao revestimento em termos ambientais, reforçando a necessidade de um rigoroso controle tecnológico de execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, A. P. F. de. (2005) Influência da energia e da temperatura de compactação nos parâmetros volumétricos e nas propriedades mecânicas dos concretos asfálticos. Instituto Militar de Engenharia.

Araújo, J. P. C., Oliveira, J. R. M., e Silva, H. M. R. D. (2014) The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 32, 97–110. doi:10.1016/j.trd.2014.07.006

Balbo, J. T. (2007) Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração. Oficina de Textos, São Paulo.

Batouli, M., Bienvenu, M., e Mostafavi, A. (2017) Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of LCA and LCCA analysis for pavement type selection in real world decision making. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52, 289–302. doi:10.1016/j.trd.2017.02.018

Celauro, C., Corriere, F., Guerrieri, M., Lo, B., e Rizzo, A. (2016) Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road. Journal of Cleaner Production. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.119

Chen, Y.; Pei, Z.; Feng, D.; Yi, J. (2025) Environmental impact and comprehensive value assessment of epoxy-based binder for asphalt pavement recycling based on LCA and LCC. Chemical Engineering Journal, v. 511, p. 161973, 2025.

DNIT. Manual de pavimentação. , Pub. L. No. IPR 719 (2006). Rio de Janeiro, Brasil.

DNIT. (2021) Sistema de Custos Gerenciais de Obra (SICRO).

Gulotta, T. M., Mistretta, M., e Praticò, F. G. (2019) A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads. Science of the Total Environment, 673, 585–593. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.046

Hasan, U., Whyte, A., E Al, H. Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste , reclaimed asphalt pavement , warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. Journal of Cleaner Production, 257, 120531, 2020. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120531

IPCC, W. G. I. (2014) AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.

Motamedi, H., Fazaeli, H., Aliha, M. R. M., e Reza, H. (2020) Evaluation of temperature and loading rate effect on fracture toughness of fiber reinforced asphalt mixture using edge notched disc bend (ENDB) specimen. Construction and Building Materials, 234, 117365. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117365

Nascimento, F., Gouveia, B., Dias, F., Ribeiro, F., e Silva, M. A. (2020) A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 122210. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122210

Santos, J., Pham, A., Stasinopoulos, P., e Giustozzi, F. (2021) Recycling waste plastics in roads : A life-cycle assessment study using primary data. Science of the Total Environment, 751, 141842. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141842

Qiao, Y.; Wen, X; Liu, S; Lv, S; He, L. (2025) Stochastic analysis for comparing life cycle carbon emissions of hot and cold mix asphalt pavement systems. Resources, Conservation & Recycling, v. 212, p. 107881, 2025.

Sukhija, M.; Coleri, E. (2025). A systematic review on the role of reclaimed asphalt pavement materials: insights into performance and sustainability. Cleaner Materials, v. 16, p. 100316, 2025.

United States Environmental Protection Agency. (2021) Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks. Obtido de https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks

Zhao, Y., Xie, S., Gao, Y., Zhang, Y., e Zhang, K. (2021) Prediction of the number of roller passes and degree of compaction of asphalt layer based on compaction energy. Construction and Building Materials, 277, 122274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122274

EFEITOS DA ESCOLHA DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE FATORES DE EMISSÃO DE CO_2 NAS DECISÕES DE PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO DE UM VIADUTO

Pedrina Vitória[1], Zila Mascarenhas[2], Kamilla Vasconcelos[1], Cássio Gomes de Oliveira[1], Vanderley M. John[1]
[1]Universidade de São Paulo, [2]Universidade Federal do Maranhão

RESUMO
Este estudo buscou analisar o impacto da escolha da base de dados de fatores de emissão na quantificação de emissões de CO_2 em um projeto de pavimentação de viaduto, utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A pesquisa comparou os resultados do *ecoinvent* e do SIDAC para a pegada de carbono das camadas de sub-base, base e revestimento da pavimentação. Os resultados mostraram que o *ecoinvent* apresenta valores maiores, atribuídos à inclusão de outros gases de efeito estufa. Além disso, verificou-se que é possível implementar estratégias de mitigação distintas ao utilizar cada uma das bases. Enquanto o *ecoinvent* favorece intervenções tecnológicas, o SIDAC propõe alteração da cadeia de suprimentos. O estudo conclui que a escolha da base de dados deve considerar a representatividade local, recomendando análises conjuntas e de sensibilidade para uma melhor tomada de decisão.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A construção de viadutos é uma atividade comumente realizada pelas concessionárias de rodovias para melhoria das vias de transporte. Assim, com a crescente busca por infraestruturas sustentáveis, faz-se necessária a avaliação ambiental precisa tanto para os projetos dos dispositivos quanto para os projetos de pavimentação, especialmente quanto à emissão dos gases de efeito estufa.

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é a metodologia mais utilizada para análise do desempenho ambiental, no entanto, ainda há um desafio crítico a ser cumprido na sua aplicação que é a influência da escolha da base de dados, que disponibilizam os fatores de emissão, nos resultados e nas estratégias de mitigação decorrentes. Neste estudo, foram avaliadas as bases de dados *ecoinvent*, internacional, comercial (necessária a compra de licença de uso), que possui ampla cobertura e reconhecimento, e o SIDAC (Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção), base de dados brasileira, aberta e desenvolvida para realidade local.

A literatura mostra que existem mudanças significativas entre os resultados de diferentes bases de dados para materiais de construção civil (Anyanya *et al*., 2025; Dong *et al*., 2023). No caso da pavimentação, as diferenças devem se acentuar devido às peculiaridades dos materiais asfálticos, que apresentam grande variabilidade regional nos processos produtivos.

Desse modo, este trabalho tem por objetivo avaliar diferentes estratégias de mitigação, propostas a partir do impacto da seleção da base de dados de fatores de emissão e da análise crítica da pegada de carbono do projeto de pavimentação do viaduto. A pesquisa se justifica pela escassez de estudos que abordem como essas diferenças metodológicas se traduzem em estratégias de mitigação, que dependem de dados representativos da realidade nacional para direcionar as ações de redução de forma eficaz.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Projeto da pavimentação

O projeto de pavimentação do viaduto contempla os acessos e o vão central. A estrutura do pavimento nos acessos é composta por três camadas: sub-base de solo melhorado com cimento, base de brita graduada simples (BGS) e revestimento de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ) (Figura 1a). Ressalta-se que a configuração da estrutura não abrange toda a extensão do projeto. Acima da laje de aproximação a estrutura não inclui a camada de sub-base (Figura 1b), enquanto sobre o vão central a pavimentação conta apenas com a camada de revestimento (Figura 1c).

2.2. Avaliação do ciclo de vida

2.2.1. Objetivo e definição do escopo

O objetivo desse estudo é avaliar o desempenho ambiental do projeto de pavimentação asfáltica usado na implantação de um viaduto. A análise foi realizada pela ACV com o uso de dados orçamentários da fase de projeto do empreendimento e composições unitárias de serviço.

A unidade declarada para o estudo foi “um projeto de pavimentação de viaduto”. Os limites do sistema abrangem a extração e o processamento das matérias-primas, correspondentes à fase A1 do ciclo de vida (Figura 2), conforme definido pela ISO 21931-2 (2019).

2.2.2. Inventário do ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida (ICV) foi feito combinando dados primários, coletados dos quantitativos do orçamento da pavimentação, a dados secundários de duas distintas bases de dados: *ecoinvent* versão 3.11,

sistema de alocação *cut-off*, e SIDAC (Tabela 1).

As bases de dados utilizadas apresentam diferenças significativas em termos de origem, acesso e forma de apresentação dos fatores de emissão. O *ecoinvent* é uma base de dados suíça, de acesso restrito, que disponibiliza dados com abrangência global e fornece fatores de emissão com valores determinísticos, embora também inclua informações sobre incertezas para análise mais aprofundada em *software*. Por outro lado, o SIDAC é uma base de dados brasileira, de acesso aberto, que apresenta os fatores de emissão em formato de faixas, com valores mínimos e máximos para cada categoria analisada.

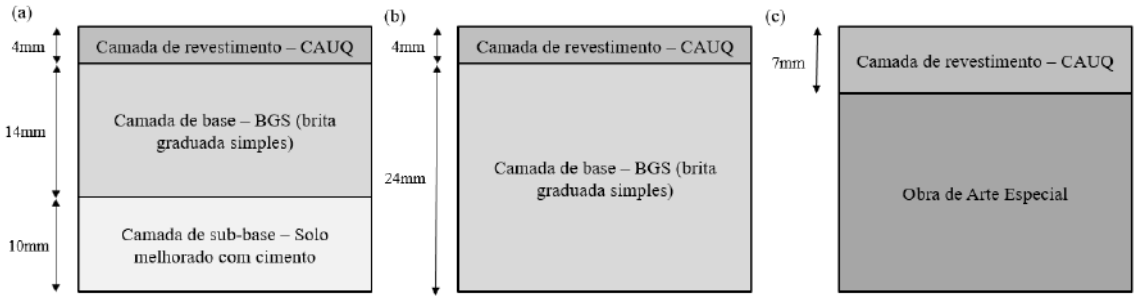


Figura 1: Estrutura do pavimento: (a) nos acessos, (b) na laje de aproximação e (c) no vão central.

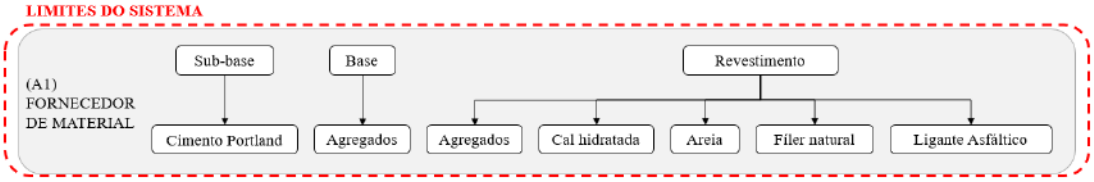


Figura 2: Limites do sistema.

Tabela 1: Lista de dados considerados no inventário.

Fase do ciclo de vida	Unidade do processo	Cenário 1: Ecoinvent 3.11	Cenário 2: SIDAC
Produção de agregados	Agregados	Gravel production, crushed | gravel, crushed | Cutoff, U - BR	Brita | Brita obtida pela cominuição de rocha, utilizada como agregado miúdo ou graúdo. Inclui pó de pedra e areia de britagem.
Produção de fíler	Fíler	Gravel production, crushed | gravel, crushed | Cutoff, U - BR	Fíler calcário | Fíler obtido pela moagem fina do calcário processado, utilizado como matéria-prima para produtos de construção
Produção de areia	Areia	Sand quarry operation, extraction from river bed | sand | Cutoff U - BR	Areia processada | Areia extraída de cava ou de rio, utilizada como agregado miúdo
Produção de ligante asfáltico	Ligante virgem	Pitch production, petroleum refinery operation | operation | pitch | Cutoff, U - BR	*Ecoinvent 3.11: Pitch production, petroleum refinery operation | operation | pitch | Cutoff, U - BR
Produção de cal hidratada	Cal Hidratada	Hydrated lime production, loose | hydrated lime, loose | Cutoff U - Row	Cal hidratada CH-I | Pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio. Atende as exigências químicas para CH-I conforme NBR 7175.
Produção de cimento	Cimento Portland	Cement production, CP II-E | cement, CP II-E | Cutoff U - BR	Cimento - CP II-E | Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno

*O SIDAC não apresenta dados de ligante asfáltico; o valor da Petrobras refere-se a $CO_{2\text{-eq}}$, sem determinar o percentual de CO_2.

2.2.3. Avaliação dos impactos do ciclo de vida

A avaliação da pegada de carbono (ABNT NBR ISO 14067/2023) foi realizada por meio do método do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) para calcular o potencial de aquecimento global das emissões de gases de efeito estufa, para o horizonte de 100 anos, expresso em kg de CO_2 equivalente ($CO_{2\text{-eq}}$), para o *ecoinvent*, e kg de CO_2 para o SIDAC, para toda a estrutura (IPCC, 2021). A ACV foi feita com o uso de planilha em Excel, considerando os fatores de emissão de cada base de dados por vez – resultando em dois cenários de análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Iniciando a análise pelos materiais (Figura 3), observa-se que os dados provenientes do *ecoinvent* apresentam, em média, valores absolutos de emissão de $CO_{2\text{-eq}}$ maiores em comparação com o SIDAC. Essa diferença é

atribuída à unidade de medida utilizada. O *ecoinvent* adota kg $CO_{2\text{-eq}}$, que incorpora os efeitos de outros gases de efeito estufa convertidos em CO_2 equivalente, enquanto o SIDAC considera apenas as emissões diretas de CO_2 (kg CO_2). No SIDAC não há informação das emissões associadas aos derivados de petróleo. Neste caso, para a pegada de carbono associada ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), foi utilizado o fator de emissão de CO_2 disponível no *ecoinvent*, correspondente a aproximadamente 60% das emissões totais de CO_2 equivalente ($CO_{2\text{-eq}}$) (Ecoinvent, 2023). Com isso, observa-se que a utilização de CO_2 como indicador de desempenho ambiental pode não ser representativo no caso da pavimentação asfáltica, já que os demais gases de efeito estufa, em especial o metano, possuem uma parcela significativa da emissão de $CO_{2\text{-eq}}$ (IPCC, 2023). Ressalta-se que a emissão mínima registrada para a areia média e os agregados no SIDAC foi considerada igual a zero devido à aproximação adotada na análise estatística realizada pelo sistema, que atribuiu valor nulo a resultados muito próximos de zero. Tal resultado não é representativo da realidade, visto que a atividade de extração de materiais naturais inevitavelmente gera emissões, mesmo que em pequena escala. Quanto à representatividade de cada material na emissão total, o Cimento Portland (utilizado na sub-base) aparece como o principal contribuinte para as duas bases de dados, seguido pelo CAP (utilizado no revestimento), cal hidratada (utilizada no revestimento) e agregados (utilizados na base e no revestimento).

A Figura 4 apresenta as massas de cada um dos materiais utilizados na pavimentação. Analisando conjuntamente a Figura 3 e a Figura 4 observa-se que a relação entre a massa dos materiais e suas respectivas pegadas de carbono não é diretamente proporcional. Os materiais granulares apresentam a maior massa empregada na obra, no entanto suas emissões de CO_2 são relativamente baixas quando comparadas ao cimento Portland e ao CAP, materiais que mesmo com massas inferiores, destacam-se como os principais contribuintes para as emissões totais, refletindo os elevados fatores de emissão associados aos processos de produção. Com isso, ressalta-se a importância de considerar não apenas a quantidade de material utilizado, mas também a pegada de carbono de cada insumo ao avaliar o impacto ambiental de projetos de infraestrutura.

Fazendo a análise por camada de pavimentação (Figura 5), observam-se padrões distintos entre as bases de dados. Quando considerados os dados do SIDAC, a sub-base e o revestimento apresentam as maiores contribuições para as emissões totais, respectivamente. Já na base *ecoinvent*, o revestimento sobressai como principal fonte emissora. A diferença de comportamento pode ser explicada pela composição de cada camada. Os materiais com maior contribuição na emissão do revestimento são o CAP, os agregados e a cal hidratada, respectivamente, que possuem fatores de emissão menores que o Cimento Portland, único material presente na sub-base e que possui maior emissão de CO_2 dentre os materiais utilizados.

Além disso, é importante ressaltar a importância de outros gases do efeito estufa, em destaque o metano, no fator de emissão do CAP, o qual não foi considerado no cenário do SIDAC. O metano é o principal gás emitido nas fases iniciais de extração de petróleo (produção e processamento), sendo responsável por 85% das emissões totais desse poluente (IEA, 2025). Embora sua emissão em massa seja inferior à do CO_2, o potencial de aquecimento global (GWP) é cerca de 28 vezes maior que do dióxido de carbono, no horizonte de 100 anos (IPCC, 2023). Nesse contexto, a inclusão do metano no inventário do *ecoinvent* resulta em uma maior contribuição da camada de revestimento. Em contraste, a base apresenta os menores níveis de emissão, resultado da sua composição predominantemente granular. Tais resultados permitem propor estratégias de mitigação direcionadas conforme a abordagem metodológica de cada inventário.

Iniciando a discussão na perspectiva do *ecoinvent*, é possível propor a incorporação de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) na mistura usinada a quente. A estratégia permite diminuir diretamente a demanda de CAP, material que corresponde a cerca de 40% das emissões desta camada. Além disso, a literatura mostra que o uso de RAP pode reduzir até 50% das emissões totais de misturas asfálticas (Mascarenhas *et al*., 2024; Boloni *et al.*, 2020; Bizarro *et al.*, 2021). Paralelamente, outras duas estratégias de mitigação podem ser a aplicação da reciclagem a frio e aumento da espessura da camada de base, medidas que poderiam ajudar na redução de consumo de cimento Portland nas camadas geotécnicas do pavimento. Também pode ser considerada a combinação das duas alternativas, pois mantém a resistência mecânica e pode reduzir em até 58% as emissões de gases de efeito estufa na fase A1 (Mascarenhas *et al.*, 2024).

O SIDAC, por sua vez, sugere uma abordagem baseada na cadeia de suprimentos, propondo a seleção criteriosa de fornecedores para os materiais com maior variabilidade de emissões a depender da origem, que neste estudo foram o cimento Portland e os materiais granulares. Tal recomendação é fundamentada na variabilidade geográfica existente nos fatores de emissão brasileiros devido, principalmente, aos processos produtivos desses materiais. Por exemplo, a seleção de um fornecedor de cimento Portland de menor impacto pode reduzir em até 23,96% a pegada de carbono total do pavimento deste viaduto. No caso dos materiais granulares, o tipo de rocha da pedreira também pode influenciar no fator de emissão, podendo chegar em até 49% a mais em emissão

de CO_2 (Bortoli *et al*., 2023). Cabe ressaltar que esse artigo traz a discussão das bases de dados apenas da fase A1, sendo também muito relevante atentar para a durabilidade dos materiais utilizados.

De maneira geral, observa-se que as duas perspectivas apresentam abordagens complementares para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa associados a pavimentação. O *ecoinvent* direciona as estratégias para melhorias tecnológicas e produtivas, já o SIDAC também destaca a gestão eficiente da cadeia de suprimentos, considerando as especificidades de cada região e a escolha criteriosa de fornecedores e materiais. Com isso, não se pode afirmar que uma base de dados é superior a outra, visto que ambas fornecem pontos de vista para a redução da pegada de carbono. No entanto, é inegável que a representatividade de dados brasileiros é melhor atendida pela base de dados SIDAC, mostrando a importância do levantamento de dados primários brasileiros. Assim, as estratégias comentadas podem ser adotadas de forma integrada ou individual, a depender das condições locais e dos recursos disponíveis.

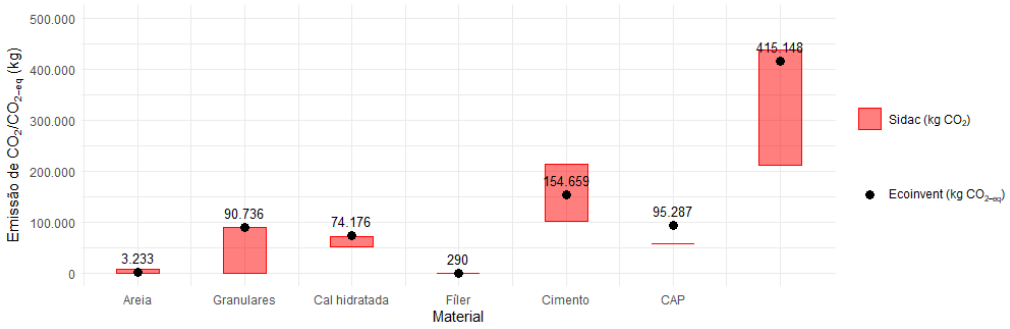


Figura 3: Emissão de CO_2 de cada um dos materiais para as duas bases de dados.

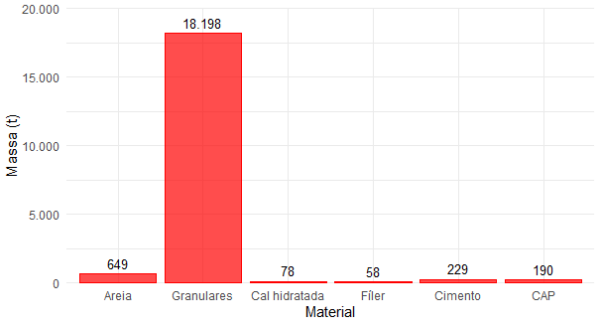


Figura 4: Massa dos materiais utilizados na pavimentação.

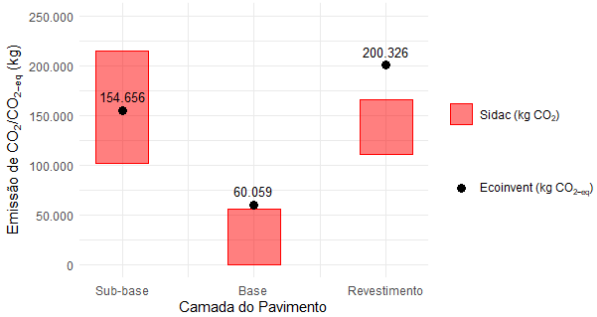


Figura 5: Emissão de CO_2 de cada camada da pavimentação.

3.1. Limitações do estudo

Alguns aspectos importantes não foram incluídos neste estudo, havendo algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Primeiro, não houve análise dos aspectos econômicos associados às estratégias de mitigação propostas. A adoção de uma medida para minimizar a emissão de CO_2 deve ser tomada considerando os custos de produção, que podem influenciar diretamente na viabilidade prática das soluções sugeridas. A análise de custo de carbono evitado traz uma visão abrangente da aplicabilidade das medidas em diferentes cenários.

Além disso, a ausência de dados nacionais específicos para o ligante asfáltico no SIDAC levou a adoção do dado proveniente do *ecoinvent*, considerando apenas a emissão de CO_2 (kg CO_2). A Petrobras possui fator de emissão apenas em kg $CO_{2\text{-eq}}$, o que impossibilitou sua utilização no cenário SIDAC, por não especificar a porcentagem de CO_2 (Petrobrás, 2025). Apesar de o dado europeu estar adaptado para a matriz energética brasileira, essa abordagem pode não refletir com precisão as particularidades do processo de produção do CAP no Brasil, como o tipo de petróleo utilizado e a forma de exploração e refino. Assim, essa adoção representa uma importante fonte de incerteza na pesquisa, que pode afetar a representatividade dos resultados.

Por fim, o estudo restringiu-se a fase A1, que considera apenas o fornecimento das matérias-primas. Contudo, reconhece-se que as demais fases do ciclo de vida, em especial transporte e execução, exercem impacto significativo na pegada de carbono.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados encontrados pelo SIDAC e pelo *ecoinvent* mostra que cada uma das abordagens

apresenta vantagens e limitações que devem ser considerados conforme o contexto. O SIDAC destaca-se pela representatividade de dados brasileiros, conforme a matriz energética e os processos produtivos locais, e reforça a existência de variabilidade dos dados devido às diferenças tecnológicas e geográficas do país. Em contrapartida, o *ecoinvent*, mesmo com reconhecimento internacional da confiabilidade dos dados, ainda carece de especificidade para os cenários do Brasil, o que pode não refletir em resultados de acordo com a realidade local e, consequentemente, dificultar a definição de metas precisas para a redução de emissões. Destaca-se, ainda, a importância da contabilização dos demais gases contribuintes ao efeito estufa, dada a relevante participação nos valores de $CO_{2\text{-eq}}$ para os derivados de petróleo, o que pode impactar significativamente os resultados. Por fim, recomenda-se criticidade e integração, e até mesmo a possibilidade de uso combinado das bases com a realização de análises de sensibilidade, buscando garantir resultados mais alinhados às especificidades locais. Assim, as diferenças metodológicas são encaradas como ferramentas complementares, favorecendo estratégias de mitigação mais eficazes e contextualmente adequadas.

Agradecimentos
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Grupo Arteris.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anyanya, D.; Paulillo, A.; Fiorini, S. e Lettieri, P (2025) Evaluating sustainable building assessment systems: a comparative analysis of GBRS and WBLCA. *Front. Built Environ*. 11:1550733. doi: 10.3389/fbuil.2025.1550733

Bizarro, D.E.G.; Steinmann, Z.; Nieuwenhuijse, I.; Keijzer, E. e Hauck, M. (2021) Potential Carbon Footprint Reduction for Reclaimed Asphalt Pavement Innovations: LCA Methodology, Best Available Technology, and Near-Future Reduction Potential. *Sustainability*, v. 13, p. 1382. doi:10.3390/su13031382

Boloni, A.; Degli Esposti, A. e Magrini, C. (2020) A Case Study of Industrial Symbiosis to Reduce GHG Emissions: Performance Analysis and LCA of Asphalt Concretes Made With RAP Aggregates and Steel Slags. *Front. Mater*. doi: 10.3389/fmats.2020.572955

Bortoli, A. (2023) Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, v. 415, p. 137629. doi:10.1016/j.jclepro.2023.137629

Dong, Y.; Yang, T.; Liu, P. e Xu, Z. (2023) Comparing the Standards of Life Cycle Carbon Assessment of Buildings: An Analysis of the Pros and Cons. *Buildings*, v. 13, p. 2417. doi:10.3390/buildings13102417

Ecoinvent - Data with purpose. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>. Acesso em: 6 mai. 2025.

IEA. (2025) Global Methane Tracker 2025. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 9 set. 2025

IPCC. (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi:10.1017/9781009157896.001

Liu, Y.; Liu, Z.; Zhu, Y. e Zhang, H. (2024) A Review of Sustainability in Hot Asphalt Production: Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption. *Appl. Sci*., v. 14, p. 10246. doi:10.3390/ app142210246

Mascarenhas, Z. M. G.; Piao, Z.; Vasconcelos, K.; Poulikakos, L. D.; Bernucci, L. B. (2023) Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. *Science of The Total Environment*, v. 858(2). doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159862.

Mascarenhas, Z. M. G.; Vasconcelos, K.; Guatimosim, F. V.; Silva, R. C.; Linhares, G. e Romero Júnior, C. L. S. (2024). Impactos da reciclagem profunda in situ no desempenho ambiental da restauração de pavimentos asfálticos. in: *Anais do 38º congresso de pesquisa e ensino em transportes, 2024, Florianópolis. Anais eletrônicos..., Galoá*. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/impactos-da-reciclagem-profunda-in-situ-no-desempenho-ambiental-da-restauracao-d?lang=pt-br> Acesso em: 10 jun. 2025.

ISO 21931-2:2019 — Sustentabilidade em edificações e obras de engenharia civil: estrutura para métodos de avaliação do desempenho ambiental de obras de construção – Parte 2: Obras de engenharia civil. Genebra: ISO, 2019. 48 p.

Petrobras/Clima. (2025, agosto). *Encontro de Asfalto*. Apresentado por Montserrat Carbonell.

Smith, C., Gasser, T., Nicholls, Z., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., Watanabe, M., Pirani, A., Connors, S., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., Maycock, T., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., e Zhou, B. (2021) The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material.

Thibes, L. P. e Ghisi, E. (2017) Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 473-484. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.087

Pedrina Vitória (pedrinavitoria@usp.br)
Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, Departamento de Eng. de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 83, Cidade Universitária - São Paulo, SP, Brasil

GEOSSINTÉTICOS E RESÍDUOS DE BRITAGEM NA ESTABILIZAÇÃO DE SUBLEITOS: UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

João Pedro de Oliveira Alves Neto[1], Antonio Peroba de Oliveira Teodoro[1], Raimundo Nonato da Costa Neto[1], Nicole Hansen[1], Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa[2], Jefferson Lins da Silva[1]
[1]Universidade de São Paulo (USP), [2]Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)

RESUMO
Este artigo propõe uma avaliação técnica do uso de resíduos do processo de britagem de pedreira incorporados ao solo, aplicando-se um método de dimensionamento de estradas não pavimentadas com geossintéticos. O método utilizado permite estimar a espessura do reforço em função das cargas aplicadas, características do subleito e da camada granular. Foram realizadas as caracterizações física e mecânica do solo, do resíduo e de três misturas solo-resíduo, sendo que os resíduos calcários apresentaram comportamento mecânico compatível com os requisitos para aplicação em camadas de reforço de subleito com geossintéticos, podendo contribuir para o aumento da vida útil da via e redução de custos. Conclui-se que o aproveitamento destes resíduos representa uma alternativa viável e sustentável para a infraestrutura de transportes, com potencial de aplicação de geossintéticos em pavimentação de baixo custo, especialmente em regiões com déficit logístico e abundância de materiais provenientes de mineração e do processo de britagem.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a pesquisa realizada anualmente no Brasil pela Confederação Nacional do Transporte, CNT (2024), com dados de 2024, a malha brasileira se estende por mais de 1,5 milhão de quilômetros. Entretanto, somente 12,4%, o que corresponde a 213,5 mil quilômetros de estradas são pavimentadas. As vias não pavimentadas totalizam cerca de 1,4 milhão de quilômetros, representando 78,5% da extensão da malha. O investimento em infraestrutura rodoviária e urbana é fundamental para o desenvolvimento da sociedade. Por outro lado, a geração de resíduos decorrentes da atividade humana constitui um problema constante desde a formação das primeiras comunidades. A gestão adequada desses resíduos tem ganhado maior relevância, especialmente em razão dos impactos provocados pelo crescimento populacional das últimas décadas e, consequentemente, pelo aumento na quantidade de resíduos gerados em diversos setores produtivos.

O descarte incorreto de resíduos pode comprometer a saúde pública e o meio ambiente, além disso, sua destinação final utiliza o limitado espaço físico. Logo, soluções ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis que permitam destinar de forma segura ou reutilizar esses resíduos estão sendo implementadas para minimizar esses problemas (Alencar, 2022).

De acordo com Peddaiah *et al*. (2018), a utilização de geossintéticos como elemento de reforço para solos com baixa capacidade de suporte, melhorando seu desempenho mecânico, é uma forma de aproveitar estes materiais de modo significativo. Aplicações na estabilização de solos para camadas de pavimentos, reforços para aterros e para reduzir o recalque de solo em fundações são alguns exemplos de melhorias proporcionadas pelo uso de geossintéticos.

Segundo Alencar (2022), a procura pela utilização de materiais nobres em construções pode gerar impactos negativos e significativos ao meio ambiente. Sendo assim, a necessidade de desenvolvimento de técnicas que permitam a utilização sustentável de resíduos é cada dia mais bem vista pela engenharia de construção civil.

Assim, o artigo buscou analisar as espessuras resultantes do dimensionamento com materiais como solo e misturas de solo de subleito com adição do resíduo denominado de "bica corrida", proveniente da britagem de agregados, em diferentes teores para o uso em camada de estradas não pavimentadas reforçadas com inclusão de geossintéticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O solo analisado foi coletado e caracterizado conforme os ensaios estabelecidos nas normas técnicas brasileiras vigentes. Também foi utilizado resíduo de britagem denominado “bica corrida”, proveniente da região de Cuiabá-MT, com a finalidade de compor misturas com o solo com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas.

2.2. Caracterização do solo e resíduo

A caracterização do solo e do resíduo foi realizada de acordo com as normas técnicas brasileiras vigentes. Inicialmente, efetuaram-se ensaios de sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT, 2025a). Na Figura 01, é

possível observar a distribuição granulométrica do solo e do resíduo.

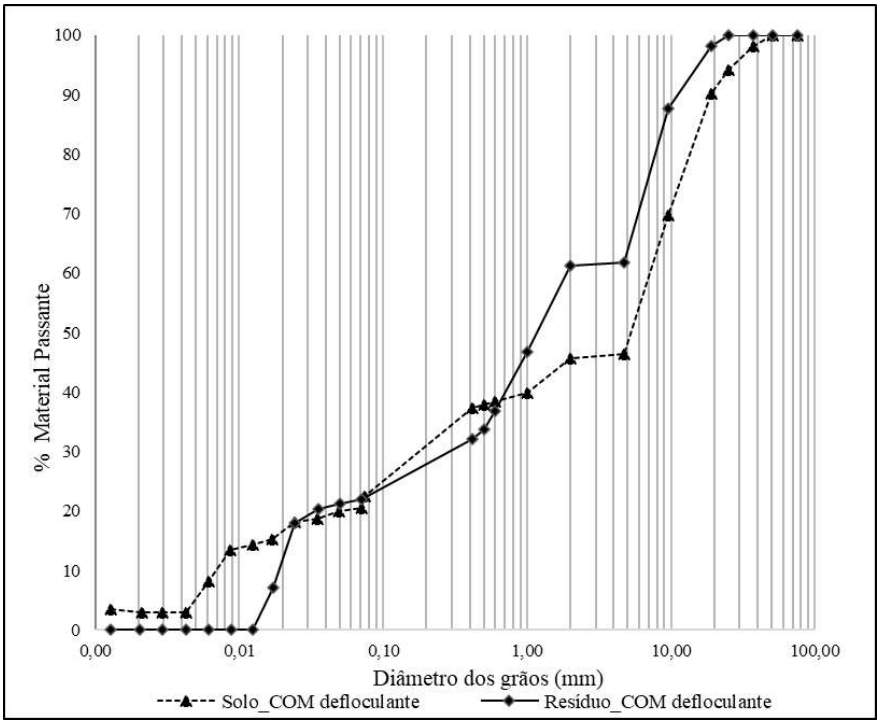


Figura 01: Curvas granulométricas do solo e do resíduo, com ensaio de sedimentação realizado com o uso de defloculante.

Os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) foram obtidos segundo as normas NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2016), possibilitando o cálculo do índice de plasticidade (IP), conforme a Tabela 01.

Tabela 01: Índice de Atterberg dos materiais.

MATERIAL	LL (%)	LP(%)	IP(%)
Solo	26	18	8
Resíduo	23	19	4

A classificação do solo foi realizada conforme os critérios do sistema do *Transportation Research Board* (TRB), resultando em sua identificação como A-2-4. Para verificar a natureza laterítica, foi aplicado o Método das Pastilhas, conforme proposto por Fortes, Merighi e Zuppolini Neto (2002), enquadrando o solo na faixa NA'-NS', o solo está compreendido entre arenoso não laterítico e siltoso não laterítico.

2.3. Ensaios de compactação, CBR e mistura com resíduo de britagem

Os ensaios de compactação foram conduzidos segundo a NBR 7182 (ABNT, 2025b), utilizando energia de compactação intermediária. A umidade higroscópica das amostras foi determinada pelo método expedito do álcool (DNER_ME, 1994), com valor de 2,5%. As amostras foram preparadas 24 horas antes dos ensaios em cilindro grande, devido à retenção de partículas na peneira de 4,8 mm, e a umidade foi aferida por estufa durante os ensaios.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados por meio do índice CBR (*California Bearing Ratio*), de acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2017b). As amostras foram compactadas utilizando energia normal. Para melhorar às propriedades mecânicas foram preparadas misturas do solo contendo diferentes proporções, em massa, de resíduo de britagem "bica corrida", nas proporções de 20% e 35%.

2.4. Dimensionamento com método empírico

Para fins de dimensionamento teórico das espessuras da estrutura de uma estrada não pavimentada, com e sem a utilização de geossintéticos, adota-se um método empírico. Considera-se que o material do subleito assume

comportamento semelhante ao de solos de baixa permeabilidade, em condições de saturação, típico em projetos de estradas não pavimentadas sujeitos a carregamentos rápidos impostos pelo tráfego. Considerando o modelo simplificado proposto por Giroud e Noiray (1981), assume-se que a resistência ao cisalhamento não drenada do subleito (Su) é equivalente à sua coesão não drenada (cu), admitindo-se que a contribuição do atrito interno seja desprezível. Assim, estabelece-se a seguinte relação empírica:

$$Su = cu = 30000 \cdot CBR \qquad (1)$$

Neste contexto do dimensionamento, conforme apresentado por Palmeira (2018), considerando casos com e sem geossintéticos, o subleito foi constituído por misturas de solo com resíduo de britagem, nas proporções de 20% e 35%. Para fins de análise, foram adotadas condições com e sem reforço para um afundamento de trilha de rodas igual a 0,3 m, 100 passagens de caminhão com carga por eixo simples de 80 kN e pressão de calibragem de 480 kPa. Considerando o volume de tráfego foi utilizado um geossintético para reforço com característica de reforço com rigidez à tração (J) igual a 200 kN/m. As propriedades dos materiais, incluindo os valores de CBR, expansão e resistência não drenadas (Su), estão apresentadas na Tabela 02.

Tabela 02: Dados para o dimensionamento.

CASOS	MATERIAL	CBR (%)	EXPANSÃO(%)	Su (kPa)
1	Solo	19	0,2	5,7
2	Solo + 20% de resíduo	17	0,2	5,1
3	Solo + 35% de resíduo	11	0,08	3,3

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método de Giroud e Noiray (1981), permite o dimensionamento prático e empírico da espessura mínima da camada de reforço com ou sem geossintéticos em estradas não pavimentadas. A partir dos dados apresentados na Tabela 02, foram determinadas as espessuras correspondentes, conforme indicado na Tabela 03, espessura mínima da camada sem reforço (h_0), redução na espessura da camada de reforço com geossintético (Δh), espessura final da camada quando considerado o reforço (h), e deformação no reforço (ε). Neste estudo, a deformação no reforço foi adotada conforme os valores indicados por Giroud e Noiray (1981), obtidos a partir do gráfico de referência desenvolvido pelos autores, que relaciona a rigidez à tração do geossintético (J) com as condições de carregamento de estradas não pavimentadas.

Tabela 03: Resultados do dimensionamento.

CASOS	MATERIAL	J (kN/m)	h0 (m)	Δh (m)	h (m)	ε (%)	Redução
1	Solo	200	0,52	0,35	0,17	5,88	67%
2	Solo + 20% de resíduo	200	0,72	0,37	0,35	7,88	51%
3	Solo + 35% de resíduo	200	0,95	0,45	0,50	8,50	47%

O caso 1 apresentou a menor espessura necessária com o uso de geossintético, além da maior redução relativa da espessura granular em comparação ao cenário sem reforço. No caso 2, observou-se um aumento de 0,18 m na espessura com o reforço, com uma redução de 51% na espessura. Já no caso 3, a espessura com reforço foi de 0,50 m, valor superior aos observados nos casos 1 e 2. Esses resultados indicam que diferentes teores de resíduo impactam no dimensionamento das espessuras com e sem o uso de geossintético.

Verifica-se que as misturas com maiores teores de resíduo exigem espessuras maiores, acarretando no aumento da deformação no reforço. O aumento nas espessuras das camadas pode ser justificado pela análise da Figura 01, na qual se verifica que o resíduo apresenta uma distribuição granulométrica com variações em patamares que indica a ausência e descontinuidades de alguns tamanhos de grãos. A curva de granulometria do solo apresenta graduação com descontinuidade das partículas correspondente a diâmetros intermediários. Esse comportamento é acentuado pela distribuição do resíduo de britagem, que apresenta variações em patamares e limitada diversidade de tamanhos de grãos.

Diante disso, recomenda-se a realização de correção granulométrica, por meio da adição controlada de partículas intermediárias, com o objetivo de melhorar o empacotamento dos grãos e, consequentemente,

aprimorar as propriedades mecânicas das misturas solo–resíduo, especialmente em aplicações voltadas à estabilização de camadas de pavimentos.

No Caso 3, embora tenha sido necessária uma maior espessura da camada com reforço, observa-se, conforme a Tabela 02, que a mistura com 35% de resíduo promoveu uma redução significativa na expansão do solo. Ressalta-se que, assim como nos demais casos analisados, os critérios estabelecidos pelo DNIT (2006) para materiais de subleito — expansão inferior ou igual a 2% e CBR maior ou igual a 2% — foram atendidos. Esses resultados evidenciam o potencial técnico das misturas solo–resíduo para aplicação em camadas de pavimentos, ao mesmo tempo em que promovem o reaproveitamento sustentável de resíduos de britagem em obras de infraestrutura viária, contribuindo para a redução de impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais.

Os resultados deste estudo corroboram a literatura que aponta a viabilidade da incorporação de resíduos em pavimentação. Oda et al. (2024) verificaram que o uso de rejeito de mineração em misturas solo–cimento para camadas de base e sub-base reduz o consumo de recursos naturais e de cimento, mantendo desempenho mecânico compatível com as normas técnicas. Por outro lado, Andalício (2020), em trecho experimental da BR-040, observou que a utilização de altos teores de resíduo pode comprometer a resistência estrutural, ressaltando a importância de uma dosagem criteriosa.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo analisou o comportamento de misturas de solo com diferentes teores de resíduo de britagem aplicadas em subleitos de estradas não pavimentadas, considerando cenários com e sem a utilização de geossintéticos. Os resultados, obtidos por meio do método empírico de dimensionamento proposto por Giroud e Noiray (1981) e Palmeira (2018), evidenciaram que a incorporação de geossintéticos contribui de forma significativa para a redução da espessura da camada granular requerida, mesmo em situações nas quais a presença do resíduo compromete parcialmente o desempenho mecânico do solo.

A maior eficiência na economia de espessura foi observada no Caso 2, com teor de 20% de resíduo, resultando em uma redução de até 51% em relação à estrutura sem reforço, superando inclusive o desempenho do Caso 1.

De forma geral, conclui-se que, apesar das limitações mecânicas observadas nas misturas com teores mais elevados de resíduo, a combinação de solo com resíduo de britagem, associada ao uso de geossintéticos, configura-se como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para o reforço de estradas não pavimentadas. Além de contribuir para a melhoria da infraestrutura viária, essa solução oferece uma destinação apropriada para resíduos da atividade de britagem, com benefícios econômicos e ambientais relevantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas e pelo apoio financeiro à pesquisa (CNPq/FNDCT/MCTI: Processo 405594/2022-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alencar, V. L. L. Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/49507. Acesso em: 03 jun. 2025.

ABNT (2017a). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2016). NBR 7180: Solo – Determinação do índice de plasticidade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2025a). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2025b). NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2017b). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANDALICIO, A. F. Proposta de pavimento flexível com a utilização de resíduos de mineração – execução e análise de um trecho experimental. Dissertação de Mestrado—Ouro Preto - MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.

CNT (2024). Confederação Nacional dos Transportes. PESQUISA CNT de Rodovias, 2024. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/. Acesso em: 03 jun. 2025.

DNIT (2006). Manual de pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Fortes, R. M.; Merighi, J. V.; Zuppolini Neto, A. Método das pastilhas para identificação expedita de solos tropicais. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, Lisboa. Anais... Lisboa: [s.n.], 2002.

Giroud, J. P.; Noiray, L. Geotextile-reinforced unpaved road design. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v. 107, n. GT9, p. 1233–125, 1981.

ODA, S. et al. Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. Matéria (Rio de Janeiro), v. 29, n. 2, 2024.

Palmeira, E. M. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

Peddaiah, S.; Burman, A.; Sreedeep, S. Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. Geotechnical and Geological Engineering, v. 36, n. 5, p. 2907–2920, 2018.

João Pedro de Oliveira Alves Neto (jpalvesneto@usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

Antonio Peroba de Oliveira Teodoro (antonio.teodoro@usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

Raimundo Nonato da Costa Neto (raimundoneto25@usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

Nicole Hansen (nikehansen123@gmail.com.br)
Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa (fabiani.barbosa@ufmt.br)
Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Engenharia, Campus Várzea Grande, Av. Fernando Correa da Costa, 2367 – Boa Esperança, Cuiabá – MT, 78060-900, Brasil.

Jefferson Lins da Silva (jefferson@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS À QUEIMA DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS NA USINAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza[1], Marcela Maria Toscano Krau[3], Ricardo Schroder Teixeira[1], Luis Alberto Herrmann do Nascimento[2], Francisco Thiago Sacramento Aragão[1]
[1]COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]PETROBRAS, [3]Technische Universität Braunschweig

RESUMO
Este artigo analisa a influência do consumo de combustível na fase de produção (usinagem) de misturas asfálticas sobre seu perfil ambiental. O estudo compara 11 tipos de misturas asfálticas, abrangendo quatro casos que variam o tipo de combustível e a tecnologia de produção (misturas a quente convencional e com borracha; misturas mornas convencional e com borracha). Dados primários de consumo de combustível foram utilizados para inventariar os fluxos e calcular os impactos ambientais, com foco no consumo primário de energia. Os resultados indicam que as tecnologias de mistura morna podem reduzir o consumo de energia em até 37% em comparação com as misturas a quente. O gás natural demonstrou ser o combustível com menor pegada de carbono, enquanto as misturas com adição de borracha exigiram maior aporte energético. Dessa forma, a escolha do combustível e da tecnologia de usinagem são fatores críticos para a melhor eficiência energética no processo.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pavimentação asfáltica é um pilar da infraestrutura de transportes, porém sua produção é caracterizada por um intensivo consumo de energia e de recursos naturais. A fase de usinagem, onde os agregados e o ligante asfáltico são aquecidos e misturados, destaca-se como um "hotspot" energético, sendo responsável por uma parcela significativa da pegada de carbono do produto final, como detalhado em estudos específicos sobre a produção no Brasil (SAVIETTO, 2017). O combustível utilizado no secador/misturador da usina é o principal insumo energético dessa fase, e sua combustão libera diretamente Gases de Efeito Estufa (GEEs).

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), normatizada pela série ISO 14040 e cujo framework para pavimentos é detalhado por instituições como a Federal Highway Administration (HARVEY et al., 2014), surge como a principal ferramenta para quantificar de forma holística os impactos ambientais de um produto. Diferentes tecnologias, como as Misturas Asfálticas Mornas (Warm Mix Asphalt, WMA, em inglês), prometem reduções no consumo de combustível e, consequentemente, nas emissões, um fato corroborado por relatórios da indústria (NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2016). Adicionalmente, a matriz energética da usina, como a escolha entre diferentes óleos combustíveis e o gás natural, possui um papel igualmente crucial.

O SimaPro é uma ferramenta amplamente utilizada para a ACV e permite a integração de dados primários, quando disponíveis, com dados secundários provenientes de bases de dados confiáveis, para criar inventários detalhados do ciclo de vida e avaliações de impacto (MEDINA et al., 2025). A Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) tem como objetivo analisar os fluxos elementares presentes no inventário sob a forma de pegadas ou impactos ambientais.

Este artigo estudou o processo de AICV de acordo com a EN 15804 (EN 15804 +A2 Method V1.00/EF 3.0 normalization and weighing set) (BS, 2019) e tem como objetivo quantificar e comparar os impactos ambientais associados ao consumo de combustível em diferentes cenários de produção de misturas asfálticas. A análise se concentra em isolar a variável combustível (tipo e quantidade) para demonstrar sua influência direta nos resultados da ACV, fornecendo subsídios técnicos para decisões mais sustentáveis no setor de pavimentação.

2. METODOLOGIA

O presente estudo baseia-se na análise comparativa de dados reais de usinagem de misturas asfálticas produzidas com diferentes tecnologias e fontes energéticas. Foram avaliadas misturas classificadas como convencionais, mornas e com adição de borracha, produzidas com quatro tipos distintos de combustíveis: óleo de xisto, gás natural, óleo BPF e óleo BPF aditivado com CAPSOLV.

2.1. Objetivo e Escopo

O objetivo da pesquisa é avaliar a eficiência energética e o impacto ambiental da fase de usinagem de misturas

asfálticas, focando no consumo de diferentes combustíveis e tecnologias de produção. Além disso, ao conduzir uma ACV, a definição da Unidade Declarada (UD) refere-se à quantidade específica de um produto ou serviço, como determinado ou declarado no estudo. Neste estudo, a UD estabelecida é de 1 tonelada métrica de uma mistura asfáltica produzida, que é composta por agregados, ligante asfáltico e outros elementos, como aditivos e material reciclado.

2.2. Desenvolvimento da ACV

As informações foram coletadas durante a etapa de usinagem em usinas de produção asfáltica, registrando-se a temperatura média de produção (°C) e o consumo específico de combustível por tonelada de mistura produzida (L/t ou Kg/t) para quatro diferentes cenários e usinas asfálticas diferentes, com variados tipos de misturas asfálticas, como mostra a Tabela 1.

O processo de produção da mistura asfáltica inicia-se com a descarga individual dos agregados em cada um dos silos envolvidos (dependendo da configuração da usina). Esses silos contêm os agregados que são utilizados na produção da mistura. Os agregados são colocados em uma esteira, seguindo as quantidades programadas no traço da mistura, e seguem até o secador e, posteriormente, o misturador. Em paralelo, é realizada a adição do ligante asfáltico, que está armazenado em tanques na usina. O ligante asfáltico é aquecido a uma temperatura especificada em projeto e então é bombeado para o misturador. O tipo de combustível que alimenta a usina varia de acordo com o cenário considerado.

Tabela 1: Consumo real de combustível por tonelada de mistura asfáltica produzida

Mistura	Tipo da Mistura	Temperatura (°C)	Consumo	Unidade	Combustível
HBM1	Asfalto borracha (quente)	177,68	9,69	L/t	Óleo de xisto
HM1	Quente convencional	166,18	6,92		
WBM1	Asfalto borracha (morno)	152,39	5,84		
WM1	Morna convencional	133,93	5,09		
HM2	Ligante convencional (quente)	167,28	4,66	Kg/t	Gás natural
WM2	Ligante convencional (morna)	125,44	3,17		
HM3	Ligante convencional (quente)	169,90	6,38	Kg/t	Óleo BPF
WM3	Ligante convencional (morna)	137,80	4,84		
HBM4	Asfalto borracha (quente)	180,00	4,78	Kg/t	Óleo BPF
HM4	Ligante convencional (quente)	165,00	4,44		
WM4	Ligante convencional (morna)	132,00	3,65		

2.3. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A AICV tem como objetivo analisar os fluxos elementares presentes no inventário sob a forma de pegadas ou impactos ambientais. Nesta etapa, o ICV é convertido em estimativas sistemáticas dos impactos ambientais, que são ponderadas e avaliadas com base em indicadores analíticos. O inventário foi construído com base nos dados primários de consumo de combustível para cada cenário e está apresentado na Tabela 2. A base de dados utilizada foi o Ecoinvent v3.9.1.

Tabela 2: Inputs para o SimaPro

Combustível	Input	Base de Dados
Óleo de Xisto	*Heat, central or small-scale, other than natural gas {BR}| heat production, light fuel oil, at boiler 100kW condensing, non-modulating | Cut-off, U*	Ecoinvent v3.9.1
Gás Natural	*Heat, central or small-scale, natural gas {RoW}| market for heat, central or small-scale, natural gas | Cut-off, U*	
Óleo BPF	*Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}| heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW | Cut-off, U*	

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise conjunta das influências das variáveis temperatura de produção, consumo e tipo de combustível nos impactos ambientais da Fase A3 permite observar padrões consistentes no comportamento das diferentes misturas asfálticas. Os resultados normalizados apresentados no gráfico radar da Figura 1 permitem uma análise comparativa entre os diferentes tipos de mistura asfáltica. Além disso, os dados podem ser melhor identificados na Tabela 3 correspondente.

Tabela 3: Impactos ambientais por tonelada de mistura asfáltica - Fase A3

Categoria de impacto	Unid.	Impacto por tonelada de mistura produzida										
		HBM1	HM1	WBM1	WM1	HM2	WM2	HM3	WM3	HBM4	HM4	WM4
Acidificação	mol H+ eq	9.9E-02	8.1E-02	7.4E-02	6.9E-02	2.0E-02	1.5E-02	1.9E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.4E-01	1.1E-01
Mudança climática	kg CO2 eq	3.9E+01	2.9E+01	2.5E+01	2.2E+01	2.3E+01	1.6E+01	2.8E+01	2.2E+01	2.1E+01	2.0E+01	1.6E+01
Toxicidade humana (cancerigena)	CTUh	1.3E-09	9.3E-10	8.0E-10	7.2E-10	2.2E-09	1.5E-09	7.0E-09	5.4E-09	5.2E-09	4.9E-09	4.0E-09
Destruição do ozônio	kg CFC11 eq	1.7E-06	1.2E-06	1.1E-06	9.4E-07	4.3E-07	3.0E-07	3.9E-07	3.0E-07	2.9E-07	2.7E-07	2.3E-07
Formação fotoquímica de ozônio	kg NMVOC eq	1.1E-01	9.6E-02	8.9E-02	8.4E-02	4.1E-02	2.8E-02	8.3E-02	6.5E-02	6.3E-02	5.8E-02	4.8E-02
Uso de recursos (fósseis)	MJ	5.3E+02	4.0E+02	3.5E+02	3.1E+02	3.2E+02	2.2E+02	3.4E+02	2.6E+02	2.5E+02	2.4E+02	2.0E+02

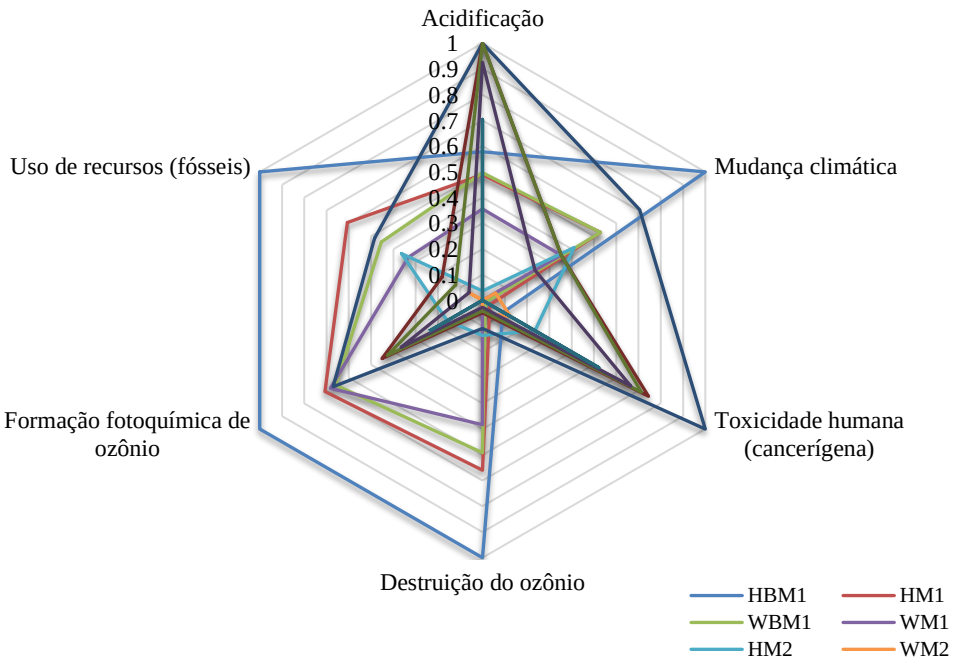


Figura 1: Gráfico normalizado dos impactos ambientais calculados

As misturas HBM1 e HM3 exibiram os maiores valores normalizados, tanto de temperatura quanto de consumo de combustível, o que se reflete diretamente em seus elevados impactos nas categorias de mudança climática, uso de recursos fósseis e acidificação. Tais resultados corroboram a literatura, que destaca a influência direta do processo térmico na geração de emissões associadas à queima de combustíveis fósseis (HUDAK et al., 2021).

Por outro lado, misturas como WM2 e WM4, que operam em temperaturas mais baixas e apresentam menores consumos energéticos, também se destacam como aquelas com menor carga ambiental. Em especial, a mistura WM2, que utiliza gás natural como combustível e opera a apenas 125 °C, apresentou os menores impactos em todas as categorias, além de consumir menos de um terço do combustível em comparação com HBM1. Isso confirma a eficácia de tecnologias de mistura morna aliadas ao uso de combustíveis menos emissivos como estratégias sustentáveis para o setor (SHAH et al., 2025).

Outro ponto relevante é a influência do tipo de combustível. As misturas que utilizam óleo de xisto e óleo BPF apresentaram impactos ambientais superiores em categorias associadas à toxicidade humana e à formação fotoquímica de ozônio. Estudos anteriores sugerem que combustíveis pesados geram subprodutos da combustão que intensificam o impacto dessas categorias (LI et al., 2019). O uso do gás natural, por outro lado, resultou nos menores impactos em quase todas as categorias. Além de apresentar os valores mais baixos de CO_2 eq, acidificação e uso de recursos fósseis, também registrou os menores níveis de destruição da camada de ozônio ($3{,}47\times10^{-7}$ kg CFC11 eq) e formação de ozônio fotoquímico (0,035 kg NMVOC eq). Isso confirma sua reputação como um combustível de transição mais limpo e apropriado para processos térmicos industriais sob a ótica ambiental, dentre os cenários estudados.

No que diz respeito aos números absolutos, o maior impacto foi observado na mistura HBM1 (39 kg CO_2 eq/ton). Isso está associado ao uso de óleo de xisto em temperatura elevada. As menores emissões foram registradas para WM2 e WM4, ambas com 16 kg CO_2 eq/ton, reforçando a vantagem do gás natural e da tecnologia de mistura morna. A substituição de combustíveis mais emissores por gás natural pode representar uma redução de até 59% nas emissões de CO_2 eq. Dessa forma, os resultados reforçam que a eficiência energética, determinada tanto pela temperatura de produção quanto pelo tipo e pelo consumo de combustível, está fortemente associada à performance ambiental das misturas asfálticas. A incorporação de misturas mornas e uso de combustíveis menos poluentes e de temperaturas reduzidas se configura como a estratégia mais

promissora na mitigação de impactos na fase A3 da ACV.

4. CONCLUSÕES

Este estudo evidenciou a importância da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta para a mensuração dos impactos ambientais da pavimentação asfáltica, com ênfase na fase A3 - usinagem, além de mostrar a importância do tipo e da quantificação do consumo de combustíveis utilizados no processo de usinagem. A análise comparativa entre diferentes tecnologias de mistura e tipos de combustíveis mostrou que variáveis como temperatura de produção e matriz energética exercem influência significativa sobre o desempenho ambiental das misturas.

Os achados reforçam que a substituição de combustíveis fósseis mais poluentes, como óleo BPF e óleo de xisto, por fontes mais limpas como o gás natural, combinada com o uso de tecnologias de mistura morna, pode reduzir substancialmente os impactos ambientais associados à produção de misturas asfálticas. A adoção dessas estratégias, que já apresentam viabilidade técnica, pode contribuir para a redução da pegada de carbono do setor de pavimentação e para o cumprimento de metas ambientais nacionais e internacionais. Assim, a integração entre inovação tecnológica e planejamento energético se mostra essencial para a promoção de uma infraestrutura de transportes mais sustentável.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Cenpes/Petrobras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BS EN 15804/2019, *Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products*, v. 72, European Committee for Standardization.

EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021 Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Basic rules for the product category construction products.

Harvey, J.; Meinhardt, M.; Wu, R.; Monteiro, P.; Benz, D.; Van Dam, T. Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document. Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA), 2014. (FHWA-HIF-15-002).

Hudak, A. et al. (2021). Environmental Life Cycle Assessment of Hot And Warm Mix Asphalt Pavements using ReCiPe and TRACI. Resources, Conservation and Recycling, 164, 105156.

Li, X.; HUANG, B.; XU, Q. (2019). Life Cycle Assessment of asphalt pavements: The role of warm mix asphalt and reclaimed asphalt pavement. International Journal of Pavement Engineering, 20(5), 601–611.

MEDINA, Taísa; CALMON, João Luiz; VIEIRA, Darli; BRAVO, Alencar; VIEIRA, Thalya. Life Cycle Assessment of Road Pavements That Incorporate Waste Reuse: A Systematic Review and Guidelines Proposal. Sustainability, v. 15, n. 20, p. 14892, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su152014892.

National Asphalt Pavement ASSOCIATION (NAPA). Warm-Mix Asphalt: Best Practices. 3. ed. Lanham, MD: NAPA, 2016. (Information Series 138).

SAVIETTO, R. S. Avaliação de Ciclo de Vida de Produtos: aplicação de SimaPro em comparações ambientais. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SHAH, S. A. R.; ULLAH, H.; ZHANG, Y.; YANG, G. Comparative Life Cycle Assessment of Rubberized Warm-Mix Asphalt Pavements: A Cradle-to-Gate Plus Maintenance Approach. Coatings, v. 15, n. 8, p. 899, 2025.

Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza (clara.souza@coc.ufrj.br)
Ricardo Schroder Teixeira (ricardo.schroder@coc.ufrj.br)
Francisco Thiago Sacramento Aragão (fthiago@coc.ufrj.br)
Programa de Engenharia Civil - COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
Luis Alberto Herrmann do Nascimento (luisnascimento@petrobras.com.br)
Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello - CENPES
Petrobras
Marcela Maria Toscano Krau (marcela.toscano-krau@tu-braunschweig.de)
Institut für Straßenwesen
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany.

PAVIMENTOS TERMOCROMÁTICOS COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAÇÃO DE CALOR URBANO: AVALIAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA SUPERFICIAL

Larissa V. S. Ribas[1, 2], **José Roberto P. Santos**[1], **Verônica T. F. Castelo Branco**[1]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Universidade Federal da Bahia

RESUMO
As ilhas de calor urbanas intensificam os impactos climáticos nas cidades tropicais, afetando o conforto térmico e a qualidade de vida da população. Pavimentos asfálticos, devido à sua ampla extensão e baixa refletância, contribuem significativamente para esse fenômeno. Este estudo investigou o potencial de pavimentos termocromáticos como estratégia de mitigação térmica, utilizando simulações microclimáticas com o modelo ENVI-met. Foram simulados dois cenários – controle e mitigação – em duas áreas com distintas características urbanas em Fortaleza, Brasil. Os resultados mostraram redução de até 350 W/m² na radiação líquida nas áreas pavimentadas, com ganhos acumulados de eficiência energética de até 823 W/m² por dia. As diferenças entre os bairros evidenciaram a influência da morfologia urbana nos efeitos da mitigação. Os achados reforçam o potencial dos pavimentos termocromáticos na redução do calor urbano e destacam a importância de considerar variáveis urbanísticas em estratégias adaptativas ao clima.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) têm se consolidado como um dos principais desafios ambientais nas cidades contemporâneas. Esse fenômeno caracteriza-se pela elevação das temperaturas em áreas urbanizadas em comparação com zonas rurais adjacentes, resultado da combinação de fatores como a densidade da infraestrutura construída, a redução de áreas verdes e a predominância de superfícies impermeáveis com alta capacidade de armazenamento de calor (Xu *et al.*, 2021). Entre essas superfícies, os pavimentos urbanos destacam-se pela sua ampla cobertura e pelas propriedades térmicas que favorecem o acúmulo de energia solar, contribuindo, significativamente, para o aumento das temperaturas nos centros urbanos (Jiang *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2021).

O aumento do albedo das superfícies urbanas tem sido investigado como estratégia de arrefecimento, a exemplo da funcionalização de pavimentos termocromáticos (Hu e Yu, 2013; 2020; Zhang *et al.*, 2022; Ribas *et al.*, 2025). Ao refletir uma maior fração da radiação solar incidente, esses materiais reduzem a absorção de calor pelas superfícies pavimentadas termocromáticas, promovendo a diminuição das temperaturas superficiais e do ar próximo à superfície. A alteração no albedo também impacta diretamente o balanço de energia da superfície, afetando os fluxos de calor sensível, latente e de armazenamento no solo (Xu *et al.* 2021; Ribas *et al.*, 2025). Essas alterações nos fluxos de energia têm implicações no microclima urbano, podendo melhorar o conforto térmico e reduzir os impactos negativos das ICUs. Para avaliar esses efeitos de forma precisa e em diferentes escalas espaciais, as simulações microclimáticas são ferramentas eficazes (Santamouris *et al.*, 2013; Taleghani *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022), oferecendo suporte técnico para a formulação de políticas públicas e investimentos em infraestrutura urbana sustentável.

As simulações microclimáticas com uso de modelos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês, *Computational Fluid Dynamics* - CFD) permitem simular as dinâmicas do clima urbano e suas consequências diante das diferentes morfologias urbanas, do tipo de uso do solo e dos efeitos proporcionados pela existência da vegetação no ambiente urbano para cenários reais e fictícios. Com base nos resultados da simulação CFD de uma área residencial em Xangai, na China, a substituição do pavimento asfáltico convencional por um pavimento termocromático reduziu cerca de 1,5°C na temperatura do ar a 1,5m (Zhang *et al.*, 2022). Resultados semelhantes foram obtidos com a aplicação de pavimentos refletivos em um bairro de Los Angeles, cuja redução máxima da temperatura do ar foi de 2°C às 14h (Taleghani *et al.*, 2019). Sen *et al.* (2019) simularam a substituição do concreto asfáltico convencional por concreto refletivo numa área residencial no Arizona. A redução da temperatura do ar em cerca de 0,4ºC foi mais modesta que os relatos da literatura e os autores concluíram que a eficácia das soluções depende dos padrões locais de utilização dos solos e das áreas urbanas circundantes. Ademais, as reduções da temperatura do ar parecem estar linearmente relacionadas com a extensão espacial da adoção de estratégias de mitigação do calor nas escalas espaciais investigadas (Taleghani *et al.*, 2019).

Nesse sentido, é possível observar que tanto as propriedades dos materiais construtivos, quanto as variáveis relacionadas com a geometria do espaço urbano desempenham um papel importante no microclima. Ademais,

a maior parte dos estudos sobre os efeitos de pavimentos termocromáticos sobre o microclima concentram-se em áreas de climas subtropical (Zhang *et al.* 2022), semiárido (Sen *et al.*, 2019), temperado (Taleghani *et al.*, 2019) e mediterrâneo (Kyriakodis e Santamouris, 2018; Pigliautile *et al.* 2020). Há espaço de contribuição científica na realização de estudos preditivos dos possíveis ganhos do uso de intervenções de infraestrutura urbana na mitigação das vulnerabilidades climáticas em cidades.

O presente estudo tem como objetivo investigar os efeitos de estratégias de mitigação de calor sobre o balanço de energia da superfície de duas áreas com distintas características de uso e ocupação do solo na cidade de Fortaleza. Utilizando um modelo CFD com alta resolução espacial (ENVI-met), foram simulados dois cenários: o cenário atual e um cenário de mitigação, no qual foi considerada a aplicação de um pavimento termocromático nas vias do bairro. Esta abordagem busca fornecer subsídios para a avaliação do desempenho térmico dessa solução, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias urbanas mais resilientes às mudanças climáticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foi utilizado o modelo CFD para realizar simulações microclimáticas. Inicialmente, foram conduzidas as simulações de controle, considerando as condições atuais de uso e cobertura do solo das áreas selecionadas, com o objetivo de representar as configurações microclimáticas reais existentes. Em seguida, foram realizadas as simulações do cenário fictício, nas quais foi assumida a adoção generalizada da solução de mitigação em toda a área pavimentada do bairro. Cada simulação considerou a substituição dos pavimentos convencionais por pavimentos termocromáticos, visando avaliar os efeitos sobre o microclima local.

Os resultados das simulações foram comparados com os cenários de controle para quantificar o impacto da estratégia de mitigação no balanço de energia da superfície. As estratégias de mitigação de calor, ao modificar a cobertura do solo, alteram o balanço energético, afetando diretamente os fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera. O balanço de energia da superfície pode ser descrito pela seguinte equação:

$$Q^* = Q_H + Q_{LE} + Q_G \quad (1)$$

Onde, Q^* representa a radiação líquida (*net radiation*), Q_H se refere ao fluxo de calor sensível, Q_{LE} corresponde ao fluxo de calor latente e Q_G refere-se ao fluxo de calor no solo. Todos os termos são expressos em unidades de W/m², conforme descrito por NOAA (2015).

2.1. Estudo de caso

Este estudo foi conduzido em Fortaleza, capital do estado do Ceará, localizada na região Nordeste do Brasil. Com clima tropical de savana (Aw), segundo a classificação de Köppen-Geiger, a cidade apresenta uma estação seca bem definida e temperatura média anual de 27°C. A umidade relativa é elevada devido à proximidade com o Oceano Atlântico, enquanto a precipitação anual é de aproximadamente 1.400 mm, concentrada entre fevereiro e maio. Fortaleza possui um histórico de forte expansão urbana desde a década de 1980, com substituição progressiva da cobertura natural por áreas construídas, gerando marcadas desigualdades socioespaciais. Estudos anteriores identificaram ilhas de calor urbanas com elevações térmicas de até 5°C, especialmente nas regiões central, sudoeste, oeste e noroeste da cidade, sendo essas áreas prioritárias para intervenções de mitigação térmica (Moura, Zanella e Sales, 2008).

Dois bairros com características urbanas contrastantes foram selecionados como áreas de estudo: **Meireles (ME)** e **Álvaro Weyne (AW)**. O bairro Meireles, localizado na zona leste de Fortaleza, representa uma área de alta densidade populacional, com intensa verticalização, elevada impermeabilização do solo e predominância de edificações de múltiplos pavimentos. É o bairro com o IDH mais alto da cidade, 0,953. Por outro lado, o bairro Álvaro Weyne, situado na zona oeste da cidade, caracteriza-se por uso do solo predominantemente residencial, com construções geminadas sem recuos frontais, laterais ou traseiros, resultando em uma alta densidade de edificações horizontais. O IDH é classificado como “muito baixo”, sendo igual a 0,365. Em termos de urbanização, AW apresenta um grande volume de edificações e uma notável escassez de áreas verdes e espaços livres que possam contribuir para o resfriamento da atmosfera urbana. Essa seleção permitiu analisar o desempenho das estratégias de mitigação de calor em diferentes contextos de uso e ocupação do solo dentro da cidade.

2.2. Modelo e cenário de simulação

As simulações foram geradas no *software* ENVI-met versão 5.6.1, um programa de simulação computacional alemão, que utiliza modelos tridimensionais e permite a compreensão do fenômeno climático a partir das interações superfície-vegetação-atmosfera, resolvendo a equação de Reynolds-*averaged* Navier-Stokes.

As informações de uso e cobertura do solo foram obtidas a partir de imagens de levantamento aerofotogramétrico das áreas simuladas. Esses dados foram utilizados para a criação dos modelos de controle no ENVI-met, incorporando camadas tridimensionais de arborização, edificações e pavimentação dos bairros. Para cada bairro foi simulada uma área de 147.447 m², com resolução espacial de 3m × 3m × 2m (dx, dy, dz).

Os modelos foram calibrados com dados de campo coletados por Lima Junior (2023), entre novembro de 2021 e março de 2022, incluindo medições de temperatura e pressão atmosférica. Dentre os registros disponíveis, foi selecionado o dia 19 de novembro de 2021 para a simulação, por apresentar a maior média de temperatura na série histórica analisada. A simulação foi configurada para iniciar às 4h, com duração total de 18 horas. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros de entrada adotados na simulação com o ENVI-met, utilizando o modo *Simple Forcing*. Os dados de direção e velocidade do vento foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Com base no modelo de controle (CO), foram realizadas simulações de perturbação: o cenário de pavimento termocromático (CP), no qual o albedo das vias foi aumentado de 0,2 para 0,5, valores usuais para pavimentos asfálticos tradicionais em uso e refletivos (Sen *et al.,* 2019), respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada no ENVI-met

Parâmetro	**Valor**
Umidade em 2.500m	5,00 g/kg
Direção do vento	104º
Velocidade do vento	5,2 m/s
Comprimento da Rugosidade do solo	0,10 m

3. RESULTADOS

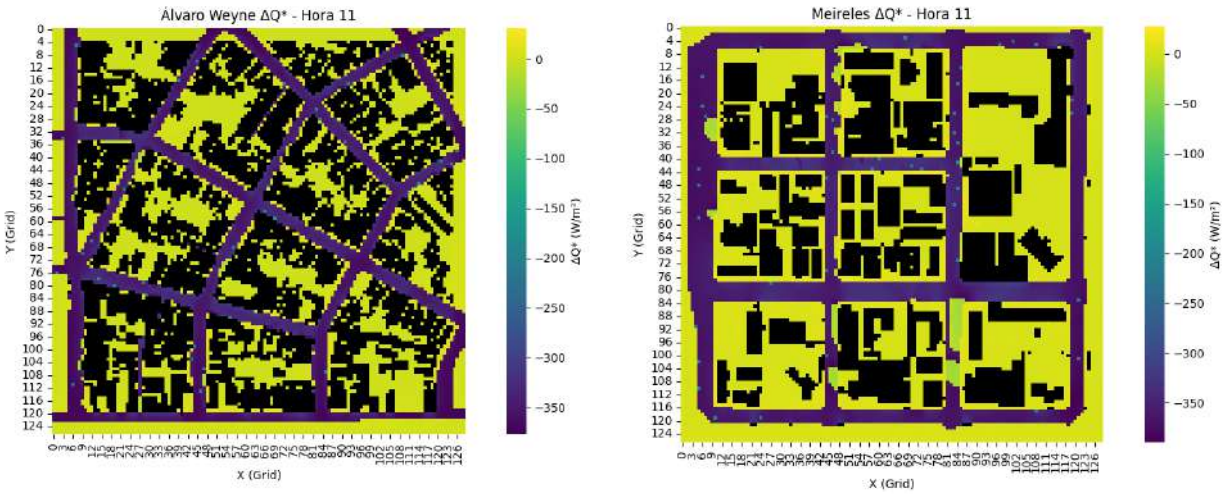
A Figura 1 apresenta os impactos da adoção da estratégia de mitigação de calor, em comparação com o cenário de controle, sobre o balanço de energia da superfície avaliada às 11h, para AW (Figura 1a) e ME (Figura 1b). Ao comparar as variações na radiação líquida total na superfície entre os cenários, observa-se que, para ambos os bairros, a adoção de pavimentos termocromáticos resultou na redução da variável, com queda de até 350 W/m² justamente na área pavimentada. A redução da radiação líquida significa que o cenário CP contribui para um ambiente energeticamente mais eficiente, com prováveis ganhos quanto ao conforto térmico da população. Em escala de bairro, os resultados do modelo sugerem que a alteração do albedo da superfície dos pavimentos possui importante papel no balanço térmico do microclima, que pode contribuir para mitigação dos efeitos deICUs. Isso ocorre porque o aumento do albedo do solo reduz a radiação líquida e, portanto, a energia disponível para ser reemitida como calor convectivo para a atmosfera.

Resultados semelhantes foram obtidos por Ribas *et al.* (2025), cujos experimentos em ambiente aberto indicaram 18% de redução no balanço energético em corpos de prova de concreto asfáltico termocromáticos em comparação à superfície não funcionalizada, equivalente a redução máxima de 9°C na temperatura da superfície. Taleghani *et al.* (2019) obtiveram resultados pouco mais conservadores ao comparar as variações na temperatura da superfície entre a adoção de pavimentos de alta reflectância e o convencional, cuja redução máxima na radiação líquida foi 320W/m² e temperatura de superfície de 6,9°C, em análise à nível de bairro.

Os perfis diurnos médios horários do balanço total de energia da superfície dos cenários CO e CP para as áreas AW e ME são apresentados, respectivamente, nas Figuras 2 a) e b). Como o sol é o principal condutor do balanço de energia da superfície (Oke, 2002), a redução da radiação líquida na superfície na simulação do cenário CP se deu majoritariamente durante o período de insolação direta, entre 7:00 e 16:00 horas. A redução máxima ocorreu às 11 h, sendo de 128,25 W/m² para AW e 120,77 W/m² para ME.

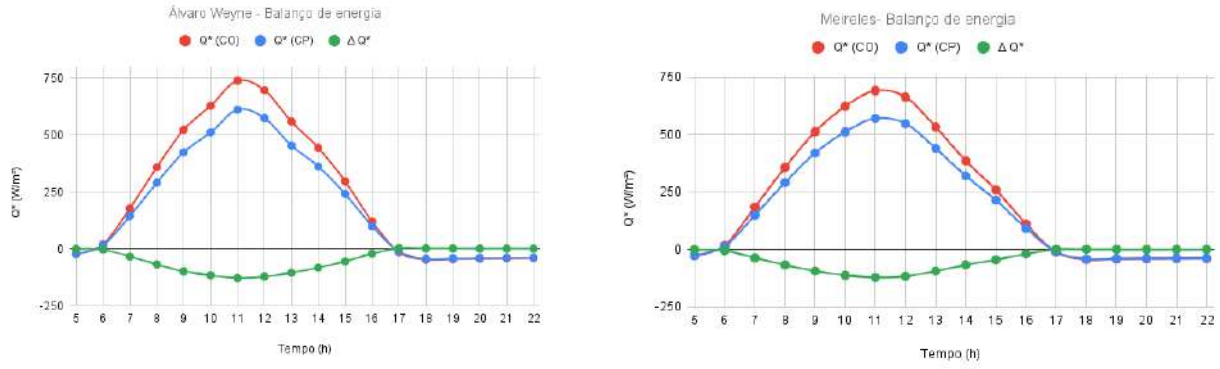
O cálculo da área sobre a curva ΔQ* indica o ganho total em eficiência energética para as áreas analisadas. Enquanto a estratégia CP aplicada na área do AW apresentou um ganho acumulado de 823 W/m² de radiação

líquida para o dia simulado, no ME a eficiência dos pavimentos termocromáticos foi 8,5% menor (760 W/m²). Tendo em vista que os dois bairros possuem percentual de área pavimentada semelhantes, em torno de 20 a 25%, a diferença no balanço energético pode estar associada às características construtivas/urbanísticas de cada região. Apesar de apresentar alta densidade, no AW as construções, em sua maioria, possuem até quatro pavimentos, enquanto no ME as edificações, em geral, possuem mais de 10 pavimentos, com possível formação de cânions urbanos. Os cânions são áreas urbanas onde ruas estreitas são ladeadas por edifícios altos e próximos uns ao outros (Oke, 2002), criando um ambiente semelhante a um cânion natural. Essa configuração urbana pode afetar o microclima, uma vez que a luz solar e o vento podem ser bloqueados e, consequentemente, alterar temperatura, umidade e velocidade do vento, impactando o conforto térmico (Sharmin, Steemers e Matzarakis, 2017). Portanto, ressalta-se a complexidade de fatores a serem considerados quando na decisão do uso de estratégias de arrefecimento urbano, como os pavimentos termocromáticos, para a otimização de seus benefícios.



a) b)

Figura 1. Diferenças absolutas de radiação líquida (ΔQ*) entre os cenários de controle (CO) e de mitigação de calor (CP) às 11:00.



a) b)

Figura 2. Perfis diurnos médios horários de radiação líquida (Q*) para cenários de controle (CO), de mitigação de calor (CP) e da variação entre eles (ΔQ*).

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto da aplicação de pavimentos termocromáticos como estratégia de mitigação de calor urbano sobre o balanço de energia da superfície, em escala de bairro. Foram escolhidas duas áreas da cidade de Fortaleza, com características urbanas contrastantes para aplicação de simulações microclimáticas com o modelo CFD ENVI-met. A metodologia consistiu na comparação entre um cenário de controle, baseado nas condições atuais de uso e ocupação do solo, e um cenário de perturbação, no qual todo o pavimento viário foi substituído por material termocromático de alto albedo (0,5).

Os principais resultados indicaram que a substituição dos pavimentos convencionais por soluções termocromáticas resultou em significativa redução da radiação líquida nas áreas pavimentadas, com quedas de até 350 W/m² às 11h nos dois bairros analisados. A simulação do balanço energético diário revelou reduções acumuladas que evidenciam um ganho em eficiência energética com uso dessa estratégia, com maior benefício no bairro AW. Essa diferença pode estar associada à morfologia urbana local, uma vez que o bairro ME apresenta edificações mais altas e compactas, propensas à formação de cânions urbanos com possível restrição a incidência solar direta e a ventilação natural. A redução da radiação líquida implica menor disponibilidade de energia para ser transferida à atmosfera como calor sensível, contribuindo para o resfriamento do microclima urbano e melhoria do conforto térmico.

Diante dos achados, recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise de estratégias combinadas de mitigação — como a aplicação simultânea de pavimentos refletivos, aumento da arborização e coberturas refletivas —, bem como investigações sobre o comportamento dinâmico dos materiais termocromáticos ao longo do tempo e sob diferentes condições climáticas. Por fim, sugere-se que análises de custo-benefício e impactos sociais dessas estratégias sejam incorporadas ao processo de tomada de decisão para políticas públicas de adaptação climática em cidades tropicais.

Agradecimentos
Os autores agradecem às agências de fomento CNPq e FUNCAP pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hu, J. e Yu, X. (2013) Experimental study of sustainable asphalt binder. Transportation Research Record, 2372(1), p. 108–115. https://doi.org/10.3141/2372-12

Hu, J. e Yu, X. (2020) Performance evaluation of solar-responsive asphalt mixture with thermochromic materials and nano-TiO_2 scatterers. Construction and Building Materials, 247, 118605. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118605

Jiang, J.; Jin, Y.; Bao, T. e Ou, X. (2019) Sensible heat discharging from pavements with varying thermophysical properties. Sustainable Cities and Society, 45, p. 431–438. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.023

Kyriakodis, G.-E. e Santamouris, M. (2018) Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates – Results from a large scale urban mitigation project. Urban Climate, 24, p. 326–339.

Ribas, L.V.S.; Santos J.R.P.; Lima, K.; Teixeira, J.E.S.L.; Castelo Branco, V.T.F. (2025) Assessment of optical-thermal balance and environmental degradation of a thermochromic coated asphalt mixture for urban heat mitigation. Road Materials and Pavements Design. DOI: 10.1080/14680629.2025.2482846

Lima Júnior, A. F. (2023) Clima urbano: análise do campo térmico e sugestão de áreas prioritárias para implementação de medidas mitigadoras. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.

Moura, M. O.; Zanella, M. E.; Sales, M. C. L. (2008) Ilhas térmicas na cidade de Fortaleza/CE. Boletim Goiano de Geografia, 28(2), p. 33–44.

NOAA (2015) 3-Hourly NCEP North American Regional Reanalysis (NARR) Composites (Online). Available: https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plothour.pl (Accessed).

Oke, T. R. (2002) Boundary Layer Climates. Taylor & Francis.

Pigliautile, I. *et al.* (2020) Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: Field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. Renewable Energy, 147, p. 1663–1675.

Santamouris, M. *et al.* (2012) Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. Building and Environment, 53, p. 128–136. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.022

Sen, S. *et al.* (2019) Cool pavement strategies for urban heat island mitigation in suburban Phoenix, Arizona. Sustainability (Switzerland), 11(16).

Sharmin, T.; Steemers, K. e Matzarakis, A. (2017) Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. Sustainable Cities and Society, 34, p. 293–308.

Taleghani, M. *et al.* (2019) The impact of heat mitigation strategies on the energy balance of a neighborhood in Los Angeles. Solar Energy, 177, p. 604–611. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.041

Xu, L.; Wang, J.; Xiao, F.; El-Badawy, S. e Awed, A. (2021) Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. Applied Energy, 281(October 2020), 116077. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077

Zhang, X.; Li, H.; Xie, N.; Jia, M.; Yang, B. e Li, S. (2022) Laboratorial investigation on optical and thermal properties of thermochromic pavement coatings for dynamic thermoregulation and urban heat island mitigation. Sustainable Cities and Society, 83, 103950. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103950

SUSTENTABILIDADE NA PAVIMENTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE EMISSÕES DE CARBONO NA FRESAGEM E RECONSTITUIÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Bianca Paola Gabardo[1,2], **Zila Maria Garcia Mascarenhas**[3], **Kamilla Vasconcelos Savasini**[1]
[1]USP, [2]Arteris, [3]UFMA

RESUMO
O presente estudo visa avaliar o desempenho ambiental, através da avaliação do ciclo de vida, de duas equipes de campo que realizam fresagem e recomposição de pavimento asfáltico em rodovias, com foco na comparação das emissões de CO_2 desde a extração dos materiais, transporte envolvido, usinagem do pavimento até a execução dos serviços em campo. A partir deste estudo, busca-se avaliar como diferentes usinas, métodos construtivos e materiais impactam na avaliação do ciclo de vida das equipes de manutenção de pavimento e identificar oportunidades de melhoria nos serviços prestados quanto ao desempenho ambiental. A metodologia inclui a coleta de dados em campo, análise de emissões de CO_2 e avaliação do impacto causado pelos diferentes resultados obtidos nas duas equipes de manutenção. Os resultados evidenciam a influência da escolha dos materiais da mistura asfáltica, dos combustíveis utilizados nas usinas, das distâncias de transporte e de outras variáveis operacionais no impacto final.

1. INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial, em 1850, o mundo passa por constante transformação, com avanços tecnológicos que impulsionam a urbanização, o mercado de trabalho e o crescimento econômico. A expansão do setor de transportes, especialmente com a popularização de veículos de carga e passageiros, tem facilitado a mobilidade e o comércio. No entanto, o desenvolvimento das rodovias atuais traz impactos negativos, entre eles a degradação ambiental, o esgotamento de recursos naturais e o aquecimento global.

De acordo com Santos *et al.* (2014) e Louhghalam *et al.* (2017), a construção e a manutenção contínua das estradas exigem materiais produzidos em processos que consomem grandes quantidades de energia e emitem elevado volume de carbono, contribuindo significativamente para o impacto ambiental da atividade. Segundo a Coalização dos Transportes (2025), o setor de transportes é responsável por 11% das emissões totais de carbono no Brasil, sendo mais de 90% provenientes do modal rodoviário.

A adoção de metodologias e tecnologias que reduzem o consumo de matérias-primas, energia e a emissão de CO_2 tem ganhado visibilidade em diversos setores, inclusive no rodoviário. Destacam-se também as medições e avaliações dos impactos ambientais por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ferramenta que auxilia na escolha de recursos e na redução dos impactos ambientais de um sistema. No universo das rodovias, o ciclo da pavimentação asfáltica é um dos maiores emissores de CO_2, e passou a ser analisado com maior notoriedade a partir de 2011 em estudos sobre métodos e materiais sustentáveis nas estradas (Jiang e Wu, 2019).

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o ciclo de vida do berço à construção de duas equipes de campo que realizam atividades de fresagem e recomposição de pavimentos asfálticos, com foco na comparação das emissões de CO_2 nas etapas de extração de recursos naturais, processamento, usinagem, transporte e aplicação em campo. A partir dessa avaliação, busca-se compreender como diferentes equipamentos, usinas e misturas asfálticas impactam na sustentabilidade dos serviços de manutenção de pavimentos.

1.1. ACV na pavimentação asfáltica

A construção e manutenção de pavimentos são essenciais para garantir a mobilidade e o desenvolvimento econômico e social, mas também apresentam desafios ambientais importantes. Entre eles, destaca-se a emissão de dióxido de carbono (CO_2), associada à produção de materiais, aplicação e manutenção dos pavimentos. Esses processos impactam o ciclo de vida das obras e contribuem significativamente para os efeitos das mudanças climáticas (Balaguera *et al*., 2018).

Técnicas como fresagem e recomposição são amplamente utilizadas na restauração de rodovias pavimentadas. A fresagem remove camadas desgastadas, enquanto a recomposição aplica novas camadas de mistura asfáltica ou concreto de cimento Portland. Embora aumentem a durabilidade das vias, essas técnicas também contribuem de forma relevante para as emissões de CO_2 na construção civil. A escolha dos materiais e a

eficiência dos processos utilizados são fatores cruciais para a sustentabilidade dessas intervenções (Santos *et al*., 2014; Louhghalam *et al*., 2017).

A ACV de serviços de pavimentação depende de uma série de variáveis, como os tipos de materiais, as distâncias de transporte, o tipo de combustível, a forma usinagem, o consumo de energia, a produtividade dos equipamentos e os limites do sistema analisado. Para que a ACV seja precisa e reflita adequadamente a pegada de carbono, é fundamental utilizar a maior quantidade possível de dados primários e considerar todas as variáveis envolvidas (Mascarenhas *et al*., 2023; Vandewalle *et al*., 2020; Ferreira, 2018). Esse entendimento permite uma gestão mais eficiente dos processos e maior clareza sobre os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo segue as diretrizes das normas NBR ISO 14040 (2025), NBR ISO 14044 (2025) e NBR ISSO 14067 (2023) para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com foco nas atividades de fresagem e recomposição de pavimentos. A pesquisa foi desenvolvida a partir de visitas técnicas a duas equipes de manutenção de uma concessionária de rodovias brasileira (denominadas de equipe A e equipe B), permitindo a coleta direta de dados primários. Apesar de não serem exatamente os mesmos trechos de aplicação do pavimento asfáltico, os locais de trabalho de ambas as equipes são próximos ao município de Pirassununga, no interior do estado de São Paulo. A uniformidade administrativa, técnica e normativa entre as equipes da concessionária contribui para a homogeneização das condições de trabalho, facilitando o controle e a análise das variáveis específicas de cada equipe no contexto da ACV.

O escopo adotado é do tipo “do berço à construção”, abrangendo as etapas A1 (extração da matéria-prima), A2 (transporte de insumos para a usina), A3 (usinagem), A4 (transporte do produto) e A5 (construção do produto) do ciclo de vida do pavimento (ISO 21931-2, 2019; NAPA, 2024). A coleta de dados em campo incluiu informações sobre os equipamentos utilizados, tipos de misturas asfálticas, combustíveis, distâncias médias de transporte, entre outros aspectos relevantes. A unidade funcional da análise foi 1 m³ de rodovia fresada e recapeada por cada equipe, com o objetivo de quantificar as emissões de CO_2 de cada equipe de campo.

Na fase de análise do inventário, dados secundários foram obtidos da literatura e do banco de dados do SIDAC (Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção), que oferece informações ambientais associadas ao ciclo de vida de materiais e processos nacionais através de limites mínimos e máximos de emissão de CO_2. O indicador utilizado foi a emissão de CO_2 e, a partir das emissões identificadas, foram feitas comparações entre as diferentes etapas do ciclo de vida, materiais e métodos utilizados, servindo de base para as conclusões do estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisados os projetos de mistura asfáltica dos materiais aplicados na camada de revestimento pelas equipes na fase de recomposição da rodovia para a designação da massa de cada insumo. Ambos os projetos são de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), usinados com asfalto borracha tipo AB8, agregados virgens e com adição de cal hidratada CH-I para melhoria da adesividade da massa asfáltica. Os dados de inventário da etapa A1 foram retirados da base SIDAC, com exceção dos dados de processamento da borracha moída de pneus, retirado do estudo de Tushar et al (2022), e emissões do ligante asfáltico, retirados do estudo do Eurobitume (2025). Referente aos dados de emissões do ligante asfáltico, é importante ressaltar que, apesar da não disponibilidade de dados sobre emissões nacionais, há incertezas no uso de dados europeus, principalmente por conta de a matriz energética nacional diferir da europeia. Ainda, quando se trata de ligante asfáltico, a emissão do gás metano (CH4) é quase tão relevante quanto a de carbono, apesar de não considerado neste estudo que contabiliza apenas as emissões de dióxido de carbono (CO_2), em consonância com a base de dados SIDAC utilizada para os demais insumos. De acordo com Eurobitume (2025), as emissões totais em relação a ligantes asfálticos é de 54% de CO2, enquanto os demais 46% são emissões de CH4 (as emissões dos demais gases de efeito estufa são consideradas desprezíveis).

Para análise das distâncias de transporte, tanto na fase A2 quanto A4, foram disponibilizadas as distâncias de cada equipe de trabalho, com exceção da distância percorrida entre o fornecedor de borracha para o

modificador de asfalto (o mesmo para as duas equipes) devido a dificuldades no rastreamento da informação. Neste caso, foi padronizada a distância de 50 km para ambas as frentes de serviço. Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Distâncias de transporte

De	Para	Unidade	Equipe A	Equipe B
Refinaria	Modificador de Asfalto	km	19	19
Borracha de pneu moída	Modificador de Asfalto	km	50	50
Modificador de Asfalto	Usina	km	75	81,5
Fornecedor de agregados	Usina	km	0,8	0,6
Fornecedor de cal hidratada	Usina	km	560	180
Fornecedor aditivo morno	Usina	km	0	0
Usina	Trecho de Serviço	km	30	93
Fornecedor de Emulsão	Trecho de Serviço	km	116	112

No inventário dos transportes foram utilizados valores de transporte rodoviário via caminhão. Para o transporte de ligante, emulsão e da mistura asfáltica pronta foi assumida uma capacidade máxima de carga de 41t, enquanto para os demais materiais, a capacidade considerada foi de 33t.

Na fase de usinagem (A3), a emissão de CO_2 provém dos combustíveis utilizados nas usinas. No cenário da equipe A, a usina utiliza óleo combustível OC MAX para secagem dos agregados e aquecimento dos materiais, enquanto a usina da equipe B utiliza gás liquefeito de petróleo (GLP). Além disso, ambas as usinas fazem o uso de energia elétrica para o funcionamento geral.

Por fim, na etapa de construção (A5), cada equipe disponibilizou a lista dos equipamentos utilizados de acordo com o plano executivo e o balanço de consumo de combustível (neste caso, diesel) do maquinário operado para as atividades de fresagem e reconstituição do pavimento asfáltico.

A Figura 1 mostra os resultados obtidos após a análise do ciclo de vida de cada fase.

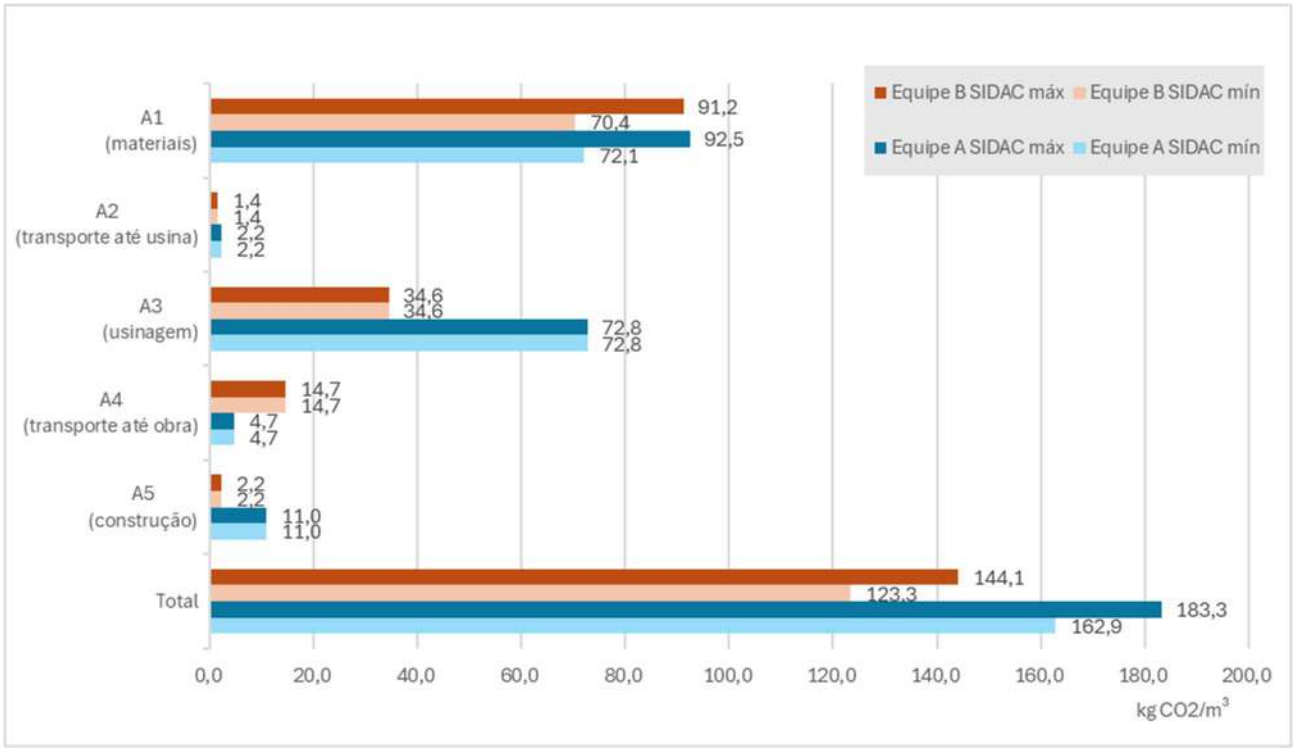


Figura 1: Emissões de CO_2 por fase do ciclo de vida

No total, as emissões das equipes variaram entre 123,3 e 183,3 kg de CO_2 por m³ de reconstrução de pavimento.

Considerando o SIDAC mínimo, a variação da equipe A para a equipe B foi de 32%, e no SIDAC máximo, de 27%. A equipe B teve maiores emissões que a equipe A somente na etapa A4, devido à distância de transporte da usina até o trecho de serviço (cerca de 3 vezes maior).

As etapas A3, de usinagem, e A5, de construção, são as que apresentam resultados mais discrepantes entre as equipes, de 80% e 52% de diferença, respectivamente. Na etapa de usinagem, a principal distinção entre os processos foi o combustível utilizado para secagem e aquecimento dos materiais. Enquanto a equipe B utilizou 4,3kg de GLP por tonelada produzida, a equipe A usou 9 litros de óleo combustível. Além de apresentar menor poder calorífico, o óleo combustível possui maior teor de carbono e, segundo o IPCC (2005), gera mais emissões incluindo material particulado e outros poluentes durante a queima. Na etapa de construção, ambas as equipes utilizaram equipamentos abastecidos com diesel e executaram atividades similares, entretanto, o consumo de combustível em L/m³ reportados foram discrepantes. Na equipe A, a média de consumo reportada dos equipamentos foi de 4,8L/m³, enquanto na equipe B o valor foi de 0,98L/m³. Como as potências dos motores eram, em média, muito similares, acredita-se que a diferença tenha influência da eficiência de trabalho, da condução dos equipamentos das equipes e da média de idade dos equipamentos, já que, na equipe B, os equipamentos são em média 6 anos mais novos que os da equipe A.

Em relação às etapas da ACV, a Figura 2 mostra o quanto cada fase contribuiu para as emissões totais de cada equipe.

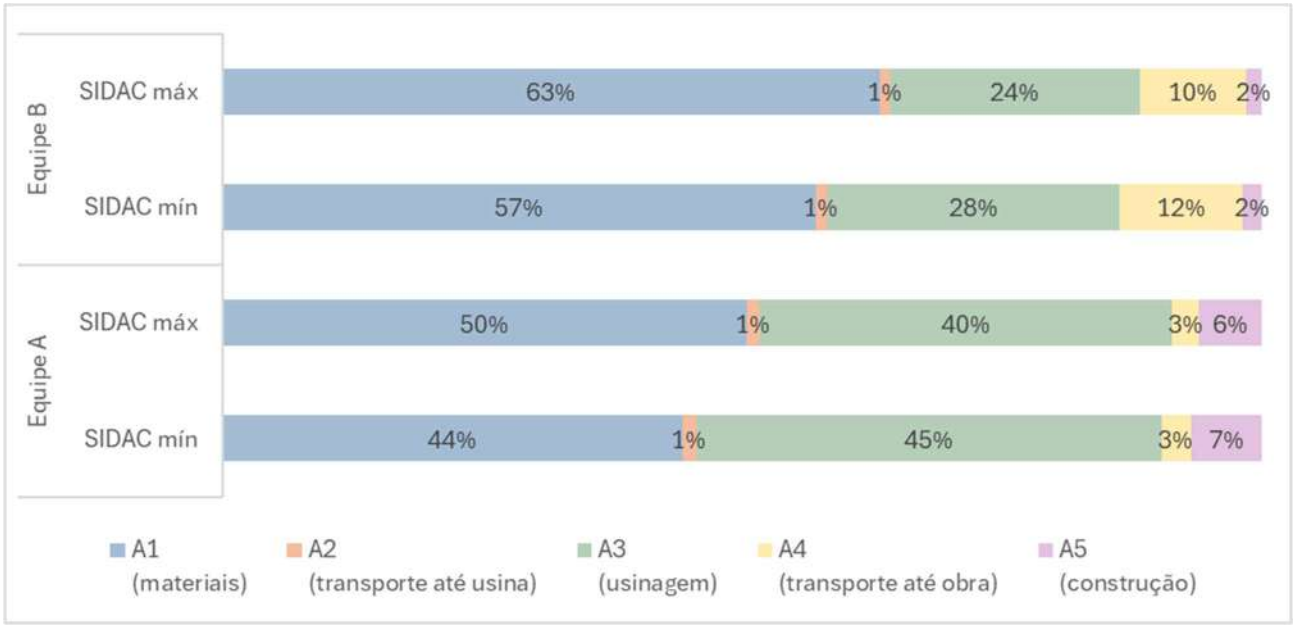


Figura 2: Representatividade de emissões por etapa do ciclo de vida

Com exceção das emissões na fase de usinagem (A3) da Equipe A utilizando a menor faixa de emissões do SIDAC, a fase que mais gerou emissões foi a A1 de extração de matéria-prima. Isso ocorreu devido a presença do ligante asfáltico virgem, que é um produto derivado do petróleo com processos complexos de extração e refinaria, além da presença de cal hidratada em ambos os projetos de mistura asfáltica, que tem alta emissão de CO_2 por conta da calcinação do calcário.

4. CONCLUSÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida realizada neste estudo evidenciou que a fresagem e recomposição de pavimentos asfálticos apresentam variações significativas nas emissões de CO_2, a depender das escolhas técnicas, operacionais e logísticas adotadas por cada equipe. As etapas de usinagem (A3) e construção (A5) demonstraram grande sensibilidade ao tipo de combustível utilizado e à eficiência do maquinário, sendo responsáveis pelas maiores diferenças nas emissões entre as frentes analisadas. Por isso, essas fases são identificadas como estratégicas para investimentos em tecnologias mais limpas, aprimoramento de processos ou adoção de medidas de controle, visando a mitigação das emissões de CO_2.

A etapa de extração de matéria-prima (A1), no entanto, foi a que apresentou maior contribuição absoluta para as emissões totais, principalmente devido ao uso de ligante asfáltico virgem. Este dado reforça a necessidade de considerar alternativas de menor impacto, como o reaproveitamento de material asfáltico fresado e o uso de ligantes modificados com menor intensidade de carbono. Apesar de não considerado neste estudo, a durabilidade das camadas de concreto asfáltico estudadas têm grande impacto no ciclo de vida completo do produto. Quando disponíveis, a análise destes dados é fundamental para quantificar adequadamente os benefícios ambientais associados ao aumento da vida útil do pavimento.

No geral, o estudo aponta oportunidades de melhoria nos serviços de manutenção de pavimentos por meio da otimização dos processos de transporte, modernização dos equipamentos, escolha dos combustíveis nas usinas e substituição de insumos mais emissivos. Ao observar os impactos na escolha de equipamentos, equipes e usinas nas emissões de CO2, é possível otimizar não só a qualidade da manutenção executada, mas também integrar critérios ambientais para analisar, entender e atuar na redução da pegada de carbono da infraestrutura rodoviária e contribuir para as metas de sustentabilidade no setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. NBR ISO 14040:2025, Emenda 1:2025-07-24. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações*. NBR ISO 14044:2009, Projeto de Emenda 2:2025-08-28. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *Gases de efeito estufa – Pegada de carbono de produtos – Requisitos e diretrizes para quantificação*. NBR ISO 14067:2023. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BALAGUERA, A.; G. I. CARVAJAL; J. ALBERTÍ e P. FULLANA-I-PALMER. (2018) *Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review*. Resources, Conservation and Recycling, v. 132, p. 37-48. ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003

COALIZÃO DOS TRANSPORTES (2025) *Como tornar o setor de transportes um contribuidor ativo para a redução das emissões brasileiras: estudo completo*. Coordenação: Motiva; CEBDS; CNT/SEST SENAT; Observatório de Mobilidade do Insper. Brasília, Brasil.

EUROBITUME (2025) *The Eurobitume Life-cycle Assessment 4.0 for bitumen*. ISBN: 978-2-39068-070-3. Brussels, Belgium.

FERREIRA, A. N. (2018) *A emissão de CO2 e o gasto energético na manutenção de rodovias: um estudo na BR 262*. Programa de pós-graduação em recursos naturais, UFMS. Campo Grande.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2005). *Annex I: Properties of CO2 and carbon-based fuels*. In: METZ, B.; DAVIDSON, O.; DE CONINCK, H.; LOOS, M.; MEYER, L. Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21931-2:2019 (2019) *Sustainability in buildings and civil engineering works - Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works - Part 2: Civil engineering works*.

JIANG, R..; P. WU (2019). *Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 77, p. 148-163. ISSN 1361-9209, https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.010.

LOUHGHALAM, A.; M. AKBARIAN; F. J. ULM (2017) Carbon management of infrastructure performance: Integrated big data analytics and pavement-vehicleinteractions. *Journal of Cleaner Production,* v. 142.

MASCARENHAS, Z. M. G.; F. BELIZARIO-SILVA; R. SILVA; D. ANDRADE; K. S. VASCONCELOS; L. B. BERNUCCI (2023) *Avaliação da pegada de carbono de misturas asfálticas com material fresado: um estudo de caso brasileiro***.** 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Foz do Iguaçu. DOI: 10.29327/1304307.48-70.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – NAPA (2024) *The carbon footprint of asphalt pavements: A reference document for decarbonization*, SIP-109.SANTOS, J.; A. FERREIRA; G. FLINTSCH (2014) A life cycle assessment model for pavement management: road pavement construction and management in Portugal. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 315–336. https://doi.org/10.1080/10298436.2014.942862.

TUSHAR, Q.; J. SANTOS; G. ZHANG; M. A. BHUIYAN; F. GIUSTOZZI (2022) Recycling waste vehicle tyres into crumb rubber and the transition to renewable energy sources: A comprehensive life cycle assessment, *Journal of Environmental Management*, Volume 323. ISSN 0301-4797, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116289.

VANDEWALLE, D.; V. ANTUNES; J. NEVES; A. C. FREIRE (2020) Assessment of Eco-Friendly Pavement Construction and Maintenance Using Multi-Recycled RAP Mixtures**.** *Recycling*, v. 5, nº 3, p.17. https://doi.org/10.3390/recycling5030017.

Aspectos Ambientais em Pavimentação

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS: ATIVAÇÃO DO LIGANTE DO RAP E TEXTURA DOS AGREGADOS PARA A LONGEVIDADE DE PAVIMENTOS

Paulo Regis Medeiros Passos[1], **Iuri Sidney Bessa**[1]
[1]Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
Esta dissertação investiga a influência do grau de ativação do ligante asfáltico e da textura superficial de agregados virgens nas propriedades mecânicas e de desempenho de misturas asfálticas contendo agregado fresado (RAP). Com o crescente enfoque na sustentabilidade e economia circular na infraestrutura rodoviária, a incorporação de RAP tem se mostrado uma alternativa viável. Contudo, a otimização de seu desempenho depende de fatores como a qualidade do ligante asfáltico residual e as características superficiais dos agregados virgens que compõem a nova mistura. Propõe-se a abordagem dos mecanismos de ativação do ligante e a interação entre a textura dos agregados virgens e a mistura asfáltica, visando compreender seus impactos na trabalhabilidade, compactação e durabilidade dos pavimentos. Os resultados esperados devem contribuir para a maior eficiência no projeto e execução de pavimentos com alto percentual de RAP, promovendo a longevidade e a eficiência da infraestrutura rodoviária.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A engenharia de pavimentação busca integrar a demanda por infraestrutura de transporte com soluções sustentáveis. O agregado fresado (também conhecido como *reclaimed asphalt pavement* ou RAP) surge como um recurso valioso, reduzindo o consumo de materiais virgens e o descarte de resíduos, fomentando a economia circular e mitigando impactos ambientais. Contudo, a incorporação de elevadas porcentagens de RAP em misturas asfálticas a quente (MAQ) impõe desafios que exigem compreensão da interação entre componentes reciclados e virgens para assegurar o desempenho e a durabilidade do pavimento.

Um ponto crucial para o desempenho de misturas recicladas é a ativação do ligante asfáltico presente no RAP. O ligante residual, envelhecido, apresenta maior rigidez e perda de suas propriedades viscoelásticas originais (Shirodkar et al., 2011). É indispensável sua ativação ou rejuvenescimento, seja por temperaturas elevadas ou adição de agentes rejuvenescedores. O grau de ativação influencia diretamente a trabalhabilidade, compactação e, consequentemente, a resistência à fadiga e à deformação permanente do pavimento (Lo Presti et al., 2019). Ferreira (2021) e Maia (2019) ressaltam a importância da ativação do ligante do RAP e seu impacto no projeto de misturas asfálticas recicladas em suas respectivas abordagens.

Paralelamente, a textura superficial dos agregados virgens é relevante na interação agregado-ligante e no desempenho das misturas asfálticas com RAP. A rugosidade e angularidade das partículas afetam a adesão do ligante, o intertravamento e a resistência ao cisalhamento. Agregados mais rugosos e angulares promovem melhor aderência e atrito interno, elevando a estabilidade Bessa (2012). Em misturas com RAP, a seleção de agregados virgens com características texturais adequadas é crucial para compensar deficiências e garantir a durabilidade.

Assim, o objetivo é investigar a interação entre a ativação do ligante do RAP e a textura dos agregados virgens, fornecendo subsídios técnicos para misturas com alto teor de RAP que promovam a sustentabilidade e economia da infraestrutura rodoviária brasileira CNT (2022). A relevância reside na otimização de recursos reciclados, minimizando impactos ambientais e garantindo a longevidade e segurança das rodovias.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada para investigar a influência do grau de ativação do ligante asfáltico e da textura superficial dos agregados virgens nas propriedades de desempenho de misturas asfálticas com RAP baseia-se em uma abordagem experimental laboratorial e análise de dados.

2.1. Caracterização dos Materiais Constituintes

Inicialmente, será realizada a caracterização detalhada dos seguintes materiais:

1. **Agregado fresado (RAP):** Amostras de RAP de diferentes fontes serão caracterizadas quanto à granulometria, teor de ligante asfáltico residual e propriedades reológicas do ligante asfáltico extraído (recuperação e penetração), conforme normas do DNIT (2021). A tese de Ferreira (2021) utiliza "estágios de extração do ligante" para simular diferentes graus de ativação e dissociação de grumos

no RAP, o que será uma base para nossa abordagem de controle do grau de ativação;

2. **Ligantes asfálticos novos (CAPs):** Serão utilizados CAPs de diversas penetrações;
3. **Agentes rejuvenescedores:** Diferentes tipos e dosagens serão avaliados para controlar o grau de ativação do ligante do RAP;
4. **Agregados virgens:** Amostras com variações controladas de textura superficial (angularidade, esfericidade e achatamento) serão empregadas para analisar a influência dessas características.

2.2. Elaboração e Avaliação das Misturas Asfálticas

Após a caracterização individual, diversas misturas asfálticas serão elaboradas em laboratório, variando-se: (i) o percentual de incorporação de RAP; o tipo e dosagem de agente rejuvenescedor (quando aplicável), para controlar o grau de ativação do ligante do RAP; as características de textura superficial dos agregados virgens. Corpos de prova compactados serão produzidos seguindo as diretrizes normativas amplamente utilizadas em pavimentação. Os ensaios de caracterização mecânica e de comportamento incluirão: determinação da densidade aparente, volume de vazios, Módulo de Resiliência (MR), resistência à tração por compressão diametral (RTCD), e ensaios de deformação permanente e de fadiga conforme Tabela 1.

Tabela 1: Misturas asfálticas utilizados na pesquisa.

Mistura asfáltica	RAP %	Tipo e dosagem do rejuvenescedor %	Grau de ativação do ligante asfáltico Cº	Angularidade do agregado	Desempenho esperado
M-01	15%	Tipo A / 5%	150ºC	Baixa	Melhoria em MR e RTCD
M-02	20%	Tipo B / 10%	170ºC	Média	Melhoria em MR, RTCD e resistência à deformação
M-03	25%	Tipo A / 15%	180ºC	Média	Melhoria significativa em trabalhabilidade
M-04	30%	Tipo B / 20%	200ºC	Alta	Ótimo desempenho em MR, RTCD e resistência à fadiga

2.3. Análise de Dados e Implicações para o Desempenho dos Pavimentos

A análise dos resultados consistirá na correlação entre os parâmetros de entrada (grau de ativação do ligante do RAP, caracterizado pela recuperação e penetração do ligante misturado, e as propriedades de textura dos agregados virgens) e as propriedades de desempenho das misturas asfálticas. Ferramentas estatísticas serão utilizadas para identificar relações significativas e quantificar o impacto de cada fator. Essa análise permitirá a comparação do desempenho das misturas asfálticas com RAP em relação a misturas asfálticas convencionais, avaliando a viabilidade técnica e a otimização da composição para maximizar a durabilidade e a resistência aos mecanismos de degradação. O controle experimental será essencial para minimizar as incertezas e garantir a validade dos resultados obtidos, fornecendo subsídios para o desempenho eficaz dos pavimentos

3. RESULTADOS ESPERADOS

Os resultados esperados desta investigação experimental deverão demonstrar a complexa inter-relação entre o grau de ativação do ligante asfáltico do RAP e as características texturais dos agregados virgens no desempenho das misturas asfálticas. Prevê-se que misturas com maior grau de ativação do ligante do RAP apresentarão melhor trabalhabilidade e compactação, resultando em menor percentual de vazios e maior densidade, o que se refletirá em melhor desempenho em ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral. A adequação das propriedades reológicas do ligante misturado será crucial para uma matriz asfáltica coesa e resistente.

Em relação à textura dos agregados virgens, os resultados deverão evidenciar que maior angularidade e rugosidade superficial contribuem significativamente para a estabilidade e resistência à deformação permanente das misturas com RAP. A melhoria no intertravamento granular proporcionada por agregados de boa textura poderá reduzir a suscetibilidade à fluência e otimizar a distribuição de tensões internas. A interação positiva entre a textura dos agregados virgens e o ligante ativado do RAP será fundamental para otimizar as propriedades mecânicas da mistura, compensando heterogeneidades do RAP e garantindo a durabilidade.

A combinação de alta ativação do ligante e agregados virgens texturizados terá a expectativa de produzir as melhores propriedades de desempenho, com maior resistência à deformação permanente e maior vida à fadiga, indicando maior longevidade em serviço. A análise estatística quantificará a contribuição relativa de cada parâmetro, oferecendo subsídios para o projeto de misturas mais eficientes e duráveis. Em suma, os resultados apontarão para a necessidade de considerar conjuntamente a ativação do ligante do RAP e a textura dos agregados virgens para maximizar o potencial de utilização do material reciclado. conforme Tabela 1.

4. CONCLUSÕES ESPERADAS

A presente dissertação buscará confirmar a crucial influência do grau de ativação do ligante asfáltico do RAP e da textura dos agregados virgens nas propriedades de desempenho de misturas asfálticas. A reativação do ligante residual será vital para a trabalhabilidade e coesão, impactando rigidez e resistência à fadiga. A adequação da textura dos agregados virgens será fundamental para o intertravamento granular e a resistência à deformação permanente. Os resultados deverão fornecer evidências claras de que a combinação otimizada desses dois fatores é indispensável para o desenvolvimento de misturas asfálticas com alto teor de RAP que atendam aos requisitos de desempenho de pavimentos modernos. Tais avanços serão essenciais para promover a economia circular na construção civil

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bessa, I. S. (2012) *Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2022) *Anuário CNT do transporte – estatísticas consolidadas 2022*. 1. ed. Brasília, DF: CNT. Disponível em: http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/133 (acesso em 6 jul. 2025).

DNIT (2021) Manual de Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado em usina a quente – Especificação de serviço. Publicação IPR – 033. Brasília -DF.: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Ferreira, W. L. G. (2021) *Degree of RAP binder activation and its impact on recycled asphalt mixture design*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Lo Presti, D. et al. (2019) On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, v. 1, n. 20, p. 1–20. DOI: 10.1080/14680629.2019.1607537.

Maia, A. O. (2019) *Avaliação da Influência do Grau de Ativação do Ligante Asfáltico nas Propriedades do Agregado Fresado*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Shirodkar, P. et al. (2011) A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high fresado hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 1, p. 150–155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045

Paulo Regis Medeiros Passos (pauloregis.medeiros@det.ufc.br)
Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Bloco 703, Campus do Pici, Fortaleza, CE, Brasil.

Gestão de Pavimentos

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE PLANO DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

Caio Raul, Rafael Mota, Thamiris Oliveira, Felipe Camargo, André Vale
RoadRunner Engenharia

RESUMO
Gerenciar uma malha rodoviária envolve ponderar benefícios econômicos com custos investidos e nível de desempenho desejado do pavimento. Este estudo teve como objetivo comparar duas estratégias de elaboração de um plano de manutenção ao longo de 20 anos: uma com ações em ciclos de restaurações em anos pré-estabelecidos ao longo do tempo e outra com as obras sempre que a condição da rodovia atinge os limites técnicos considerados aceitáveis. Avaliou-se questões relativas à viabilidade técnica, vantagens e desvantagens de cada cenário e impactos aos usuários. Concluiu-se que a estratégia de intervenção por gatilho apresentou obras mais distribuídas ao longo dos anos, com ciclos em média a cada 6 anos e um total menor de intervenções ao final dos 20 anos. Apesar de trazer benefícios relativos ao fluxo de caixa e contratações, a distribuição das obras ao longo da rodovia implica em desafios técnico e logísticos para realização dos investimentos anuais.

1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é responsável por grandes impactos na capacidade de escoamento de bens, garantia de competitividade e comercialização entre distintas regiões (Silva, 2017). O desenvolvimento econômico do país está atrelado à qualidade dessa infraestrutura rodoviária, tendo em vista que a maior parte de sua produção é distribuída através do transporte terrestre (Alves, 2016). As malhas rodoviárias representam um patrimônio valioso para qualquer Estado, uma vez que os investimentos para sua construção e manutenção são bastante volumosos. Desta forma, ponderar os benefícios econômicos com os custos investidos e um desejável nível de desempenho dos pavimentos é um desafio importante para os responsáveis pela manutenção de uma malha rodoviária.

Gerenciar uma malha rodoviária envolve orientar e coordenar um complexo sistema de aplicação de recursos técnicos. Para isto, a projeção de parâmetros e análise de investimentos é um procedimento que deve ser constantemente retroalimentado com novos dados, uma vez que a evolução e reabilitação de um pavimento não é um processo exato e é altamente dependente do histórico de condições e diversas outras incertezas como: qualidade da execução, tráfego, clima, condições de drenagem, políticas de manutenção etc. Neste cenário têm sido desenvolvidos diversos Sistemas de Gerências de Pavimentos (SGPs), os quais têm entre suas principais funções auxiliar o tomador de decisões a escolher o melhor programa de manutenção, os locais a serem restaurados e quando aplicar o plano de modo que o uso dos recursos disponíveis possa ser maximizado. Atualmente, existem diversos SGPs desenvolvidos para malhas nacionais, estaduais e locais (Martins *et al*., 2021; Alves, 2016; Silva, 2017; Portela e Portela, 2014; Oliveira, 2013).

Dentre os principais focos das análises realizadas em sistemas de gerência está a perspectiva de atuação programada em curto, médio e longo prazo, dentro de horizontes de projetos individuais para cada ciclo de vida (Silva, 2017), além de atendimentos ao nível de desempenho desejado. Outro fator relevante que deve ser considerado é a quantidade de intervenções previstas na pista, pois as interdições de faixa para realização das atividades de reabilitação do pavimento comprometem a segurança dos usuários e trabalhadores com a redução do número de faixas para tráfego e maior risco de acidentes (FHWA, 2013). A determinação da melhor estratégia a ser seguida, quanto as ações corretivas e preventivas para homogeneização das características da via, é um fator que envolve não apenas a evolução das condições do pavimento com o tempo, mas também questões financeiras, de fluxo de caixa, logísticas e de impacto aos usuários. O objetivo do presente estudo é analisar diferentes estratégias de manutenção na elaboração de um plano de manutenção de uma malha rodoviária ao longo de um horizonte de 20 anos. Além das diferentes estratégias de manutenção e reabilitação, serão ponderadas questões relativas à viabilidade técnica, vantagens/desvantagens de cada cenário e possíveis impactos causados aos usuários.

2. DADOS E METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo foram comparadas duas estratégias distintas de elaboração de um plano de manutenção de pavimentos, de forma a definir as intervenções ao longo de um período de 20 anos. Foram mantidos os padrões de desempenho limites para todos os parâmetros considerados nos dois cenários

analisados, de forma que a execução dos serviços contemplasse seu pleno atendimento ao longo de toda a vida útil. Para isto, a partir dos dados de uma rodovia, foi realizada uma previsão da evolução dos parâmetros funcionais e estruturais do pavimento. A rodovia selecionada para a análise possui cerca de 54 km e geometria em pista dupla, com duas faixas de rolamento por sentido, em toda sua extensão. O tráfego na faixa mais carregada pode ser caracterizado por um número "N" (calculado pela metodologia do *United States Army Corps of Engineers* – USACE) acumulado para 10 anos na faixa de $2{,}5 \times 10^7$ solicitações do eixo padrão. A condição inicial da rodovia é boa, com os seguintes parâmetros médios: porcentagem trincamento FC2+FC3 (%TR) = 1%, afundamento de trilha de roda (ATR) = 1,6 mm, Índice de Gravidade Global (IGG) = 12, *International Roughness Index* (IRI) = 1,88 m/km e deflexão característica (Dc) = 29,8 x 10^{-2} mm.

Para evolução dos parâmetros e análise das diferentes estratégias foi considerado o sistema PavRunner®, o qual é um SGP amplamente utilizado em concessionárias no Brasil, uma vez que possibilita a tomada de decisões sobre parâmetros tipicamente avaliados em contratos de concessão rodoviária. A análise realizada no sistema é individualizada para cada segmento (considerado para estudo como de 1 km), faixa e sentido de rolamento. As condições estruturais, funcionais e solicitações previstas de tráfego que caracterizam a rodovia em questão foram estruturadas em um banco de dados e importadas no sistema como os parâmetros iniciais da modelagem. A partir da evolução anual dos parâmetros, é possível verificar quais os segmentos atingem os limites de edital e propor um plano de manutenção dos pavimentos de acordo com a estratégia selecionada. Os parâmetros levados em consideração no presente estudo foram: %TR ≤ 15%, ATR ≤ 7 mm, IGG ≤ 30, degrau = 0 mm, IRI ≤ 2,69 m/km e Dc ≤ Dadm (calculada pela metodologia DNER PRO-011/79 com horizonte de projeto até a próxima intervenção).

Em seguida, foi simulado com o SGP o desempenho de duas estratégias distintas de manutenção, denominados cenários [A] e [B], que apresentam duas abordagens de intervenções, porém, ambas visando o cumprimento pleno dos parâmetros de desempenho. Para o cenário [A] foi levada em consideração uma estratégia de cronograma de obras pré-definidas em determinados segmentos, com intervenções programadas para os anos 2, 12 e 20 de análise. Para estes ciclos programados foram consideradas intervenções que resultassem em parâmetros do pavimento para uma condição "excelente", de forma que se considerou os seguintes valores pós-intervenção: IRI = 1,9 m/km, ATR = 1 mm, TR = 0%, IGG = 1, Degrau = 0 mm e Dc ≤ Dadm. Foram previstas intervenções de fresagem e recomposição, microfresagem, reforço asfáltico, micro revestimento asfáltico à frio e reconstruções com recobrimento total da área intervinda. Foram incluídas também ações corretivas de manutenção dos parâmetros mínimos exigidos no edital de concessão, sempre que necessário. Estas intervenções visam o atendimento dos parâmetros entre os ciclos de manutenção, com o intuito de se realizar uma solução mínima o suficiente para alongar a vida do pavimento até o próximo ciclo, onde se realiza de fato uma intervenção definitiva dos pavimentos. Desta forma, foram previstas soluções parciais de fresagem e recomposição que buscaram levar os parâmetros para uma condição aceitável para um horizonte de 1 a 2 anos, até o próximo ciclo de intervenção/manutenção.

Já para o cenário [B] foi considerada uma estratégia de gatilhos de intervenções em função do desempenho esperado do pavimento. Ou seja, não são previstos ciclos de intervenção em anos pré-definidos, mas apenas realiza-se uma intervenção em um segmento (e apenas nele) caso ele atinja algum dos limites estabelecidos nos padrões de desempenho. Esta intervenção tem o objetivo de trazer os parâmetros do pavimento para uma condição "excelente", além da compatibilização do reforço em toda a plataforma Foram consideradas as mesmas intervenções tipo e parâmetros pós-obras considerados para as intervenções programadas do cenário [A]. Tanto para as obras programadas (cenário [A]) e por gatilho (cenário [B]), como para as manutenções de parâmetros entre ciclos (cenário [A]), a escolha do percentual das soluções se deu por uma análise individual da condição dos segmentos de forma a indicar soluções que melhor expressassem a condição dos pavimentos no ano da intervenção. Esta análise automatizada demonstra um potencial importante do sistema no auxílio de tomadas de decisões e análises de investimentos.

Em resumo, tem-se para o cenário [A] obras em anos fixos independentemente do desempenho dos pavimentos, com recobrimento total nos anos de obras e soluções funcionais entre ciclos para manutenção dos parâmetros. Para o cenário [B] tem-se obras em anos variáveis, com soluções por gatilho no quilômetro em que há não conformidade de um dos parâmetros, ou seja, no ano de descumprimento de um dos parâmetros de desempenho se recupera os pavimentos inseridos nesse quilômetro com uma solução de

restauração/manutenção que adeque todos os parâmetros. Neste ponto, observa-se que não foram realizadas comparações financeiras entre os cenários, uma vez que estas estão diretamente vinculadas à diversas variáveis, tais como composições de custos, momento de mercado, localização, produtividades etc. As análises estão direcionadas a assuntos como comparações quanto a distribuições de obras no tempo, logísticas envolvidas, impactos aos usuários etc.

3. RESULTADOS

Na Figura 1 estão apresentadas a distribuição de obras previstas ao longo dos 20 anos dos últimos 10 segmentos da faixa externa, sentido crescente, considerando as estratégias de intervenção dos cenários [A] e [B] para o segmento entre os kms 43 e 53, de forma a ilustrar os resultados obtidos. Em cinza escuro foram destacadas as intervenções de restauração que adequam todos os parâmetros a condição "excelente", enquanto em cinza claro foram destacadas as intervenções para manutenção de parâmetros entre ciclos de obras, as quais levam os mesmos para condições intermediárias, com horizontes de 1 a 2 anos.

km	Cenário [A]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
43		R						M		M		R						M		R
44	M	R						M		M		R						M		R
45	M	R								M		R						M		R
46		R						M		M		R						M		R
47		R						M		M		R						M		R
48		R								M	M	R								R
49		R						M		M		R						M		R
50		R								M		R						M		R
51		R						M		M		R						M		R
52		R						M		M		R						M		R
53		R						M		M		R						M		R

Cenário [B]																				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		R						R						R					R
R						R						R						R	
R						R						R						R	
	R						R						R						R
	R						R						R						R
			R						R						R				R
	R						R						R						R
		R						R						R					R
		R						R						R					R
			R						R						R				R
		R						R						R					R

Figura 1: Exemplo distribuição obras nos anos (faixa 2, crescente)

A partir da Figura 1 é possível se verificar que, apesar das duas estratégias de manutenção cumprirem plenamente os parâmetros de desempenho previstos (condição pré-definida na concepção do estudo), existe uma diferença importante na distribuição de obras ao longo do tempo e, consequentemente, impactos decorrentes disto. É possível se verificar que no cenário [A], onde são previstos ciclos de intervenção em anos pré-definidos, as intervenções definitivas de recuperação dos parâmetros são uniformes, com picos de intervenções (e consequentemente investimentos) nos anos programados. Entre os ciclos de investimentos ocorrem intervenções parciais, apenas para correção de parâmetros. Já para o cenário [B], é possível se verificar uma distribuição maior das intervenções ao longo do tempo, sendo realizadas obras apenas nos segmentos que de fato atingiram os limites definidos. A intervenção prevista no ano 2 para o cenário [A], por exemplo, foi distribuída ao longo de 4 anos no cenário [B], gerando uma maior dispersão dos trechos de intervenção previstos. Nessa condição são esperados menos quilômetros de intervenção em maior intervalo de tempo, uma distribuição que permite um fluxo de caixa mais contínuo, facilitando a logística de contratações de materiais e serviços, com possibilidade de contratos mais longos e, por vezes, mais interessantes financeiramente.

Outro ponto a se ponderar é a maior "assertividade" nas intervenções no cenário [B], o qual destina a verba disponível nos locais de acordo com o desempenho esperado, ao invés de intervir em toda a extensão, independente da condição dos pavimentos. Em contrapartida este cenário não possui nenhuma intervenção realizada de forma preventiva, apenas nos locais em que algum dos parâmetros de fato atingiu o limite estabelecido. Manutenções preventivas são extremamente importantes e contribuem muito com o desempenho do pavimento, o que pode economizar em intervenções mais pesadas no futuro. Aqui vale se ressaltar que nem sempre o benefício destas intervenções preventivas e/ou rejuvenescimentos de superfície são bem caracterizados nos modelos de projeção, trazendo evoluções em segmentos que não foram executadas estas soluções semelhantes ao que foram, quando na realidade possuem um desempenho aquém.

Há de se considerar ainda que, apesar da melhor distribuição das obras e menos quilômetros de faixa a intervir, o que uniformiza o fluxo de caixa e facilita questões relativas à contratação, o cenário [B] possui um contraponto importante de prever obra em diversos quilômetros, distribuídos ao longo de toda a rodovia, em praticamente todos os anos. Ou seja, em quase todos os anos irão ocorrer obras, por mais que pontuais, distribuídas em praticamente toda a extensão da malha. A não formação de lotes de intervenção pode balancear os benefícios obtidos na distribuição dos investimentos. Do ponto de vista do usuário, ao invés de passar por

um período menor de obras em uma extensão maior, ele irá passar por um período praticamente constante de obras em extensões menores e mais pontuais. Uma possível alternativa para mitigação deste ponto seria o agrupamento das obras previstas no cenário [B] em blocos de extensões intermediárias em determinados anos.

Analisando-se os segmentos da Figura 1 individualmente é possível se notar ainda uma tendência geral de intervenções a cada 6 anos para o cenário [B]. Ciclos menores entre intervenções de restauração tendem a trazer uma incerteza menor nas previsões de desempenho uma vez que evoluem os parâmetros por menos tempo até a próxima intervenção de correção definitiva de parâmetros. O cenário [A], com ciclos de cerca de 10 anos, traz uma incerteza maior na evolução dos parâmetros e estimativa dos investimentos. Adicionalmente o menor ciclo entre intervenções tende a trazer uma melhor condição geral da malha, posto que se garantirão a restauração completa dos pavimentos sempre que se atingir um gatinho, e não intervenções recorrentes de menor porte. A Figura 2 ilustra a condição média do IRI, TR, IGG e ATR da rodovia analisada ao longo dos 20 anos estudados. É possível se verificar que, com exceção do TR, as médias de todos os demais parâmetros são maiores em quase todos os anos para o cenário [A]. Na Figura 3 estão apresentadas as quantidades de segmentos com intervenção prevista ao longo dos 20 anos analisados para os cenários [A] e [B].

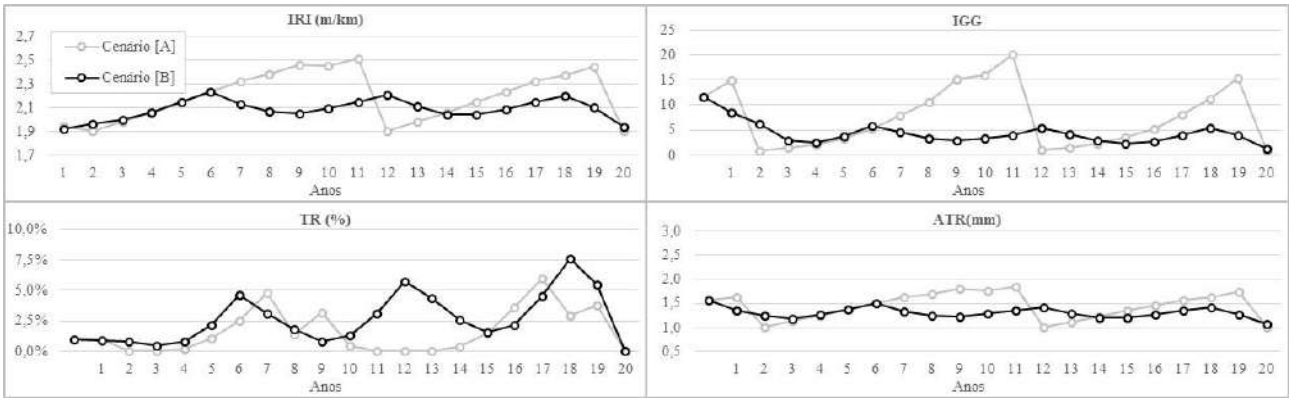


Figura 2: Parâmetros médios da rodovia ao longo dos anos

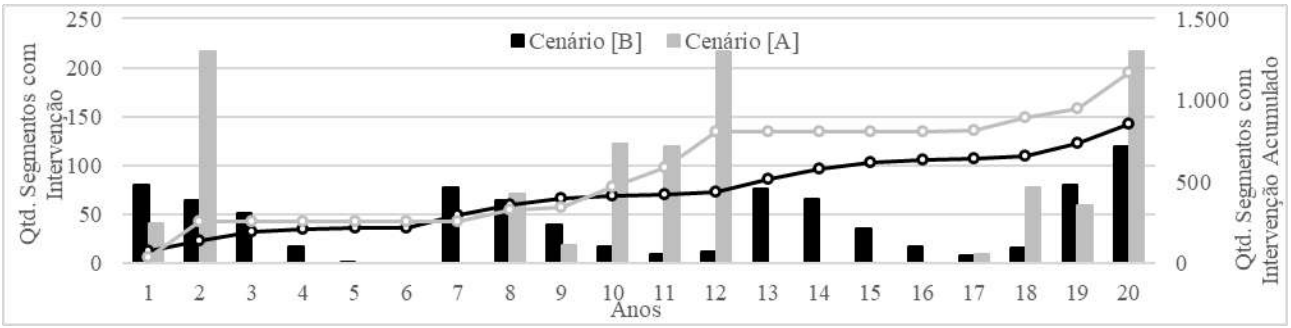


Figura 3: Quantidade de Segmentos com Intervenção por Ano

A partir da Figura 3 é possível se verificar novamente que, apesar de serem estratégias semelhantes quanto ao atendimento de parâmetros, estas apresentam comportamentos bastante distintos quando comparadas em quantidade de segmentos com intervenção ao longo dos anos. O cenário [A] possui um pico de número de segmentos nos anos 2, 12 e 20, os quais são os anos programados de intervenção. Adicionalmente no cenário [A] nota-se também uma tendência de aumento do número de intervenções de manutenção de parâmetros entre os anos 8-11 e entre os anos 17-19, o que é esperado devido a piora gradual da condição geral da rodovia até o próximo ciclo. Na Figura 3 observa-se que, considerando o número de segmentos com intervenção acumulados ao longo dos 20 anos, o cenário [A] apresentou uma quantidade cerca de 35% superior ao cenário [B], muito em função das intervenções programadas em segmento com parâmetros dentro dos limites, que não necessitariam de correção naquele ano, e de gatilhos intermediários para manutenção dos parâmetros. Uma menor quantidade de intervenções impacta em uma menor quantidade de fechamentos de faixas e, consequentemente, impactos logísticos e ao usuário, além da redução do risco oferecido aos usuários e trabalhadores da via nos locais de obra. Por fim, vale ser mencionado um aspecto importante quanto ao cenário apresentados, em especial o cenário [B], que envolve a sua execução na prática em um plano de manutenção.

Ao longo do decorrer dos anos, devido as diversas variáveis como restrições orçamentárias, executivas e de prazo; é muito comum a prorrogação das intervenções necessárias e/ou execução de intervenções paliativas, as quais não levam os parâmetros para as condições desejadas pós-obra. Isto é, quando atingido algum gatilho no cenário [B], por exemplo, ao invés de realizar uma intervenção de restauração completa é realizada apenas uma fresagem e recomposição parcial. Esta prática embora atenda momentaneamente, compromete o desempenho do pavimento, afetando os investimentos futuros previstos.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo comparou duas estratégias de elaboração de planos de manutenção de forma a definir as intervenções ao longo de um período de 20 anos. Foram mantidos os padrões de desempenho limites para todos os parâmetros considerados nos dois cenários analisados, de forma que a execução dos serviços contemplasse o pleno atendimento ao longo de toda a vida útil. Com base nas análises realizadas foi possível concluir que a estratégia por gatilhos, cenário [B], em comparação com o cenário [A]:

- Apresentou intervenções mais distribuídas ao longo dos anos quando comparada com as obras programadas do cenário [A]. Esta maior distribuição das intervenções oferece um fluxo de caixa mais homogêneo e é benéfica para contratação de materiais e serviços, em contrapartida, dificulta a concentração da obra em blocos, uma vez que as obras estão distribuídas ao longo da rodovia em quase todos os anos (o que pode ser negativo do ponto de vista do usuário);
- Possui uma maior assertividade nas intervenções, todavia praticamente não contempla soluções preventivas ou recobrimentos apenas para rejuvenescimentos de superfície, fato que nem sempre é bem identificado nas modelagens;
- Apresentou ciclos de obras médios a cada 6 anos, os quais se realizados propriamente, tendem a se traduzir em uma condição melhor geral da malha;
- Apresentou um número de segmentos com intervenção acumulados ao longo dos 20 anos menor, muito em função das intervenções programadas em segmento com parâmetros dentro dos limites e da necessidade de recuperações de gatilhos intermediários para manutenção do cenário [A] com vistas ao atendimento aos critérios técnicos pré-estabelecidos.

Em suma, os dois cenários analisados possuem suas vantagens e desvantagens sob diversos pontos de vista e questões a serem consideradas. A determinação da melhor estratégia a ser seguida é um fator que envolve não apenas a evolução das condições do pavimento, mas paralelamente questões financeiras, de fluxo de caixa, logísticas e de impacto aos usuários. Desta forma, o sucesso de qualquer plano de manutenção depende grandemente do quanto este foi cumprido na prática e, inevitavelmente, de sua retroalimentação sempre que houver novas informações disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, K. R. (2016). *A Gestão de Pavimentos Aplicada à Manutenção Rodoviária*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Silva, A. H. M. (2017). *Proposta de Procedimento para Análise de Alternativas de Manutenção em Sistemas de Gerência de Pavimentos*. Tese (doutorado). Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Martins, R. B. B. Macêdo A. N. Neves R. M. Martins V. W. B. (2021). *Análise da Manutenção de Pavimentos Urbanos: Uma Proposta de Implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos*. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, V.13, N.25, P. 22-39, 2021

Portela, M. P. S. Portela R. R. J. (2014). *Proposta de Sistema de Gerenciamento de Pavimento das Rodovias Estaduais de Mato Grosso do Sul*. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC. Teresina - PI

Oliveria, J. J. (2013). Experiência de Implantação de Sistema de Gerência de Pavimentos em Cidade de Médio Porte – Estudo de Caso: Anápolis – GO. Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

FHWA - Federal Highway Administration (2013). *Work Zone Safety Dara Collection and Analysis Guide*. McLean, VA.

Caio Mascarenhas Raul (caio.raul@rrunner.com.br)
Rafael Vicente Mota (rafael.mota@rrunner.com.br)
Thamiris Oliveira (thamiris.oliveira@rrunner.com.br)
Felipe Filizzola Camargo (felipe.camargo@rrunner.com.br)
André Felipe Vale (andre.vale@rrunner.com.br)
RoadRunner Engenharia | Rod. Geraldo Scavone, 2080, Galpão 37, Jardim Califórnia – Jacareí, SP, Brasil

AVALIAÇÃO DO USO DO *LIDAR* EM *SMARTPHONES* PARA CLASSIFICAÇÃO DE BURACOS

Carlos Henrique Rodrigues Bento, Larissa de Abreu Gimenes, Átila Marconcine de Souza, Carlos Alberto Prado da Silva Júnior, Heliana Barbosa Fontenele
Universidade Estadual de Londrina

RESUMO
Este estudo avaliou a viabilidade do uso do sensor *Light Detection And Ranging* em *smartphone* como alternativa ao método manual na classificação de buracos em pavimentos asfálticos. Foram analisadas 12 ocorrências do defeito buraco, cujas dimensões e níveis de severidade foram determinados manualmente e por meio de nuvem de pontos processadas nos *softwares* Recap Pro e Revit. Os resultados foram comparados estatisticamente por meio do teste *t* de Student. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os métodos, e as classificações de severidade se mantiveram inalteradas. Conclui-se que tal tecnologia em *smartphones* apresenta potencial promissor para análises de pavimentos, oferecendo praticidade, segurança e precisão, contribuindo para a eficiência dos Sistemas de Gerência de Pavimentos.

1. INTRODUÇÃO

A degradação de pavimentos asfálticos exige que as agencias de transportes realizem avaliações e manutenções contínuas nas vias, já que a presença de defeitos, como buracos e trincas, pode influenciar diretamente na segurança do usuário e no desempenho da via, gerando assim uma alta demanda de recursos para as agências (Ragnoli *et al*., 2018). Nesse aspecto, a implementação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é fundamental. O SGP consiste em um conjunto de métodos utilizados para administrar e determinar a melhor forma de destinar os recursos para atividades de Manutenção e/ou Reabilitação (M&R). A avaliação de pavimentos é uma das etapas mais importantes do SGP, pois, elas são o ponto de partida para futuras decisões implementadas no sistema (DNIT, 2011).

As avaliações de pavimentos podem ser divididas em funcionais, estruturais e de segurança. As avaliações funcionais são o foco do presente trabalho e têm como ênfase os defeitos superficiais e seus impactos no conforto ao rolamento. Diversos tipos de defeitos podem ocorrer na superfície dos pavimentos asfálticos. A norma DNIT 005/2003 – TER define os termos técnicos em defeitos que ocorrem em pavimentos e padroniza a linguagem em território nacional (DNIT, 2003), este trabalho focará na análise e classificação dos defeitos que a norma estabelece como buracos. Para realizar a análise dos níveis de severidade desses defeitos, será utilizado o Manual de Identificação de Defeitos (MID) onde é apresentado os níveis de severidade dos buracos e como podem ser classificados. Esses níveis descrevem categorias distintas de progressão do defeito e se relacionam à necessidade de reabilitação, podendo ser baixo, médio ou alto (Domingues, 1993).

Atualmente, os métodos de análises de defeitos e determinação do nível de severidade são predominantemente manuais e visuais. Embora possuam um longo histórico desses métodos, eles podem apresentar limitações, como subjetividade, alto tempo para coleta de dados, inconsistência nas medições e falta de segurança ao trabalhador que irá executar as medições (Ragnoli *et al*., 2018). Segundo Tommaselli (2023), nesse cenário, técnicas de sensoriamento remoto surgem como alternativas promissoras, entre elas a fotogrametria, que permite a medição de objetos diretamente nas imagens, desde que esses estejam visíveis em pelo menos duas imagens tomadas adequadamente. Essa técnica utiliza a luz visível refletida pelos objetos e captada por uma câmera métrica, possibilitando a reconstrução tridimensional desses objetos. No entanto, a fotogrametria ainda possui algumas limitações, como a dependência de uma boa iluminação e da clareza das imagens.

Trabalhos como o de Feng *et al.* (2022) vêm mostrando que opções como a varredura laser terrestre se apresentam como mais eficazes, pois possuem a capacidade de capturar dados em alta resolução 3D, permitindo uma análise mais detalhada e precisa das fissuras e deformidades. Além disso, apresentam menor sensibilidade a condições de iluminação e contraste, que podem afetar sistemas baseados em imagem, e possibilitam a automação na análise de grande quantidade de dados, acelerando o processo de inspeção. Também potencializam a integração com outras tecnologias de sensoriamento para uma avaliação mais completa do estado da pavimentação.

Com o avanço da tecnologia surgem novas opções de scanners 3D, sendo o *Light Detection And Ranging* (*LiDAR)* uma das principais opções. O *LiDAR* faz uso de ondas ópticas, que estão em regime de comprimento

de onda mais curto em comparação com as ondas de rádio e, portanto, tem potencial para atingir maior precisão na detecção 3D. O *LiDAR* tem sido amplamente aplicado em metrologia, monitoramento ambiental, arqueologia, robótica, e mostra alto potencial para ser usado em direção autônoma (Li *et al*., 2022). Estudos como o de Faisal e Gargoum (2023) vêm aplicando o *LiDAR* e demonstrando que ele consegue identificar regiões com níveis elevados de defeitos, contribuindo para a tomada de decisão na manutenção e reabilitação de estradas. Além disso, possibilita uma avaliação mais abrangente e eficiente do estado da pavimentação em grande escala, sem interromper o tráfego ou colocar trabalhadores em risco. Alguns estudos já vêm utilizando o *LiDAR* em *smartphones* para auxiliar na análise de pavimentos, como o trabalho de Suleymanoglu *et al.* (2023).

Buscando avançar nas alternativas tridimensionais para a gerência de pavimentos, este estudo tem como objetivo principal analisar se a utilização do sensor *LiDAR* presente em um *smartphone* pode gerar resultados de medição e classificação do nível de severidade de buracos comparáveis aos obtidos por métodos tradicionais de avaliações de defeitos realizados de forma manual.

2. METODOLOGIA

2.1 Determinação das dimensões dos buracos em campo

Para a realização deste trabalho, foram selecionadas 12 ocorrências do defeito buraco. Os níveis de severidade do defeito estudado foram determinados manualmente, conforme o estabelecido no MID, com auxílio de uma trena metálica. O MID determina que os buracos sejam medidos com base na sua profundidade (em centímetros) e área da superfície (em metros quadrados). A área é obtida pelo intermédio de um retângulo circunscrito no buraco, com um lado paralelo ao eixo da rodovia.

O MID classifica a severidade desse defeito em três níveis: severidade baixa, média e alta, na Tabela 1, é possível constatar como as severidades são classificadas conforme este manual.

Tabela 1: Classificação do nível de severidade

Severidade	Profundidade (cm)	Área (m²)
Baixa	< 2,5	< 0,28
Média	< 2,5	> 0,28
Média	2,5 a 5,0	< 0,28
Média	> 5,0	< 0,10
Alta	2,5 a 5,0	> 0,28
Alta	> 5,0	> 0,10

2.2 Coleta e processamento da nuvem de pontos

Posteriormente, na etapa de avaliação manual, nuvens de pontos foram coletadas utilizando o sensor *LiDAR* presente no *smartphone* iPhone 15 Pro. Para tratamento e armazenamento das nuvens de pontos coletadas foi utilizada a versão gratuita do aplicativo *3D Scanner App* (versão 1.1.6). Este aplicativo é uma ferramenta simples e robusta que processa fotos e vídeos em modelos 3D de objetos e espaços utilizando a fotogrametria. A coleta foi realizada por meio de varredura do *smartphone* ao redor de cada buraco, garantindo a aquisição completa da nuvem de pontos.

Em sequência, os dados coletados em formato de nuvem de pontos foram importados para o *software* Autodesk Recap Pro (versão 2024.1.3), utilizado em sua versão acadêmica. Trata-se de uma ferramenta de digitalização 3D e captura da realidade, capaz de gerar modelos tridimensionais a partir de fotografias ou digitalizações a laser, convertendo objetos e ambientes reais em representações digitais precisas.

Inicialmente, realizou-se o recorte dos pontos para remover informações desnecessárias e otimizar a análise dos buracos, conforme é possível observar na Figura 1.

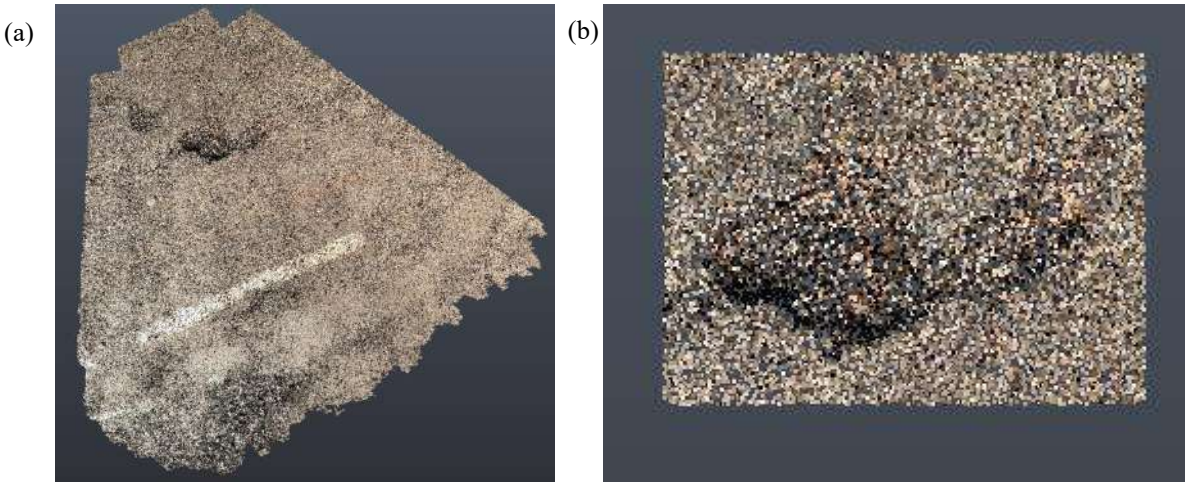


Figura 1: Nuvem de pontos (a) antes e (b) após recorte

Na etapa seguinte, as medidas horizontais e verticais dos buracos foram obtidas utilizando o *software* Recap Pro (Figura 2), permitindo, assim, o cálculo da área em conformidade com os procedimentos estabelecidos no MID. Para a determinação da profundidade, optou-se pelo uso do *software* Autodesk Revit (versão 2024.3.3 Update), também em sua versão acadêmica. Este programa, voltado à modelagem paramétrica de formas, estruturas e sistemas em 3D, foi selecionado por proporcionar maior clareza e precisão na determinação da cota de profundidade a partir da nuvem de pontos, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 2: Medição da nuvem de pontos no Recap Pro



Figura 3: Nuvem de pontos no Revit

Com os cálculos de áreas realizados por meio do Recap Pro e a profundidade do Revit, foi possível determinar o nível de severidade para cada buraco encontrado. Para validar os resultados do procedimento utilizado, os níveis de severidade obtidos por meio da nuvem de pontos foram comparados com os obtidos em campo, de forma manual.

3. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados encontrados para cada modelo de análise, assim como a comparação entre as classificações de severidade determinadas para cada amostra. Os resultados das dimensões (D1 e D2), da profundidade (P), da área de influência (A) e do nível de severidade dos buracos analisados em campo de forma manual, estão expostos na Tabela 2. Os mesmos parâmetros, quando obtidos pela análise das nuvens de pontos, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Classificação do nível de severidade para os buracos em campo

Amostra	D1 (cm)	D2 (cm)	P (cm)	A (m²)	Severidade
1	43,0	13,0	2,0	0,06	Baixa
2	28,4	14,0	2,4	0,04	Baixa
3	37,9	17,8	5,2	0,07	Média
4	42,0	27,8	3,5	0,12	Média
5	70,0	23,6	3,7	0,16	Média
6	11,6	14,9	1,8	0,02	Baixa
7	26,4	9,8	1,7	0,03	Baixa
8	29,4	25,4	3,0	0,07	Média
9	30,9	15,7	3,0	0,05	Média
10	30,4	20,8	3,0	0,06	Média
11	33,4	21,0	1,5	0,07	Baixa
12	46,8	36,0	3,7	0,17	Média

Tabela 3: Classificação do nível de severidade para os buracos por meio da nuvem de pontos

Amostra	D1 (cm)	D2 (cm)	P (cm)	A (m²)	Severidade
1	48,6	14,4	2,3	0,07	Baixa
2	28,7	12,0	2,4	0,03	Baixa
3	43,7	21,1	5,6	0,09	Média
4	39,9	32,0	3,5	0,13	Média
5	66,2	23,9	3,8	0,16	Média
6	11,5	15,3	1,9	0,02	Baixa
7	27,9	11,0	1,3	0,03	Baixa
8	27,4	24,5	3,4	0,07	Média
9	33,3	13,3	2,6	0,04	Média
10	31,7	19,6	3,2	0,06	Média
11	33,4	28,8	1,1	0,10	Baixa
12	45,1	40,3	3,8	0,18	Média

Com esses dados, foi realizada uma comparação detalhada entre os valores de cada dimensão obtidos pelos dois métodos. Para a dimensão D1, a maior diferença absoluta observada foi de 5,8 cm, registrada na amostra 3, que equivale a variação de 15%. Em relação à dimensão D2, a amostra 11 apresentou a maior diferença, de 7,8 cm, representando uma variação de 37%. Quanto à profundidade, a discrepância mais elevada foi de 0,43 cm, também na amostra 3, variando 8%. No que se refere à área calculada, a maior discrepância foi de 0,03 m², verificada na amostra 11. Apesar das variações nas medições, ao se comparar os resultados finais ambos os métodos chegaram à mesma classificação para as severidades dos buracos estudados.

Para verificar a significância estatística das diferenças observadas entre os procedimentos, foi aplicado o teste *t* de Student para amostras pareadas. A hipótese nula (H_0) considerou que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos parâmetros analisados (D1, D2, profundidade e área) obtidos pelos métodos manual e digital. O teste foi conduzido com um nível de significância (α) de 5% ($p < 0,05$), assumindo variâncias homogêneas entre as amostras. A Tabela 4 apresenta os valores t críticos e os valores t calculados para cada parâmetro analisado (dimensões D1 e D2, profundidade e área), além da conclusão quanto à aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0).

Tabela 4: Teste *t* de Student

Parâmetro	Valor *t* Crítico	Valor *t* Calculado	Resultado
Dimensão 1	2,074	- 0.2199	Aceitar H0
Dimensão 2	2,074	-0,326	Aceitar H0
Profundidade	2,074	0,2208	Aceitar H0
Área do retângulo	2,074	- 0,1620	Aceitar H0

Tendo assim, os valores *t* calculados para D1 (-0,2199), D2 (-0.326), profundidade (0,2208) e área do retângulo (-0,1620) foram todos inferiores ao valor *t* crítico (2,074). Dessa forma, com 95% de confiança, não se rejeita a hipótese nula (H_0), indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias das

medições obtidas pelos métodos manual e por nuvem de pontos para a amostra estudada.

Por fim, a comparação entre os níveis de severidade atribuídos com base nos dois métodos de análise revelou que, apesar das variações nas medidas de área e profundidade, as diferenças não foram suficientes para alterar a classificação final de severidade dos defeitos. Assim, todas as amostras mantiveram a mesma classificação de severidade (Baixa ou Média), tanto no método manual quanto no digital utilizando a nuvem de pontos.

4. CONCLUSÃO

Este estudo investigou o potencial do sensor *LiDAR* embarcado em *smartphone* como alternativa aos métodos tradicionais de avaliação manual de buracos em pavimentos asfálticos. O procedimento empregado envolveu a análise comparativa de 12 buracos por métodos manual e digital (com uso de nuvem de pontos), e o processamento dos dados digitais feito nos *softwares* Recap Pro e Revit. Os resultados revelaram que, apesar de pequenas variações entre os valores obtidos, não houve diferença estatisticamente significativa entre os métodos, e todas as amostras mantiveram o mesmo nível de classificação de severidade.

Dessa forma, conclui-se que o uso do *LiDAR* embarcado em *smartphones* demonstra grande potencial como ferramenta eficaz para a análise funcional de pavimentos, destacando-se pela praticidade na coleta de dados. Nesse contexto, o avanço das soluções 3D portáteis pode contribuir significativamente para a modernização dos Sistemas de Gerência de Pavimentos, oferecendo maior precisão, agilidade e eficiência na identificação e monitoramento de defeitos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, bem como ao Laboratório de Engenharia de Transportes do Centro de Tecnologia e Urbanismo (LET-CTU) e à Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela infraestrutura fornecida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNIT (2003) DNIT 005/2003 – TER: Defeitos em pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia. Pub. IPR. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2011) Manual de Gerência de Pavimentos. Pub. IPR-745. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Domingues, F. A. A. (1993) *MID: manual de identificação de defeitos de revestimentos asfálticos de pavimentos*. Monografia (livro). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/000861238 (acesso em 01/07/2025).

Faisal, A. e Gargoum S. (2023) *Automated assessment of pavement rutting using mobile LiDAR data*. In TAC Conference & Exhibition (Ottawa, ON, Canadá). Ottawa: Transportation Association of Canada, p. 914–917. Disponível em: https://www.tac-atc.ca/en/knowledge-centre/technical-resources-search/conference-papers/automated-assessment-of-pavement-rutting-using-mobile-lidar-data/.

Feng, Z. *et al.* (2022) Pavement distress detection using terrestrial laser scanning point clouds – Accuracy evaluation and algorithm comparison. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 3, p. 100010. DOI: 10.1016/j.ophoto.2021.100010.

Li, N. *et al.* (2022) A progress review on solid-state LiDAR and nanophotonics-based LiDAR sensors. *laser & photonics reviews*, v. 16, n. 11, p. 2100511. DOI: 10.1002/lpor.202100511.

Ragnoli, A.; M. De Blasiis e A. Di Benedetto (2018) Pavement distress detection methods: a review. *Infrastructures*, v. 3, n. 4, p. 58. DOI: 10.3390/infrastructures3040058.

Suleymanoglu, B. *et al*. (2023) *Road Infrastructure Mapping by Using iPhone 14 Pro: An Accuracy Assessment*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLVIII-M-1-2023, p. 24-28. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-347-2023, 2023.

Tommaselli, A. M. G. (2003) *Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância*. *Geodésia Online*, n. 4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319203931_Um_Estudo_sobre_as_Tecnicas_de_Varredura_a_Laser_e_Fotogrametria_para_Levantamentos_3d_a_curta_Distancia (acesso em 01/07/2025).

Carlos Henrique Rodrigues Bento (carlos.henrique@uel.br); *Larissa de Abreu Gimenes* (larissa.gimenes@uel.br); *Átila Marconcine de Souza* (atila.marconcine@uel.br); *Carlos Alberto Prado da Silva Júnior* (cprado@uel.br); *Heliana Barbosa Fontenele* (heliana@uel.br)
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380 - Campus Universitário, Londrina - PR

ESTUDO CORRELACIONAL ENTRE O ÍNDICE DE CONDIÇÃO DO PAVIMENTO (ICP) E INDICADORES SOCIOECONÔMICOS NO BAIRRO DE BATISTA CAMPOS BELÉM-PA

Marcela Caetano Pereira, Pâmela Ketlen da Silva Prado, Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar, Abel Lemos Pereira
Universidade Federal do Pará (UFPA)

RESUMO
Este estudo tem como objetivo contribuir para as pesquisas relacionadas à qualidade de pavimentos, utilizando como estudo de caso o bairro de Batista Campos – Belém-PA. Para tanto, analisou-se o Índice de Condição do Pavimento (ICP) e sua correlação com indicadores demográficos e socioeconômicos. Os valores de ICP, obtidos nos anos de 2021 e 2022, foram associados à malha setorial e a vinte indicadores do Censo Demográfico de 2010 do IBGE. Observou-se correlação linear positiva forte entre o ICP e o percentual de mulheres residentes (r = 0,74), bem como com a proporção de pessoas idosas responsáveis pelos domicílios (r = 0,70). Em contrapartida, identificaram-se correlações negativas entre o ICP e o percentual de pessoas autodeclaradas negras (r = -0,57), além da média de moradores por domicílio (r = -0,54). Os resultados indicam a relevância da integração de dados socioeconômicos à gestão de pavimentos urbanos, como suporte para decisões mais eficientes.

Palavras-chave: Sistema de gerência de pavimentos urbanos; Índice de condição do pavimento; Indicadores demográficos e socioeconômicos

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) têm como finalidade otimizar os recursos públicos destinados à manutenção viária, assegurando durabilidade e qualidade ao longo da vida útil do pavimento (Páez, 2015). Entretanto, a mobilidade urbana envolve fatores mais amplos, incluindo ocupação do solo, desigualdade social e aspectos culturais e políticos (Garcia, 2018). Dessa forma, torna-se imprescindível a integração de informações confiáveis para subsidiar um planejamento urbano mais eficiente. Belém, capital do Pará, apresenta elevado índice de desigualdade socioeconômica (GINI = 0,582) e infraestrutura urbana precária, reflexo de crescimento desordenado (Souza, 2016). Neste contexto, o bairro de Batista Campos foi selecionado como área de estudo devido ao seu valor histórico e diversidade socioespacial (Bahia e Figueiredo, 2014). Este trabalho dá continuidade a estudos anteriores sobre o Índice de Condição do Pavimento (ICP) (Sousa, 2021; Aihuki, 2022), correlacionando-o, neste trabalho, com variáveis demográficas do Censo 2010. A pesquisa busca suprir a falta de dados locais e apoiar políticas públicas de mobilidade urbana, conforme previsto na Lei nº 12.587/2012, propondo estratégias mais justas e eficazes para o uso do espaço urbano.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E MÉTODO

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido no bairro Batista Campos, Belém-PA, cuja população é de 19.136 habitantes em 1,42 km² (IBGE, 2010). A delimitação legal é estabelecida pela Lei Municipal nº 7.806/96, e o bairro é vizinho aos bairros de Nazaré, Campina, Cremação, Condor, Jurunas e Cidade Velha. Sua formação remonta ao processo de interiorização urbana (Bahia e Figueiredo, 2014), com posterior gentrificação e contrastes socioespaciais (Araújo Júnior e Azevedo, 2012). Bairro apresenta topografia suave, com cotas variando entre 5 e 19 m, com áreas mais baixas sujeitas a alagamentos (Sousa, 2021; Campos et al., 2015). Na Figura 1, apresentam-se os setores censitários, nos quais o bairro é dividido, conforme IBGE, 2010.



Figura 1: Codificação dos Setores censitários do Bairro de Batista Campos

2.2. Método

O método da pesquisa consistiu nas seguintes etapas:

1. **Extração de dados**: Dados censitários foram obtidos do IBGE (2010), atendo-se às variáveis relacionadas a domicílios, renda e população. (IBGE, 2011).
2. **Codificação de setores**: O bairro foi dividido em 22 setores censitários (IBGE, 2010) – Figura 1.
3. **Codificação de trechos**: Foram considerados 148 trechos de pavimentos (Souza, 2016), dos quais 142 eram asfaltados, com base em estudos anteriores (Souza, 2016; Aihuki, 2022; Neves e Cardoso, 2023).
4. **Inventário de rede**: Informações sobre extensão, largura, cota e ICP foram coletadas via Google Earth Pro, topographic-map.com e estudos anteriores (Souza, 2016; Aihuki, 2022).
5. **Parametrização de dados**: Associaram-se trechos de via aos setores censitários, ponderando a contribuição por extensão e localização (coeficientes 1 ou 0,5).
6. **Análise de dados**: Foram analisados os valores de ICP, cotas e 4239 variáveis censitárias para identificar padrões e preparar os dados para correlação.
7. **Correlação ICP × Indicadores**: Realizaram-se correlações de Pearson (r) entre ICP, cotas e indicadores demográficos. Correlações com p-valor < 0,05 foram consideradas estatisticamente significativas (Callegari-Jacques, 2007).

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O ICP médio em 2021 foi 85,62 (classificação 'ótimo'), reduzindo em 2022 para 79,59 ('boa'). A piora foi atribuída à deterioração natural, agravamento de defeitos, restrições orçamentárias decorrentes da pandemia e descontinuidade administrativa após 2020 (Aihuki, 2022).

3.1. Correlação com indicadores socioeconômicos

As correlações revelaram: forte relação com IDH (r = 0,89), correlação positiva com renda (r = 0,55), correlação negativa com número de moradores por domicílio (r = -0,54), positiva com idosos responsáveis (r = 0,70) e mulheres idosas alfabetizadas (r = 0,78), negativa com proporção de negros e pardos (r = -0,57). Tais dados serão mostrados em detalhes nos subitens sequentes.

3.1.1. Correlação ICP versus IDH

Os valores de IDH são importantes, pois relacionam informações que possibilitam mensurar a qualidade de vida de determinada população, como: longevidade e saúde, educação e padrão de vida. A Tabela 1, agrupa esses valores levando em consideração os setores censitários pelo bairro vizinho mais próximo.

Tabela 1: ICP e IDH dos setores de Batista Campos em relação ao bairro vizinho mais próximo

Bairro Vizinho mais próximo do Setor Censitário	ICP 2021	ICP 2022	IDH 2010
Nazaré	89,00	84,28	0,927
Campina	90,38	82,25	0,918
Jurunas	84,23	78,82	0,802
Cremação	82,56	77,13	0,724
Cidade Velha	80,31	75,56	0,840
Condor	82,39	71,59	0,644

Os dados revelaram forte correlação positiva entre IDH e ICP: r = 0,70 em 2021 e r = 0,89 em 2022 (Figura 2), ambos com p < 0,05. Setores próximos aos bairros de maior IDH – Nazaré (0,927) e Campina (0,918) – apresentaram melhores condições de pavimento. Este resultado corrobora o estudo de Costa et al. (2021), que

encontrou relação semelhante em Fortaleza-CE.



Figura 2: Autores, 2025

3.1.2. Correlação ICP versus Renda do responsável pelo domicílio

Foi verificada correlação positiva regular entre o ICP e a renda do responsável pelo domicílio ($r = 0,55$, $p < 0,01$). O dado sugere (Figura 3) que regiões com maior renda recebem mais atenção do poder público na manutenção das vias, tal como demonstrado pela pesquisa sobre a qualidade de rodovias da Confederação Nacional dos Transportes (CNT), que associa maiores PIBs per capita a melhores condições viárias.

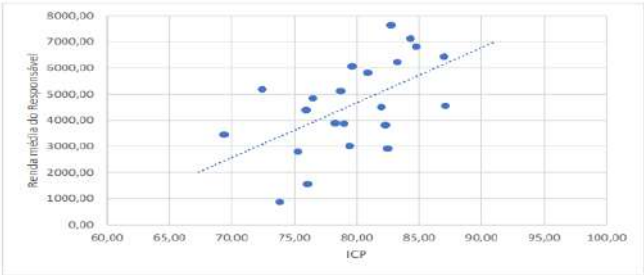


Figura 3: Autores, 2025

3.1.3. Correlação ICP versus Número de moradores por domicílio

A média de moradores por domicílio mostrou correlação negativa regular com o ICP ($r = -0,54$, $p < 0,01$). O adensamento populacional está associado a piores condições de vida e infraestrutura urbana, conforme Pasternak (2016), o que se refletiu também na condição do pavimento em Batista Campos. A Figura 4 indica os resultados obtidos da correlação realizada entre os parâmetros.

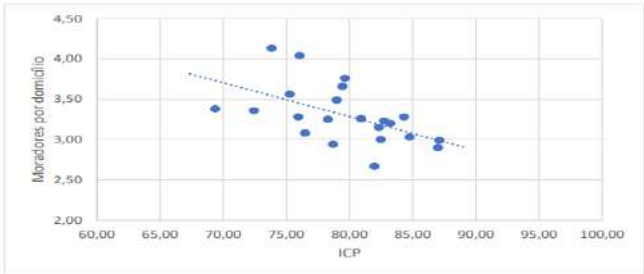


Figura 4: Autores, 2025

3.1.4. Correlação ICP versus Faixa etária e Alfabetização dos responsáveis

A Figura 5 demostra que houve correlação positiva forte entre o percentual de idosos responsáveis pelos domicílios e o ICP ($r = 0,70$, $p < 0,05$), sendo ainda mais forte entre mulheres idosas alfabetizadas ($r = 0,78$, $p < 0,01$). A presença desse grupo pode estar relacionada ao acúmulo de rendas (pensão e aposentadoria), o que indica maior poder econômico agregado em certas regiões.

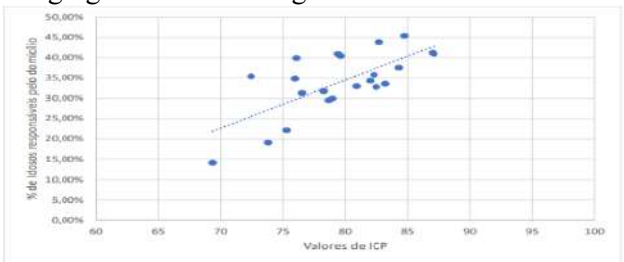


Figura 5: Autores, 2025

3.1.5. Correlação ICP versus Gênero

Verificou-se que o percentual de mulheres apresentou correlação positiva com o ICP (r = 0,74, p < 0,01), enquanto o percentual de homens apresentou correlação negativa de mesma magnitude (Figura 6). Embora a razão dessa associação não tenha sido identificada, os dados sugerem que se trata de uma possível correlação espúria, merecendo investigação futura.

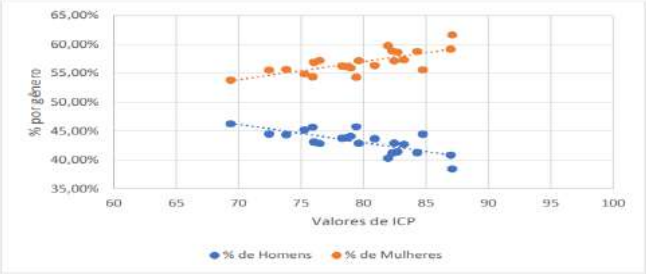


Figura 6: Autores, 2025

3.1.6. Correlação ICP versus Cor ou Raça

Setores com predominância de pessoas brancas apresentaram ICP superior, com correlação positiva regular (r = 0,57), enquanto os de maior proporção de pretos e pardos apresentaram correlação negativa (r = -0,57, p < 0,01). O dado sugere que a desigualdade racial pode influenciar o padrão de investimento urbano, mesmo além da variável renda. A Figura 7 indica os resultados obtidos das correlações realizadas.

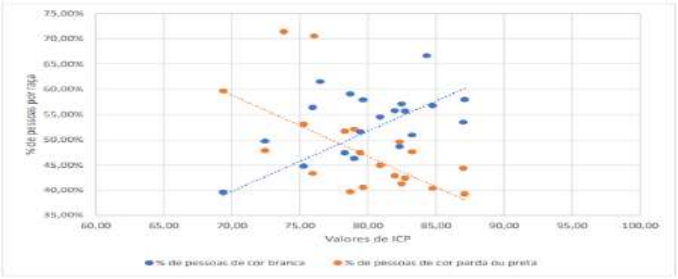


Figura 7: Autores, 2025

3.3. Outras correlações com dados do Censo 2010

Foram observadas ainda correlações significativas com outras variáveis do Censo 2010:

- Parâmetro 03 – % de casas: correlação negativa (r = -0,48);
- Parâmetro 04 – % de apartamentos: correlação positiva (r = 0,48);
- Parâmetro 05 – % de imóveis próprios e quitados: positiva (r = 0,58);
- Parâmetro 06 – % de domicílios com apenas 1 banheiro: negativa (r = -0,55);
- Parâmetro 07 – % de apartamentos alugados: positiva (r = 0,52);
- Parâmetro 08 – % de apartamentos com 2 banheiros: positiva forte (r = 0,60);
- Parâmetro 09 – % de domicílios com 1 morador: positiva (r = 0,57);
- Parâmetro 11 – % com energia elétrica com medidor exclusivo: positiva (r = 0,56);
- Parâmetro 14 – % de pessoas alfabetizadas (≥5 anos): positiva (r = 0,48);
- Parâmetro 20 – % de filhos/enteados nos domicílios: negativa (r = -0,59);

Essas correlações sugerem que o padrão urbano e o tipo de ocupação do solo estão diretamente relacionados à qualidade da infraestrutura pública.

5. CONCLUSÃO

O estudo evidenciou que o Índice de Condição do Pavimento (ICP) apresenta correlações significativas com variáveis demográficas e socioeconômicas no bairro Batista Campos. Verificou-se que setores com melhores condições socioeconômicas tendem a apresentar pavimentos em melhor estado, enquanto áreas mais vulneráveis registram piores indicadores, revelando desigualdades internas mesmo em um bairro predominantemente classificado como de classes A e B.

As correlações positivas observadas com a renda média e o Índice de Desenvolvimento Humano reforçam a

associação entre melhores condições de vida e maior qualidade da infraestrutura viária. Em contrapartida, as correlações negativas com a densidade domiciliar e com o percentual de pessoas de cor preta ou parda sugerem que a vulnerabilidade social está relacionada a condições de pavimentação mais precárias. Algumas associações, como a identificada com o percentual de mulheres residentes, ainda carecem de aprofundamento para fundamentar explicações causais mais consistentes.

Como encaminhamentos futuros, destaca-se a necessidade de atualização dos dados do ICP a partir do Censo Demográfico de 2022, bem como a ampliação das análises para outros bairros da cidade. Recomenda-se, adicionalmente, a incorporação de variáveis diretamente relacionadas ao desempenho do pavimento, como volume de tráfego, condições de drenagem e histórico de manutenção, de modo a permitir uma compreensão mais abrangente dos fatores que influenciam a sua deterioração. Tais avanços poderão subsidiar a formulação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) mais eficiente, equitativo e economicamente sustentável, contribuindo para o aprimoramento da gestão urbana e para a melhoria da qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aihuki, Josef Ndauvako (2022) *Avaliação de desempenho de vias do bairro de Batista Campos, em Belém-PA, em relação ao índice de condição do pavimento (ICP)*. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém. 2022.

Araújo Júnior, Antônio Carlos Ribeiro; Azevedo, Adriane Karina Amin de. (2012) *Formação da cidade de Belém (PA): área central e seu papel histórico e geográfico*. Espaço Aberto, v. 2, n. 2, p. 151-168, 2012.

IBGE (2010) *Censo Demográfico 2010*. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil, 2010.

IBGE (2010) *Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário. Rio de Janeiro*. IBGE, 2011.

Bahia, Mirleide Chaar; Figueiredo, Sílvio Lima. (2014) *Lazer em áreas verdes públicas: as vivências na Praça Batista Campos em Belém – PA.* Revista Brasileira de Estudos do Lazer, v. 1, n. 1, 2014.

Cardoso, Ana Cláudia; Ventura Neto, Raul da Silva. (2013) *A evolução urbana de Belém: trajetória de ambiguidades e conflitos socioambientais*. Cadernos Metrópole, v. 15, n. 29, p. 55-75, 2013.

Callegari-Jacques, Sidia M. (2007) Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre, Artmed, 2007.

Cardoso, A.; Neves, L. (2023) *Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis do bairro de Batista Campos em Belém/PA mediante ao cálculo do índice de condição do pavimento*. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

Costa, Raimundo Ítalo da Silva et al. (2021) *Desenvolvimento de um banco de dados da aplicação do Índice de Gravidade Global em vias de Fortaleza.* Revista Tecnologia, v. 42, n. 1, p. 101-11.

Garcia, Geraldo Freire (2018) *O Planejamento da cidade e a mobilidade urbana, uma combinação sustentável*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

Páez, Edgar Misael Arevalo (2015) *Índice de Condição do Pavimento (ICP) para Aplicação em Sistemas de Gerência de Pavimentos Urbanos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

Pasternak, Suzana (2016) *Habitação e saúde. Estudos avançados.* Revista USP, v. 30, p. 51-66.

Sousa, Talmo Cunha de; Aguiar, Marcelo Figueiredo Massulo (2021) A*valiação objetiva de pavimentos flexíveis pelo método do ICP/SHRP. Estudo de caso, bairro de batista campos em Belém-PA*. In Anais do XXXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte (Congresso virtual). ANPET, p. 707-718.

Souza, Renata Durans Pessoa de (2016) *A Área de expansão de Belém: um espaço de múltiplas vivências*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Belém, 2016.

Marcela Caetano Pereira (mcaetano100@gmail.com)
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01, Guamá, Belém, Pará, Brasil.
Pâmela Ketlen da Silva Prado (pamelaketlenprado06@gmail.com)
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01, Guamá, Belém, Pará, Brasil.
Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar (mmassulo@ufpa.br)
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01, Guamá, Belém, Pará, Brasil.
Abel Lemos Pereira (abel.lp@outlook.com)
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01, Guamá, Belém, Pará, Brasil.

INSTRUMENTAÇÃO DE TRECHOS EXPERIMENTAIS CONSTRUÍDOS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

Roger Júnio Campos[1], Marconi Oliveira de Almeida[1], Carlos Augusto de Souza Oliveira[1], Sérgio Pacífico Soncim[1], Lais Resende Pereira[2], Daniela Cristina Soares Solar[2], Luciano dos Reis Bento[3]
[1]Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Campus Itabira, [2]VALE S. A., [3]AGERA

RESUMO
Este estudo teve como objetivo realizar a instrumentação de trechos experimentais de pavimentos asfálticos construídos com rejeito de minério de ferro utilizando sensores em diferentes camadas. Foram instalados sensores de pressão, deformação, umidade e temperatura em quatro trechos localizados na Mina Cauê, em Itabira/MG, sendo um com materiais convencionais e três com rejeito de minério de ferro, na composição das camadas. São apresentados os métodos de construção e de instalação dos sensores. Os resultados demonstraram variações significativas nas respostas estruturais, com picos de pressão e deformação associados à passagem de veículos, e comportamento térmico e higroscópico compatíveis com a profundidade das camadas. A abordagem experimental se mostrou eficaz para o monitoramento contínuo e em tempo real, oferecendo subsídios relevantes para a avaliação do desempenho do material alternativo, contribuindo para sua validação como solução sustentável em pavimentação rodoviária.

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis para a infraestrutura viária tem incentivado a utilização de materiais alternativos em pavimentação. Almeida *et al.* (2024) e Coelho *et al.* (2024) demonstram o potencial técnico e ambiental do uso de rejeito de minério de ferro na construção de camadas de revestimento de estradas. No entanto, sua validação técnica exige o monitoramento em campo, sob tráfego real e condições ambientais variáveis, a fim de avaliar seu desempenho estrutural ao longo do tempo.

A instrumentação de pavimentos com sensores tem se mostrado uma estratégia eficaz para esse tipo de avaliação, permitindo o acompanhamento contínuo de parâmetros como deformação, pressão, temperatura e umidade. A aplicação dessa tecnologia tem sido explorada em diferentes contextos, tanto em estudos internacionais (Timm e Willis, 2015; Leandri *et al.*, 2015, Al-Qadi *et al.*, 2018; Di Graziano *et al.* 2020; Wu *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2023) quanto em iniciativas nacionais (Martins *et al.*, 2020; Moraes *et al.*, 2023; Kakuda *et al.*, 2021), e encontra respaldo na evolução dos sistemas de monitoramento inteligente e na integração com plataformas de aquisição de dados.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar os métodos de construção e instalação da instrumentação de trechos experimentais de pavimentos asfálticos construídos com rejeito de minério de ferro utilizando sensores em diferentes camadas, bem como resultados iniciais dos dados coletados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção refere-se às especificações dos equipamentos utilizados para a instrumentação e o monitoramento de quatro trechos experimentais de pavimentos, localizados no sistema viário da Mina Cauê, pertencente à mineradora Vale S.A., no município de Itabira, Minas Gerais. O objetivo principal da instrumentação é fornecer informações capazes de permitir uma análise à longo prazo do comportamento dos pavimentos sujeitos à aplicação de cargas dinâmicas do tráfego.

A instrumentação consistiu na instalação de sensores de umidade, temperatura, deformação, pressão, além da instalação de um sistema de aquisição de dados para a obtenção de respostas estruturais dos pavimentos, sujeitos a cargas de tráfego e condições climáticas reais.

A Figura 1 ilustra as camadas do pavimento asfáltico, compostas pelo subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. A instalação dos sensores seguiu as etapas da construção da estrutura dos trechos. Em cada uma das camadas mostradas na Figura 1, os sensores foram instalados seguindo o alinhamento do eixo das trilhas de roda para garantir que as medições ocorram na passagem de veículos, conforme pode ser visualizado no esquema (Figura1b). Os sensores foram instalados espaçados de 30 cm, na seguinte sequência: célula de pressão, três extensômetros (*strain gauges*) e sensor de umidade e temperatura. Os extensômetros (sensores de deformação) foram posicionados alinhados com o eixo da trilha de roda, nas direções longitudinal, transversal e à 45°. Após posicionados, eles foram nivelados e protegidos com uma mistura de solo e areia N50

(NBR7214/2015).

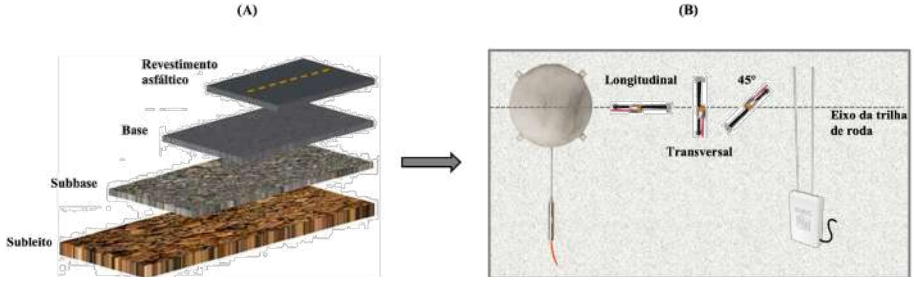


Figura 1: (A) camadas típicas de um pavimento asfáltico. (B) posição relativa dos sensores em cada camada

A célula de pressão utilizada é um transdutor e consiste em duas placas de aço inoxidável AISI 304, com diâmetro de 200 mm e espessura de 7 mm, unidas perifericamente por soldagem para formar uma cavidade interna preenchida com óleo desaerado. No seu funcionamento, a pressão exercida pelo solo é transmitida ao fluido, sendo então conduzida por um tubo de aço inoxidável de 6 mm até um transdutor do tipo corda vibrante (*vibrating wire*), sendo capaz de medir pressões de até 350 kPa. Seu sinal de saída é dado em Hertz (Hz) variando de 2200 até 3500 Hz, com precisão de +/- 0,1% da escala total (fundo de escala). O sistema oferece elevada estabilidade a longo prazo e ampla faixa de operação em temperatura, de 20 °C a 80 °C, sendo capaz de suportar sobrecargas de até duas vezes o fundo de escala. Essas características do equipamento tornam-no adequado para o monitoramento das tensões em pavimentos.

Quanto aos sensores de deformação, ou extensômetros (*strain gauge*), também do tipo corda vibrante (*vibrating wire*), foram utilizados para medir deformações dos pavimentos. Esse dispositivo é composto por um tubo de aço inoxidável contendo um fio metálico tensionado, cuja frequência de vibração varia conforme a deformação aplicada ao sensor. Por sua vez, essa deformação, transmitida por flanges soldadas ou embutidas nas camadas do pavimento, altera a tensão no fio, cuja frequência é registrada por uma bobina eletromagnética localizada internamente. Esse dispositivo fornece uma resposta com resolução de 0,4 a 1 με (micro deformação) e precisão de até ±0,5 % da escala total, com faixa operacional de –20 °C a +80 °C, tendo uma faixa de medição nominal de 3000 με. O modelo utilizado possui proteção IP68 e compensação térmica incorporada via termistor.

Para análise da umidade do pavimento foram instalados sensores de umidade do modelo CS616, desenvolvido pela Campbell Scientific. Esse dispositivo também foi projetado para atuar como sensor de temperatura. A saber, trata-se de um refletômetro de domínio do tempo (TDR) destinado à medição contínua do teor volumétrico de água (VWC) em solos e outros meios porosos. O dispositivo é composto por duas hastes paralelas de aço inoxidável, com 300 mm de comprimento e 32 mm de espaçamento, conectadas a um circuito encapsulado que gera pulsos eletromagnéticos. A frequência de retorno desses pulsos varia conforme a permissividade dielétrica do meio, que está diretamente relacionada ao seu conteúdo de umidade. O CS616 oferece resolução de 0,1 % VWC, exatidão de ±2,5 % VWC e opera em faixa de temperatura de 0 °C a 70 °C.

Na coleta de dados do experimento foi utilizado um registrador de dados ou sistema de aquisição de dados. Também chamado de *datalogger*, o registrador é uma ferramenta de alto desempenho para medição e controle. No projeto foi utilizado o *datalogger* modelo CR6 da Campbell Scientific devido a sua alta capacidade de aquisição, comunicação rápida, com baixo consumo de energia, porta USB embutida, tamanho compacto e alta capacidade de precisão e resolução nas portas analógicas. O CR6 possui terminais universais (U) para permitir a conexão com praticamente qualquer sensor - analógico, digital ou inteligente.

Além dos dispositivos citados, empregou-se cabos blindados com diâmetro de 0,51 mm composto por quatro fios para conexão dos sensores, gabinete fabricado em fibra de vidro reforçado com poliéster e porta de vedação dupla para cada trecho. Além disso, foram instaladas baterias de alimentação de 12 V e capacidade de 60 Ah para alimentar os sistemas de aquisição de dados e painéis solares, que possuem 130 watts de potência, responsáveis por carregar as baterias.

Esses sensores foram instalados no topo das camadas (subleito, sub-base e base) dos pavimentos de 4 trechos experimentais. O trecho (1), trecho de referência, foi construído com subleito e sub-base de solo laterítico,

base de brita graduada e revestimento asfáltico (faixa C do DNIT). O trecho (2) teve na composição das camadas de subleito e sub-base 50% de rejeito, sendo 15% na base e 6% no revestimento asfáltico. A diferença do trecho (3) em relação ao (2) é a sub-base com 48% de rejeito e 2% de Cal CH-I, enquanto o trecho (4) teve a sub-base com 49% de rejeito e 1% de cimento Portland CP-V e base de solo-brita com 15% de rejeito. Para o controle e identificação da coleta de dados os sensores foram codificados.

A codificação dos extensômetros seguiu a lógica $T_xT_{yz}SG_w$, ou seja, o índice *x* refere-se ao trecho (1, 2, 3 ou 4), o *y* refere-se à trilha de roda externa ou interna (E ou I), *z* faz referência à camada (1-subleito, 2-sub-base ou 3-base), e o índice *w* refere-se à posição do sensor (1-longitudinal, 2-transversal ou 3-45°). Os sensores de pressão são identificados da seguinte forma: *TxTyz*, sendo os índices *x*, *y* e *z* os mesmos explicados para os extensômetros. Os sensores de umidade e temperatura *TxTyTUz*, com os mesmos índices já citados. Ao todo, foram instalados 96 sensores.

3. RESULTADOS

O sistema de instrumentação consistiu na instalação dos sensores, juntamente com os sistemas de aquisição de dados no sistema viário da Mina Cauê, pertencente à companhia Vale S.A., no município de Itabira, Minas Gerais. A Figura 2(A) ilustra os trechos, sendo que o trecho (1) é o de controle, construído sem rejeito na composição de todas as camadas do pavimento. Os demais trechos, (2), (3), e (4), possuem na composição das suas camadas o rejeito. A Figura 2(B) mostra a vista aérea dos trechos, sendo demarcadas com apontadores os locais das estações de aquisição de dados dos sensores.



Figura 2: (A) Indicação dos trechos experimentais. (B) Vista aérea dos trechos experimentais

Após a execução da camada de subleito, os sensores foram instalados no eixo das trilhas de rodas interna e externa de cada trecho, conforme ilustrado na Figura 3(A). No sentido da pista, a disposição foi: célula de pressão, extensômetros e sensor de umidade/temperatura. Após o posicionamento, os sensores foram nivelados e protegidos com uma mistura de solo e areia preparada localmente. O mesmo procedimento foi adotado nas camadas de topo da sub-base e da base. A Figura 3(B) mostra uma estação de aquisição em operação, composta por sistema de monitoramento acoplado a painel fotovoltaico de 130 W, que alimenta uma bateria de 12 V (mínimo de 60 Ah), garantindo autonomia energética ao sistema para funcionamento contínuo.

Na Figura 4 (A) são exibidos dados da célula de pressão instalado no subleito, em kPa. Já na Figura 4 (B) exibe as deformações (em με) captadas por um sensor de deformação instalado na camada da base, ambos os sinais dos sensores pertencentes ao primeiro trecho (1). Seguindo a codificação descrita, o sensor de pressão é referenciado como T_1T_{E1}, enquanto o extensômetro é identificado como $T_1T_{E3}SG_1$. Os sinais foram adquiridos com taxa de amostragem de 10 Hz, garantindo boa resolução para detecção de eventos transitórios, como a passagem de veículos. Os sensores registram picos distintos ao longo do tempo, os quais correspondem à aplicação de cargas dinâmicas sobre o pavimento. Os eventos de maior amplitude ocorrem de forma esparsa,

evidenciando o tráfego intermitente no período analisado.



Figura 3: (A) Posicionamento dos sensores nas trilhas de roda interna e externa na camada do subleito. O sentido da pista é da direita para a esquerda. (B) Estação de aquisição de dados

Na célula de pressão (Figura 4(A)), os valores máximos ultrapassam 85 kPa, enquanto na deformação da base (Figura 4 (B)), os picos alcançam valores superiores a 200 με. A presença de variações abruptas e concentradas em certos intervalos sugere a passagem de veículos mais pesados ou em maior velocidade, o que pode ser explorado em análises complementares de desempenho estrutural. Além disso, a resposta do sensor de deformação apresenta variações negativas pontuais, possivelmente associadas a efeitos de relaxamento ou recuperação elástica entre passagens sucessivas. Essa característica evidencia a importância do uso de sensores com boa estabilidade de leitura e resposta dinâmica adequada para captar o comportamento mecânico real das camadas do pavimento.

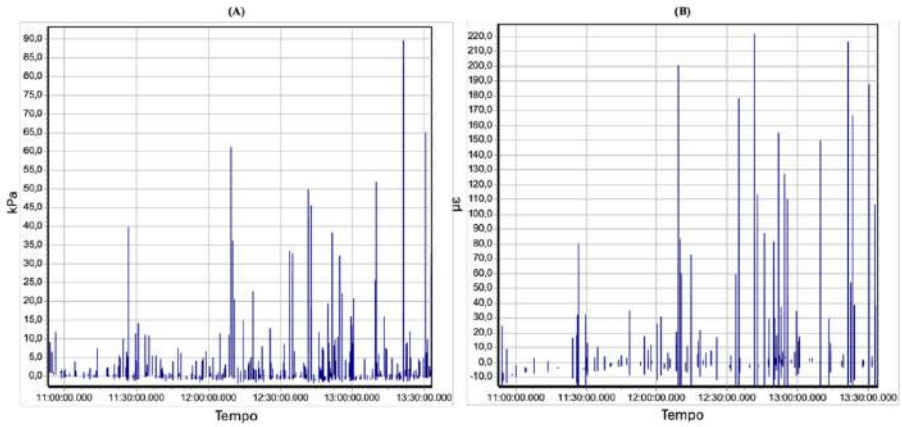


Figura 4: Dados coletados de uma célula de pressão (kPa) e de um sensor de deformação (με)

Considerando a natureza de variação lenta dos parâmetros de temperatura e umidade nas camadas analisadas, o sistema de aquisição de dados foi configurado para realizar coletas em intervalos de um minuto. A Tabela 1 apresenta os valores médios registrados de temperatura (topo da camada de base) e umidade nos diferentes trechos analisados em um dia típico do verão.

Tabela 1: Dados médios de temperatura e umidade de cada camada do pavimento

Camada	Temperatura (°C)	Umidade (%)
Base	38,5	5,3
Sub-base	--	16,3
Subleito	--	26,7

A temperatura foi monitorada apenas no topo da camada de base, atingindo valor médio de 38,5 °C, valor condizente com a influência da radiação solar sobre as camadas superiores. Quanto à umidade, observa-se um gradiente crescente com a profundidade: 5,3% na base, 16,3% na sub-base e 26,7% no subleito. Esse comportamento é coerente com a menor exposição das camadas inferiores à evaporação e com a maior capacidade de retenção hídrica dos materiais do subleito.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica da instrumentação dos trechos experimentais de

pavimentos flexíveis com sensores em diferentes camadas estruturais. A integração de sensores de pressão, deformação, temperatura e umidade, aliada a um sistema de aquisição de dados autônomo, permitiu o monitoramento do comportamento mecânico dos pavimentos sob condições reais de tráfego. Os dados preliminares evidenciaram variações nas respostas estruturais, compatíveis com a passagem de veículos, e confirmam a sensibilidade dos sensores às condições operacionais. Além disso, os resultados obtidos revelaram perfis térmicos e de umidade coerentes com a profundidade das camadas, reforçando a confiabilidade do sistema instalado.

A metodologia aplicada se mostrou eficaz tanto do ponto de vista técnico quanto operacional, consolidando-se como ferramenta promissora para a análise de comportamento estrutural de pavimentos compostos por materiais alternativos. A continuidade do monitoramento permitirá aprofundar a avaliação do rejeito de flotação de minério de ferro como insumo viável em camadas estruturais, fornecendo subsídios concretos para sua futura normatização e aplicação em larga escala na engenharia de pavimentos.

Agradecimentos
À UNIFEI e à mineradora Vale S.A. pelo apoio a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-qadi, I. L.; Z. Zhu; H. Ozer e E. Nielsen (2018) Smart infrastructure for pavement health monitoring. *Transportation Research Record*, v. 2672, n. 3, p. 1–10. DOI: 10.1177/0361198118757194.

Almeida, M. O.; C. A. S. Oliveira; R. J. Campos; S. P. Soncim; E. B. Oliveira (2024) Avaliação do desempenho da camada de revestimento de estradas de caminhões heavy-haul tratadas com coprodutos da mineração de ferro. *In: ANAIS DO 38º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*. Anais eletrônicos. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/avaliacao-do-desempenho-da-camada-de-revestimento-de-estradas-de-caminhoes-heavy?lang=pt-br (acesso em 07/07/2025).

Coelho, P. H. N., S. P. Soncim, C. A. S. Oliveira, M. O. Almeida, R. J. Campos, L. R. Pereira, K. P. M. Medeiros, P. M. P. Cunha, J. C. A. S. Neto, L. R. Bento (2024) Areia de minério de ferro: um material alternativo e sustentável para utilização em camadas de pavimentos. *In: ANAIS DO 38º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*. Anais eletrônicos. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/areia-de-minerio-de-ferro-um-material-alternativo-e-sustentavel-para-utilizacao?lang=pt-br (acesso em: 07/07/2025).

Kakuda, A. A.; X. Silva e Y. Oliveira (2021) Sensores para instrumentação de estruturas de pavimentos: revisão crítica e tendências futuras. *Revista Transportes*, v. 29, n. 1, p. 113–130.

Di Graziano, A., Marchetta, V., & Cafiso, S. (2020). Structural health monitoring of asphalt pavements using smart sensor networks: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *7*(5), 639-651. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.08.001.

Leandri, P.; M. Rossi; F. Bianchi; L. Conti e R. Greco (2019) Performance monitoring of asphalt pavements with recycled materials: results from the Leopoldo project. *Construction and Building Materials*, v. 205, p. 247–256. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.045.

Martins, R. S.; L. M. Souza; T. F. Pereira e C. T. Alves (2020) Instrumentação de pavimentos com sensores inteligentes em rodovias federais brasileiras. *Revista Engenharia Civil (UFSC)*, v. 17, n. 2, p. 55–70.

Moraes, R. S.; P. R. Almeida e B. B. Costa (2023) Desenvolvimento de sistema de monitoramento de pavimentos com sensores de baixo custo. *Revista Brasileira de Engenharia de Infraestrutura*, v. 9, n. 2, p. 67–84. DOI: 10.1590/2358-13632023-0102.

Timm, D. H. e J. R. Willis (2015) *Perpetual Pavement Design for Flexible Pavements in the US: A Synthesis*. NCAT Report 15-03. Auburn, EUA: National Center for Asphalt Technology. Disponível em: https://ncat.us/perpetual_pavement_report_15-03 (acesso em 07/07/2025).

Wu, S.; D. Lippert; I. L. Al-qadi; H. Ozer; I. Said e M. Barry (2020) Monitoring and evaluation of asphalt pavement using piezoelectric sensors. *Construction and Building Materials*, v. 258. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120343.

Roger Júnio Campos[1] (rogercampos@unifei.edu.br)
Marconi Oliveira Almeida[2] (marconi.almeida@unifei.edu.br)
Carlos Augusto de Souza Oliveira[3] (carlosoliveira@unifei.edu.br)
Sérgio Pacífico Soncim[4] (sergiops@unifei.edu.br)
ICT[1] – Instituto de Ciências Tecnológicas e IEI[2 a 4] – Instituto de Engenharias Integradas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira – MG – CEP: 35903-087, Brasil
Lais Resende[5] (lais.resende@vale.com)
Daniela Cristina Soares Solar[6] (daniela.solar@vale.com)
Vale S.A[5,6] Estrada Serra do Esmeril - Serra do Esmeril - Itabira, MG – CEP: 35900-900, Brasil
Luciano dos Reis Bento[7] (luciano.bento@agera.com)
Agera[7]. Estrada Serra do Esmeril - Serra do Esmeril - Itabira, MG – CEP: 35900-900, Brasil

MODELAGEM 3D POR FOTOGRAMETRIA DE DEFEITOS BURACO EM SUPERFÍCIE ASFÁLTICA

Luiz Gustavo Begali [1], Nicolas Rizzo Silva[1], Thiago Botion Neri[1], Jesner Sereni Ildefonso[1], Carolina Garcia[1]
[1]Universidade Estadual de Maringá (UEM)

RESUMO
A fotogrametria é uma técnica que utiliza imagens sequenciais para gerar modelos digitais tridimensionais. Essa metodologia vem sendo aplicada nas mais diversas áreas, inclusive na detecção e medição de defeitos de pavimentos. Nesta pesquisa, buscou-se analisar o uso desta técnica para a representação de buracos presentes em vias urbanas, a partir da captura de imagens com a câmera nativa de um *smartphone*. Para isso, foram aferidas em campo as medidas superficiais (comprimento e largura) e de profundidade de sete buracos, comparando-as com as medidas obtidas no modelo gerado pelo processamento das imagens, realizado por meio do *software iTwin Capture Modeler*. Os coeficientes de determinação obtidos a partir desta comparação indicam que há grande correlação entre os valores encontrados, sugerindo que a modelagem 3D realizada nestas condições constitui uma alternativa para a avaliação de buracos presentes em vias urbanas.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios encontrados quando se trata de segurança viária é a manutenção do estado de conservação do pavimento asfáltico, visto que a existência de irregularidades, como a presença de buracos, fissuras e desgastes da superfície do pavimento, podem comprometer diretamente a aderência dos pneus e a estabilidade dos veículos, principalmente pela necessidade de frenagens bruscas ou a realização de desvios de forma repentina. Além disso, fatores como o conforto do usuário e o tempo de deslocamento também são influenciados pela existência destes defeitos, por conta da necessidade de redução da velocidade ou a adoção de rotas alternativas, diminuindo a eficiência do sistema viário e a capacidade de utilização da via.

Martins *et al.* (2021) cita que a precariedade da infraestrutura do sistema viário é determinada, principalmente, pela ausência de um planejamento e gerenciamento eficiente, sendo de extrema importância a implantação de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) eficiente e adequado às condições e necessidades de cada localidade. O Manual de Gerência de Pavimentos (DNIT, 2011) define um SGP como a composição das medidas de planejamento, projeto, construção e manutenção do pavimento, tendo como principal objetivo o alcance da melhor aplicação possível dos recursos públicos disponíveis para a obtenção de um tráfego seguro, eficiente e econômico.

Para a manutenção de vias já existentes, faz-se necessário o acompanhamento frequente de suas condições estruturais. O Manual de Manutenção de Pavimentos da Prefeitura Municipal de Campo Grande (2019) cita que este acompanhamento é importante para que se tenha conhecimento das áreas mais degradadas, e que exigem maior atenção e priorização na captação de recursos para melhoria do pavimento destes locais. Ainda, segundo Páez *et al.* (2015), é preferível a utilização de metodologias simples de acompanhamento quando comparadas a métodos complexos, principalmente por conta do aporte financeiro demandado por este tipo de sistema. Nesse sentido, Lima *et al.* (2019) ressalta a importância da utilização de técnicas que possibilitem maior precisão na realização dos levantamentos. Ademais, Staniek (2019) cita que o método mais utilizado para a realização deste monitoramento é a inspeção visual em campo. No entanto, sua realização apresenta certas desvantagens, visto que há maior risco de imprecisões no momento de aferição das medidas dos defeitos.

Assim, estudos como o de Peraka e Biligiri (2020) avaliam a eficiência de métodos que visam a automatização dos SGPs, ressaltando a importância de um banco de dados coletados de forma periódica, com o objetivo de monitorar as condições estruturais e funcionais do pavimento, e citando a utilização de *smartphones* para a coleta de dados para armazenamento. Dessa maneira, o estudo de Farhadmanesh *et al.* (2021) avalia a eficiência da reconstrução tridimensional para avaliação das condições do pavimento, realizada por meio da técnica de fotogrametria, que utiliza de imagens em 2D capturadas de diferentes posições para a geração de um modelo de nuvem de pontos em 3D, que demonstram os objetos a serem analisados, tornando possível a análise dos parâmetros referentes ao objeto de estudo.

Nesse sentido, algo que vem sendo amplamente explorado em pesquisas sobre o assunto é a utilização de

smartphones como ferramentas de captura de imagens, por conta da facilidade de utilização, além de fatores positivos como as dimensões do aparelho e sua acessibilidade em comparação a outros aparelhos, como os do tipo *Pavement Scanner*, visto que apresentam menor custo para compra e manutenção. Nesta linha, Ferrari *et al.* (2023) realizou a análise utilizando o *software ContextCapture*, com o intuito de classificar defeitos buraco a partir do modelo em *3D Mesh* gerado pela técnica de fotogrametria, havendo grande semelhança entre os valores medidos de forma manual em campo e os parâmetros aferidos no modelo. Já a pesquisa realizada por Begali *et al.* (2024) utilizou o *software iTwin Capture Modeler* - versão atual do *software ContextCapture* - da empresa *Bentley*, para a comparação das medidas deste tipo de defeito obtidas em campo com as de modelos em *3D Mesh* gerados a partir da filmagem da superfície do pavimento, notando-se, também bastante similaridade entre os valores obtidos. Tais modelos são interessantes para a geração de um banco de dados sobre a severidade dos defeitos, auxiliando na elaboração de projetos executivos que visam a manutenção do pavimento.

Assim, o intuito do presente estudo é a avaliação de modelos em *3D Mesh* gerados a partir da técnica de fotogrametria, utilizando-se um *smartphone* para a captura das imagens, e o *software iTwin Capture Modeler*, comparando os parâmetros de superfície e de profundidade dos mesmos aos aferidos em campo de forma manual.

2. METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada a definição da amostra a ser analisada. Assim conforme procedimento do estudo de Begali *et al.* (2024), realizado concomitantemente a este, escolheu-se realizar a coleta de dados em sete defeitos de diferentes dimensões, gerados no pavimento de vias localizadas no entorno da Universidade Estadual de Maringá (UEM), no município de Maringá/PR. Assim, com o auxílio de uma régua, foram aferidas as medidas de comprimento, largura e profundidade de cada buraco, como exemplifica a Figura 1.



(a) (b) (c)

Figura 1: Medição do defeito buraco (a) maior comprimento (b) maior largura (c) maior profundidade.
Fonte: Begali *et al.* (2024).

Após a coleta manual das medidas, foram registradas as sequências de imagens em cada defeito. Para isso, utilizou-se a câmera nativa do *smartphone Samsung Galaxy A54*, com resolução de 50 megapixels, abertura de f/1.8 e distância focal de 26 mm. O aparelho foi posicionado a uma altura de um metro, de forma paralela à superfície, utilizando-se um bastão de *selfie* para auxiliar na sua estabilidade.

Com isso, para o traçado das linhas de passagem, foi necessária a definição da área de abrangência das imagens. Para isso, posicionou-se uma régua na superfície, registrando-se as medidas obtidas para o comprimento e largura da foto. Assim, para definir a distância entre as linhas, adotou-se a sobreposição lateral das imagens de 80%, bem como, para a demarcação dos pontos de parada para a captura de cada imagem, definiu-se a sobreposição longitudinal de 70%.

Com estas medidas, foram definidas três linhas de passagem ao lado dos defeitos analisados. Ainda, para servir como referencial para os parâmetros de escala no momento da modelagem, foi posicionada uma caneta esferográfica de 15 cm ao lado de cada defeito durante o registro das imagens. A Figura 2 apresenta um dos defeitos analisados, com suas respectivas marcações e posicionamento da caneta durante a captura.



Figura 2: Buraco n° 1, com suas respectivas linhas de passagem.

Após a coleta das imagens, realizou-se o processamento das imagens dentro do *software iTwin Capture Modeler* para a geração do modelo. Inicialmente, foi realizado o *upload* das imagens, inserindo-se também as características técnicas da câmera do *smartphone*. Em seguida, foi realizada a definição dos parâmetros de escala, seguindo o procedimento indicado no estudo de Begali *et al.* (2024).

Com isso, pode ser iniciado o processo de aerotriangulação e reconstrução das imagens, obtendo-se o modelo tridimensional final, sendo possível rotacionar e obter as medidas de quaisquer dimensões superficiais e de diferença de nível no trecho analisado. Para a pesquisa, foram aferidos os parâmetros de comprimento e largura superficiais, e a profundidade de cada defeito, para comparação destas com as medidas realizadas em campo. A Figura 3 apresenta o modelo gerado para um dos defeitos analisados.



Figura 3: Modelo representativo do buraco n° 3.

Finalmente, utilizou-se o coeficiente de Kendall (τ-b) para a avaliação da concordância das medidas, por conta da pouca quantidade de amostras, além da presença de empate entre as medidas de campo e da modelagem. Para este teste, são consideradas as seguintes hipóteses:

- H_0: não há associação monotônica entre as medidas feitas em campo e nos modelos;
- H_1: há associação monotônica entre as medidas feitas em campo e nos modelos.

Vale ressaltar que a hipótese nula deve ser rejeitada quando o p-valor obtido for menor do que o nível de significância ($\alpha = 0,05$). Caso contrário, não há evidências estatísticas para a hipótese nula ser rejeitada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas aferidas tanto em campo quanto na modelagem computacional dos defeitos, bem como o coeficiente de correlação de Kendall e o seu respectivo p-valor, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros relativos aos defeitos.

DEFEITO	COMPRIMENTO (cm)		LARGURA (cm)		PROFUNDIDADE (cm)	
	Campo	Modelo	Campo	Modelo	Campo	Modelo
1	63,0	65,6	40,0	39,6	3,0	3,3
2	53.0	53,6	51,0	49,1	4,2	4,7
3	90,0	90,7	36,0	35,2	3,8	3,9
4	37,0	34,6	21,0	22,2	2,9	2,6
5	77,3	77,5	52,7	52,8	6,5	6,2
6	67,0	67,1	54,0	55,1	6,0	6,2
7	71,0	72,8	52,0	53,2	7,5	7,2
τ-b	1,000		0,905		0,976	
p-valor	<0,001		0,003		0,002	

Para os três parâmetros, foram obtidos valores de τ-b bastante próximos a 1,0, indicando grande correlação entre as medidas realizadas em campo e as obtidas a partir do modelo gerado. Além disso, foi obtido p-valor abaixo de 0,05 para os três parâmetros analisados, rejeitando-se a hipótese nula e reforçando a concordância entre os dados. A Figura 4 dispõe de uma análise gráfica destes valores com relação à sua linha de tendência.

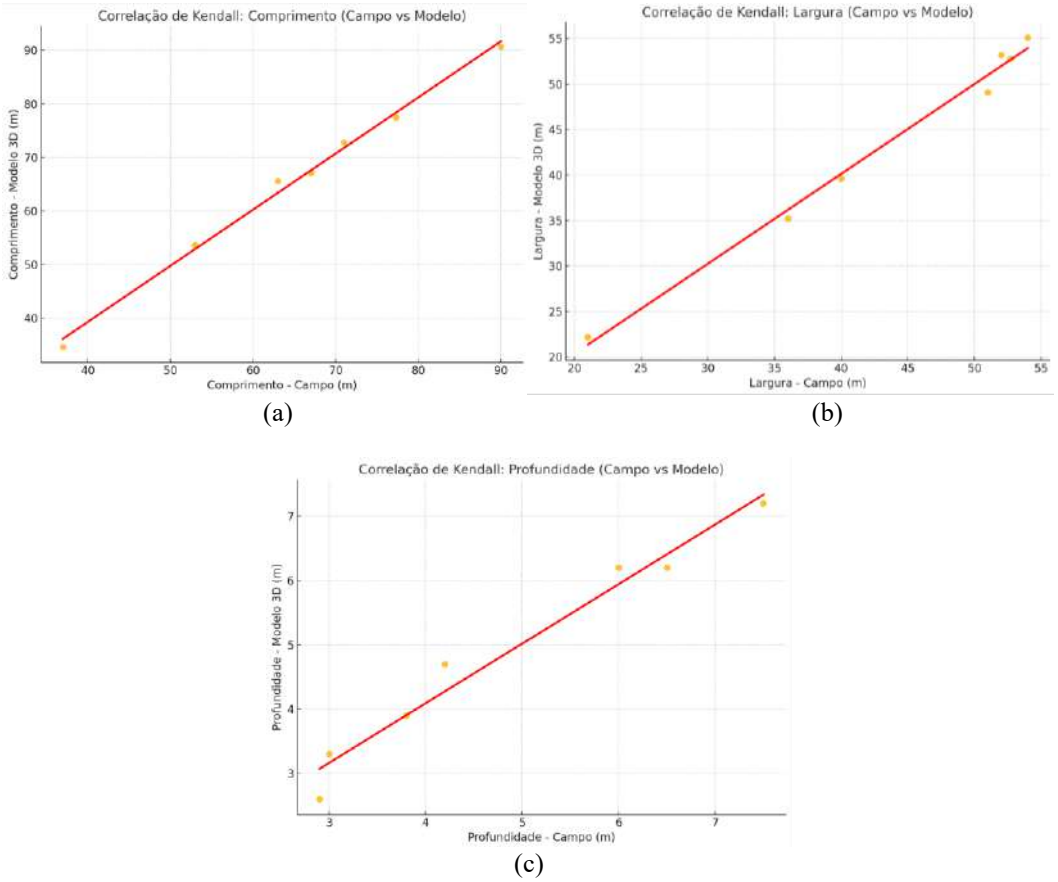


Figura 4: Gráficos de correlação de Kendall para as medidas de comprimento (a), largura (b) e profundidade (c).

Os gráficos apresentados corroboram com os valores do coeficiente de Kendall (τ-b) e de p-valor, uma vez que a distribuição dos dados se aproxima da linha de tendência, mostrando que as medidas obtidas na análise do modelo em 3D apresentam pouca diferença dos valores dos parâmetros aferidos durante a coleta de dados em campo.

4. CONCLUSÃO

Analisando-se os dados obtidos, bem como o coeficiente de Kendall e os resultados de p-valor, nota-se uma grande semelhança entre os dados obtidos por meio da medição em campo e as aferições realizadas no modelo gerado. Esta pequena divergência pode estar associada a erros na medição realizada em campo, entre outros fatores, como distorção e quantidade de imagens capturadas. No entanto, tal divergência não invalida o resultado de estudos que utilizam este método.

Portanto, a modelagem em 3D de defeitos buraco no pavimento de vias urbanas, realizada por meio da captura de imagens com uso de *smartphones* se mostra como uma alternativa promissora para o acompanhamento da condição funcional do pavimento. Entretanto, fatores como o tempo de coleta e de processamento, além da necessidade de grande quantidade de imagens para geração de um único modelo acabam por inviabilizar a técnica, sendo necessários estudos que visem a otimização destas características.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Begali, L. G.; N. R. Silva; C. Garcia (2024) Modelagem 3D de buracos a partir da filmagem de pavimentos urbanos. In Anais do 38° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Florianópolis, SC). Campinas: Galoá, v. 3, n. 311474. Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/modelagem-3d-de-buracos-a-partir-da-filmagem-de-pavimentos-urbanos?lang=pt-br (acesso em 06/07/2025).

DNIT (2011) *Manual de gerência de pavimentos*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Farhadmanesh, M.; C. Cross; A. H. Mashhadi; A. Rashidi; J. Wempen (2021) Highway Asset and Pavement Condition Management using Mobile Photogrammetry. *Transportation Research Record*, v. 2675, n. 9, p. 296-307. DOI: 10.1177/03611981211001855journals.sagepub.com/home/trr.

Ferrari, E. C.; C. Garcia; C. A. P. Silva Jr.; H. B. Fontenelle (2023) Classificação do defeito buraco a partir de modelos 3D. In Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Santos, SP). Campinas: Galoá, v. 2, n. 161992. Disponível em: https://proceedings.science/anpet-2023/trabalhos/classificacao-do-defeito-buraco-a-partir-de-modelos-3d?lang=pt-br (acesso em 06/07/2025).

Lima Neto, P. S.; F. H. L. Oliveira; A. E. Arantes (2019) Avaliação do levantamento aéreo de defeitos em pavimentos asfálticos urbanos. In Anais do Congresso Ibero Latino-Americano de Asfalto (Guadalajara, MX). Guadalajara: Asosiación Mexicana del Asfalto, p. 906-917.

Martins, R. B. B.; A. N. Macêdo; R. M. Neves; V. W. B. Martins (2021) Análise da manutenção de pavimentos urbanos: uma proposta de implantação de um sistema de gerência de pavimentos. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, v. 13, n. 25, p. 22-39. Disponível em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/IJIE/article/view/V13n2502 (acesso em 06/07/2025).

Páez, E. M. A.; S. B. Lopes; J. L. Fernandes Jr. (2015) Índice de condição do pavimento para aplicação em sistemas de gerência de pavimentos urbanos. In Anais do XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Ouro Preto, MG). Rio de Janeiro: ANPET, p. 101-112.

Peraka, N. S. P.; K. P. Biligiri (2020) Pavement asset management systems and technologies: A review. *Automation in Construction*, v. 119, n. 103336. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103336.

SISEP, UFMS (2019) *Manual de Manutenção de Pavimentos*. Campo Grande: Secretaria Municipal de Infraestrutura e Serviços Públicos.

Staniek, M. (2021) Road pavement condition diagnostics using smartphone-based data crowdsourcing in smart cities. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 8, n. 4, p. 554-567. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.09.004.

Luiz Gustavo Begali (luizgustavobegali@gmail.com)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Nicolas Rizzo Silva (ra127574@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Thiago Botion Neri (tbneri2@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Jesner Sereni Ildefonso (jsildefonso@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil
Carolina Garcia (cgarcia2@uem.br)
Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil
Avenida Colombo, 5790 - Zona 07 - Maringá, PR, Brasil

SMARTPHONES COMO FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DE IRI: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Gustavo Adolfo El-kik Damasceno[1], Gisandra Faria de Paula[2], Fábio Zanchetta[1], Augusto Cesar de Mendonça Brasil[1]
[1]Universidade de Brasília, [2] Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal

RESUMO
Este estudo investigou a viabilidade do uso de smartphones como instrumentos do tipo resposta para estimar o Índice Internacional de Irregularidade (IRI) de pavimentos. Foram realizados ensaios em uma amostra de rodovias de Brasília-DF, empregando smartphones Samsung Galaxy S24 com sensores triaxiais, cujos dados foram comparados àqueles obtidos pelo equipamento MERLIN. As análises incluíram estatística descritiva, coeficiente de determinação (R^2) e regressões lineares, relacionando a aceleração vertical (RMS) às medições de IRI. Os resultados revelaram forte correlação entre o IRI e os níveis de vibração vertical, intensificada em maiores velocidades. Diferenças significativas foram identificadas entre grupos com baixos e altos valores de IRI, validando a sensibilidade do método. Conclui-se que smartphones possuem potencial como ferramenta prática e de baixo custo para monitoramento da irregularidade viária, embora estudos adicionais sejam necessários para assegurar sua confiabilidade em distintas condições operacionais.

1. INTRODUÇÃO

As vias pavimentadas podem ser avaliadas do ponto de vista funcional, para verificar a irregularidade longitudinal, a qual impacta no conforto dos usuários e nos custos operacionais dos veículos. Perfilômetros a laser, que possuem elevada produtividade, tem custo de aquisição e manutenção elevados. Uma alternativa com custo reduzido são aplicativos para smartphone. Tantos os aplicativos quanto os perfilômetros necessitam de calibração/validação. Este processo de calibração/validação pode ser realizado por meio de levantamentos em amostras com uso do equipamento MERLIN (Machine for Evaluating Roughness Using Low-cost Instrumentation), que possui valor de aquisição e manutenção inferiores aos perfilômetros. O MERLIN possui baixa produtividade, mas elevada acurácia e precisão.

Durante os anos, pesquisadores estudam métodos mais eficientes e rápidos para detectar irregularidades nos pavimentos, sendo o sistema de medidas tipo resposta (Response-Type Road Roughness Measuring Systems – RTRRM), ou Sistema de Medição de Irregularidade Tipo Resposta, um sistema que tem mais evoluídos ao longo dos anos, principalmente na última década, com a ciência da computação e sensores cada vez mais reduzidos e de fácil acesso. O RTRRM é um método utilizado para avaliar a irregularidade do pavimento rodoviário com base na resposta dinâmica de um veículo em movimento com equipamentos instalados “on-bord”.

Os métodos que utilizam sinais de vibração representam uma alternativa tecnicamente viável e economicamente acessível para a detecção de irregularidades no pavimento, especialmente quando comparadas aos equipamentos tradicionais de alto custo, como perfilômetros inerciais a laser e sistemas de captura por imagem. A utilização de sensores presentes em dispositivos móveis, como smartphones, associada a algoritmos avançados de aprendizado de máquina, permite a automação do processo de monitoramento, dispensando a intervenção humana direta e mitigando limitações operacionais, o que contribui para a redução de custos e riscos associados à inspeção rotineira das condições viárias (Zhao et al., 2024).

Atualmente, os smartphones podem ser considerados equipamentos de medição tipo resposta, pois possuem sensores embarcados capazes de captar a resposta do veículo às irregularidades do pavimento. Além da ampla popularização, sua crescente capacidade de processamento e armazenamento, aliada à integração de sensores como GPS, acelerômetros e giroscópio, proporciona maior precisão na navegação e no monitoramento de movimentos.

No entanto, um dos principais desafios para os pesquisadores é estabelecer uma correlação confiável entre os medidores tipo resposta e os equipamentos de medição do International Roughness Index (IRI), medida que indica o nível de irregularidade de um pavimento, garantindo que os dados obtidos sejam precisos e comparáveis aos padrões internacionais de avaliação da irregularidade. Além disso, o desenvolvimento de softwares e aplicativos específicos tem se tornado um caminho promissor para tornar as pesquisas mais acessíveis e aplicáveis à gerência de pavimentos

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo verificar a correlação entre as medições realizadas pelo equipamento de baixo custo de operação, MERLIN, e os sinais coletados por smartphones para estimar o IRI.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As atividades básicas de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) englobam o estabelecimento de sistema de referência (inventário da malha viária), a avaliação funcional, estrutural e de segurança dos pavimentos, a definição de prioridades de intervenção e a formulação de um plano plurianual de investimentos (Haas *et al*., 1994; Archondo-Callao e Faiz, 2001; DNIT, 2011). A avaliação funcional, por exemplo, pode ser realizada através de indicadores como o VSA (Valor de Serventia Atual) e o IRI, sendo este último uma das variáveis mais utilizadas globalmente para mensurar conforto e irregularidade (Sayers, Gillespie & Queiroz, 1986; DNIT, 2003).

A avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos é essencial para mensurar o desempenho funcional das vias pavimentadas, pois está diretamente associada ao conforto dos usuários, custo operacionais e à segurança viária. Carey e Irick (1960) estabeleceram que a análise da qualidade das vias deveria considerar o conforto e a segurança dos usuários, iniciando um paradigma que culminaria na criação de indicadores como o Índice Internacional de Irregularidade (IRI). Segundo Sayers et al. (1986), a irregularidade longitudinal influencia diretamente a dinâmica veicular, o conforto de rolamento e os custos operacionais, sendo fator determinante para políticas de manutenção e segurança viária.

O IRI consolidou-se como métrica globalmente aceita após o International Road Roughness Experiment (IRRE), realizado no Brasil em 1982, cujo objetivo foi padronizar as medições de irregularidade diante da diversidade de métodos existentes mundialmente. Sayers et al. (1986) destacaram que, entre várias métricas estudadas no IRRE, o IRI apresentou a melhor correlação com métodos perfilométricos e avaliações subjetivas de conforto dos usuários. O cálculo do IRI utiliza um modelo “quarter-car”, simulando a resposta dinâmica de um veículo padrão (Golden Car) a 80 km/h, expressando o resultado em metros por quilômetro (Pawar et al., 2018).

Paralelamente, os sistemas do tipo resposta (RTRRMS), definidos por McLean e Ramsay (1996), detectam as irregularidades pela resposta dinâmica do veículo, mas apresentam limitações. Conforme Sayers et al. (1986), os dados desses sistemas precisam ser calibrados contra métodos de Classe 1 ou 2, pois não estão naturalmente vinculados à escala do IRI. Mesmo calibrados, RTRRMS podem apresentar variações médias de até 14% em pavimentos asfaltados, influenciadas pela velocidade, pelas condições dos pneus e pela superfície do pavimento. Rashid e Tsunokawa (2008) corroboram essa limitação, apontando que velocidades irregulares durante a medição podem introduzir erros superiores a 10%, exigindo calibrações específicas para diferentes condições de operação.

Para contextos com restrição orçamentária, destaca-se o equipamento MERLIN, apresentado no relatório TRL229 (1996), como alternativa de baixo custo para estimar o IRI. O princípio de funcionamento do MERLIN baseia-se na medição da deflexão vertical de um braço articulado em contato com o pavimento, cujo deslocamento é transcrito em registros físicos plotados em um histograma. Esse método, apesar de analógico, permite a geração de uma amostragem estatisticamente robusta ao longo de trechos padronizados, como os 400 metros sugeridos por Álvarez e Rivero (2012), com coletas em intervalos regulares de 2 metros. A simplicidade construtiva do MERLIN, aliada à sua robustez operacional, o torna uma ferramenta viável para ambientes de restrição orçamentária, sem comprometer a precisão e a acurácia necessárias para estimativas da condição funcional por meio do Índice de Irregularidade Internacional (IRI).

Assim, ao longo das décadas, o IRI consolidou-se como o principal índice global de avaliação da condição superficial dos pavimentos, por representar tanto dados técnicos quanto percepções subjetivas de conforto (Sayers et al., 1986). Sua importância reside em permitir comparações internacionais, fundamentar estratégias de manutenção e reduzir custos operacionais e riscos de segurança na malha rodoviária. Combinada com Sistema Tipo Resposta com utilização de smartphone podem ser ferramentas úteis para diminuir custos e levar a universalização da manutenção preventiva e preditiva em organismo rodoviário com limitação e restrição orçamentária com poucos recursos, implementando ou melhorando o SGP localmente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico detalha os procedimentos adotados para avaliar a viabilidade do uso de sensores embarcados em smartphones na estimativa da irregularidade longitudinal dos pavimentos, tendo como objetivo central analisar a correlação entre o IRI e os dados provenientes dos acelerômetros desses dispositivos.

Para servir de referência padrão, foi utilizado o equipamento MERLIN, amplamente reconhecido por fornecer medições confiáveis do IRI. A escolha do MERLIN possibilitou a comparação dos resultados obtidos pelos smartphones com valores consolidados de IRI em medições de campo permitindo realizar uma análise comparativa.

Foram empregados smartphones Samsung Galaxy S24, modelo lançado em 2024, equipados com acelerômetros triaxiais e módulos GNSS, operando com taxa de amostragem de 125 Hz, considerada adequada para captar com precisão as vibrações verticais do veículo. O dispositivo foi fixado no para-brisa do automóvel, local indicado na literatura por apresentar boa qualidade na transmissão das vibrações do veículo. Para isolar as variáveis em estudo, o modelo do smartphone, o veículo utilizado e o tipo de suporte permaneceram inalterados durante toda a campanha de coleta de dados, garantindo maior uniformidade nos registros. O veículo empregado foi um Jeep Compass Longitude 2024 (peso 1.585 kg), equipado com suspensão dianteira McPherson de rodas independentes e pneus calibrados a 35 psi (dianteiros) e 32 psi (traseiros).



Figura 1: Suporte e posicionamento do Smartphone

No que se refere ao software, foi utilizado o aplicativo Phyphox, empregado em pesquisas científicas, o qual permite a extração dos dados brutos provenientes dos sensores do smartphone.

Os ensaios experimentais foram realizados em segmentos de 2,4 km de extensão total, abrangendo trechos das rodovias L3 e L4 na cidade de Brasília, DF. Cada rodovia apresentava 1,2 km de extensão, dividida em três segmentos de 400 metros, nos quais foram avaliados os valores de IRI. As rodovias estudadas eram compostas por pavimento flexível, apresentando distintos níveis de irregularidade previamente determinados pelo MERLIN. Os ensaios foram conduzidos em quatro velocidades controladas — 20, 40, 60 e 80 km/h — por meio do piloto automático do veículo, exceto na velocidade de 20 km/h, para a qual o uso desse recurso não é permitido no sistema do automóvel. Adicionalmente, o sistema Lane Keeping Assist permaneceu ativado durante os ensaios, visando assegurar maior estabilidade na trajetória do veículo. Os testes ocorreram no dia 30 de junho de 2025.

No processamento dos dados, optou-se por não aplicar filtros digitais tradicionais, como passa-baixa ou passa-banda, devido à variedade de abordagens existentes na literatura e à ausência de consenso metodológico sobre os melhores parâmetros de filtragem para essa aplicação. Assim, decidiu-se preservar os dados brutos de aceleração vertical, realizando apenas o cálculo do valor quadrático médio (Root Mean Square, RMS), métrica fundamental para avaliação do conforto veicular e frequentemente correlacionada ao IRI.

Para verificar a aplicabilidade do uso de acelerômetros embarcados em smartphones na estimativa do IRI, foram realizadas análises estatísticas incluindo histogramas, gráficos de dispersão, cálculo do coeficiente de

correlação de Pearson e regressões lineares. Essas análises possibilitaram avaliar o grau de associação entre os valores de IRI medidos pelo MERLIN e os dados obtidos pelos smartphones, visando confirmar o potencial do método como ferramenta prática, rápida e de baixo custo para o gerenciamento de pavimentos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente estudo, foram realizadas diversas análises estatísticas para investigar a relação entre o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) obtidos pelo MERLIN e os valores de vibração vertical expressos em RMS (Root Mean Square) medidos em m/s², considerando diferentes condições de velocidade de deslocamento.

A análise descritiva inicial revelou que, para cada nível de IRI avaliado, os valores médios de RMS aumentaram de forma consistente à medida que a velocidade do veículo foi elevada. No segmento com IRI igual a 2,053 m/km, o RMS foi 0,2308, 0,425253, 0,634927, e 0,7879 m/s² a 20, 40, 60 e 80 km/h, respectivamente. Pavimentos mais irregulares, como aqueles com IRI de 3,519 m/km, os valores RMS atingiram níveis significativamente mais altos, de 0,5154, 0,8878, 1,0353 e 1,3723 m/s² a 20, 40, 60 e 80 km/h, respectivamente. Esses dados já sugerem, de forma preliminar, o impacto tanto da irregularidade longitudinal quanto da velocidade na amplificação das vibrações verticais transmitidas ao veículo.

Para aprofundar essa investigação, foram conduzidas análises de correlação entre o IRI e o RMS em cada faixa de velocidade. Os resultados apontaram para uma forte associação linear positiva em todas as condições testadas, com coeficientes de correlação de 0,9056, 0,8781, 0,8630 e 0,8181 para 20, 40, 60 e 80 km/h, respectivamente. Tais valores evidenciam que há correspondência entre os valores da irregularidade do pavimento (MERLIN) e os níveis de vibração vertical percebidos pelo veículo (Aplicativo).

As regressões lineares simples aplicadas para cada velocidade confirmaram essa tendência. Os coeficientes de determinação (R^2) foram elevados, variando entre 0,8201, 0,7716, 0,7447, 0,6693 para as velocidades de 20, 40, 60, 80 Km/h, respectivamente, demonstrando que uma parcela substancial da variabilidade do RMS pode ser explicada pelo IRI. Observou-se ainda que os coeficientes angulares das equações de regressão cresceram progressivamente com a velocidade, indicando que o efeito da irregularidade do pavimento sobre a magnitude das vibrações verticais se intensifica à medida que o veículo se desloca mais rapidamente. Por exemplo, na velocidade de 20 km/h, a relação foi descrita pela equação RMS = 0,2077·IRI – 0,2217, enquanto a 80 km/h a inclinação da reta aumentou para 0,4044, evidenciando maior sensibilidade do RMS às variações do IRI em velocidades superiores.

Os resultados obtidos neste estudo permitem observar, de forma clara, o impacto do estado do pavimento, medido pelo IRI, sobre os níveis de vibração vertical (RMS) registrados nos veículos, especialmente quando se considera a influência da velocidade de deslocamento. O incremento nos valores médios de RMS tanto em função do aumento do IRI quanto da velocidade evidencia que o pavimento mais irregular não apenas gera maiores vibrações, mas também potencializa os efeitos dinâmicos à medida que o veículo trafega em velocidades mais elevadas. As análises de correlação confirmaram essa relação intensa, com coeficientes que se mantiveram acima de 0,80 em todas as faixas de velocidade. Esses valores sugerem que, mesmo em condições distintas, existe um vínculo consistente entre a qualidade do pavimento e o nível de vibração vertical transmitido ao veículo, corroborando a literatura que aponta o IRI como um parâmetro de referência para estimativas de conforto e segurança veicular.

Os modelos de regressão evidenciaram que, além da relação existir, ela tende a se intensificar em termos de inclinação da reta de ajuste à medida que a velocidade aumenta. Isso significa que pequenas variações na irregularidade do pavimento podem gerar variações mais expressivas nas vibrações verticais em altas velocidades, aumentando, assim, o risco de desconforto aos ocupantes e de potenciais danos estruturais ao veículo. É particularmente relevante destacar que o coeficiente angular quase dobrou entre as velocidades extremas, saindo de 0,2077 a 20 km/h para 0,4044 a 80 km/h.

5. CONCLUSÕES

Em síntese, os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância de monitorar a regularidade dos pavimentos e de considerar a influência da velocidade de operação dos veículos, pois ambas as variáveis impactam de forma significativa os níveis de vibração vertical registrados. Mais do que evidenciar essa relação,

o presente trabalho contribui para o avanço na busca por métodos alternativos de medição do IRI, explorando a possibilidade de utilizar sistemas de resposta, como sensores de aceleração presentes em smartphones, como ferramenta prática, rápida e de baixo custo para o gerenciamento de pavimentos. Essa abordagem pode oferecer vantagens substanciais em termos de economia e agilidade nos levantamentos, tornando o monitoramento da condição superficial das rodovias mais acessível a diferentes gestores e instituições. Ainda assim, destaca-se a necessidade de estudos adicionais, com conjuntos de dados mais amplos e em diversas condições de tráfego e pavimento, para consolidar a confiabilidade e a aplicabilidade desses métodos na prática de gestão rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Archondo-Callao, R.; A. Faiz. (2001) *Estimating Vehicle Operating Costs*. Washington, D.C.: The World Bank. Disponível em: https://documents1.worldbank.org/curated/en/104531468739447549/pdf/multi0page.pdf (acesso em 03/03/2025).

Álvarez, J.; J. Rivero. (2012) *Estudio sobre la Aplicación del MERLIN para la Evaluación de la Rugosidad de Pavimentos*. La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana.

Carey, W. N.; P. E. Irick. (1960) *The Pavement Serviceability-Performance Concept*. Highway Research Board Bulletin, v. 250, p. 40–58. Disponível em: https://trid.trb.org/view/118239 (acesso em 04/04/2025).

DNIT. (2003) *DNIT 009/2003 – ME: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do índice de irregularidade*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT. (2011) *Manual de Pavimentação*. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Haas, R.; W. R. Hudson; J. Zaniewski. (1994) *Modern Pavement Management*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company.

McLean, J.; E. Ramsay. (1996) *TRL229 – The Merlin Road Roughness Measuring Machine*. Crowthorne: Transport Research Laboratory. Disponível em: https://www.trl.co.uk/uploads/trl/documents/TRL229.pdf (acesso em 01/07/2025).

Pawar, D. S.; A. Smit; H. Nikraz; M. Nikraz. (2018) *Review of International Roughness Index Measurement and Application*. International Journal of Pavement Research and Technology, v. 11, p. 289–303. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.10.001.

Rashid, M.; K. Tsunokawa. (2008) *International Roughness Index Relationship with Riding Comfort, Vehicle Speed and Displacement*. International Journal of Pavement Engineering, v. 9, n. 2, p. 129–140. DOI: 10.1080/10298430701772894.

Sayers, M. W.; T. D. Gillespie; C. A. V. Queiroz. (1986) *The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*. World Bank Technical Paper No. 45. Washington, D.C.: The World Bank. Disponível em: The International Road Roughness Experiment (IRRE) : establishing correlation and a calibration standard for measurements (acesso em 10/06/2025).

Zhao, H.; Y. Zhu; W. Yang; X. Li; H. Xie. (2024) *Development of Smartphone-based Pavement Roughness Evaluation System Using Deep Learning Algorithms*. Transportation Research Record. DOI: 10.1177/03611981241234567.

USO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DO ÍNDICE INTERNACIONAL DE IRREGULARIDADE: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Tiago Augusto Pianezzer, Daniel Vieira Machado, Gustavo Garcia Otto, Camila Belleza Maciel Barreto, Valter Zanela Tani, Wellington Longuini Repette
Laboratório de Transportes e Logística – Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
A condição funcional das rodovias e o monitoramento do perfil longitudinal do pavimento são fundamentais para que os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) possam embasar as estratégias de manutenção e de conservação rodoviária. No Brasil, esse monitoramento é realizado principalmente por meio do Índice Internacional de Irregularidade (IRI). A fim de identificar alternativas com potencial de aplicabilidade no contexto brasileiro, este artigo realizou uma revisão de literatura. Foram identificadas três abordagens de medição do IRI, sendo elas: desenvolvimento de sistemas eletrônicos; uso de aparelhos *smartphones*; e técnicas de visão computacional. A literatura analisada destaca a viabilidade das alternativas de medição do IRI, com o intuito de permitir medições mais frequentes e de menor custo. No entanto, também destaca a importância de padrões e, principalmente de calibrações dessas medições, para que não haja resultados incoerentes para as rodovias avaliadas.

1. INTRODUÇÃO

A condição funcional das rodovias é um fator importante para o transporte seguro, econômico e confortável. Para que estas se mantenham conservadas de maneira satisfatória, não somente os materiais utilizados e as técnicas utilizadas devem ser realizados de forma planejada, mas também as atividades de manutenção e conservação. Uma das formas de avaliação da qualidade da rodovia é baseada no Índice Internacional de Irregularidade (IRI), o qual objetiva medir as irregularidades do perfil longitudinal da rodovia. Seu monitoramento é crucial para que os Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) possam embasar as estratégias de manutenção e de conservação das rodovias (Brasil, 2011).

O IRI pode ser obtido de diversas formas, como, por exemplo, através das medições topográficas, com equipamentos que medem o perfil longitudinal da rodovia ou através de uma avaliação indireta. No Brasil, mesmo que a Norma DNIT 442/2023 – PRO (Brasil, 2023) trate da medição e do registro contínuo do perfil longitudinal do pavimento utilizando um perfilômetro, os processos de medição do IRI são demorados, com alto investimento financeiro e que demandam mão obra especializada. Nesse contexto, com foco na avaliação da irregularidade longitudinal, a fim de identificar alternativas de baixo custo, de metodologias mais simples e rápidas e com potencial de aplicabilidade no contexto brasileiro, este artigo realizou uma revisão de literatura. Esta identificou três abordagens de medição, as quais serão apresentadas e discutidas na sequência, sendo elas: com o desenvolvimento de sistemas eletrônicos; com o uso de aparelhos *smartphones;* e técnicas de visão computacional.

2. MÉTODO

Para identificar o uso de alternativas de baixo custo para medição do Índice Internacional de Irregularidade (IRI), foi realizada uma revisão de literatura com a seguinte pergunta de pesquisa: “Quais os métodos de levantamento do IRI estão sendo estudados na literatura nacional e internacional como alternativa à medição tradicional com equipamentos com tecnologia a laser?”.

Para responder essa pergunta, foram realizadas buscas em algumas bases de material acadêmico de relevância no tema, sendo eles o Periódico da CAPES, o *Science Direct* e o Google Acadêmico. Sobre esses documentos, ressalta-se que eles focaram somente em artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado ou teses de doutorado. A literatura cinza, que engloba jornais e revistas não acadêmicas, por exemplo, não foram consideradas nas buscas. Além disso, fez-se necessário delimitar o espaço temporal dos materiais encontrados. Sendo assim, foram considerados os documentos publicados entre os anos de 2011 e 2023.

Após a busca e seleção dos documentos que atendessem aos critérios supracitados, foi realizada a análise de cada um deles, objetivando identificar alguns aspectos de interesse. O principal aspecto versa em relação ao tipo de abordagem de medição indireta do IRI estudada pelos autores. Além disso, foram analisados alguns outros aspectos importantes para sua utilização, sendo eles: a área de levantamento dos dados; o local de instalação do sensor no veículo de inspeção; o tratamento matemático desses parâmetros; os parâmetros

considerados pelo estudo; e os resultados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca na literatura acadêmica resultou em 79 documentos. Após as análises, foi identificado que esses documentos se diferenciavam em literatura nacional e em literatura internacional, além de se diferenciarem em relação à abordagem de medição indireta do Índice Internacional de Irregularidade (IRI), sendo eles: sistemas eletrônicos; *smartphones*; e visão computacional. A distribuição da origem e dos anos de publicação dos documentos, além da sua abordagem de medição indireta do IRI são apresentadas na Figura 1.

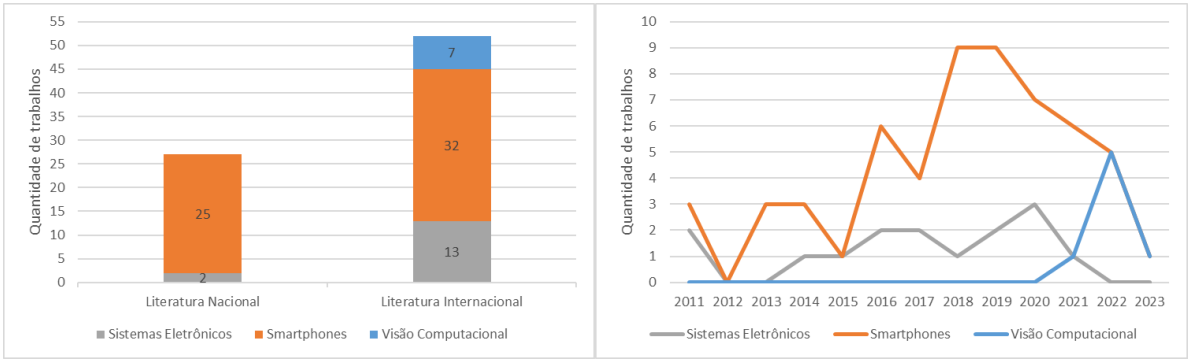


Figura 1: Distribuição dos documentos analisados em relação às abordagens de medição indireta do IRI conforme literatura e anos de publicação

De acordo com a Figura 1, é possível observar uma variação entre as abordagens de medição indireta do IRI. Tem-se, por exemplo, que os estudos identificados tanto na literatura nacional quanto internacional focam, majoritariamente, em *smartphones*, seguido de estudos englobando sistemas eletrônicos e, por fim, visão computacional. Sobre esse último, ressalta-se que não foram identificados estudos na literatura nacional englobando essa abordagem.

Além disso, em relação aos anos de publicação, tem-se que a quantidade de estudos com sistemas eletrônicos manteve-se praticamente constante ao longo dos anos, de forma distinta ao que ocorreu com os estudos envolvendo *smartphones* ou visão computacional. Na primeira abordagem, observou-se um crescente de estudos entre os anos de 2013 e 2019, seguido de uma pequena redução nos anos posteriores. Na segunda abordagem, observou-se um crescente de estudos a partir de 2020, de forma concomitante com uma utilização mais global de visão computacional em diversas áreas de aplicação. Em relação ao conteúdo dos documentos analisados, estes serão discutidos em relação às abordagens de medição indireta do Índice Internacional de Irregularidade (IRI).

3.1. Sistemas Eletrônicos

O uso de sistemas eletrônicos para medição indireta do IRI é objeto de diversos estudos na literatura nacional e internacional. De forma geral, esses estudos se baseiam, fundamentalmente, na obtenção de dados por meio de acelerômetros, de equipamentos com sensores de *Global Positioning System* (GPS) ou outros sensores instalados em diversas partes do veículo.

Nesse sentido, foram identificados estudos que fizeram uso simultâneo de acelerômetros de um ou mais eixos e de sistemas de GPS (Chen *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2017; Wessels e Steyn, 2018; e Mirtbar *et al.*, 2020), ou, ainda, a combinação desses dois instalados em uma roda extra acoplada no veículo (Bidgoli *et al.*, 2019). Em estudos mais recentes, também foi analisado o uso de placas de Arduíno para auxílio de obtenção dos dados (Chou et. al, 2020; Kheirirati e Golroo, 2020; e Mirtabar *et al.*, 2020). Outro tipo de sensor identificado nos estudos foram os Sensores Dinâmicos de Pressão do Pneu (DTPS), o qual media a pressão dos pneus conforme a condução do veículo (Zhao e Wang, 2015; Zhao e Wang, 2016; e Zhao et al, 2017).

Em relação ao potencial de utilização de sistemas eletrônicos para medição indireta do IRI, todos os estudos apresentaram viabilidade, mesmo em pavimentos com a presença de panelas, bueiros ou redutores de velocidade (Chen *et al.*, 2011). Ao comparar os valores de IRI obtidos pelos sensores estudados com valores

de IRI obtidos com departamentos de administração rodoviária, os estudos apresentaram erros de até 15% (Du *et al.*, 2014; Zhao e Wang, 2015; Zhao e Wang, 2016; e Du *et al.* 2016) ou R^2 maiores do que 0,85 (Bidgoli *et al.*, 2019; Mirtabar *et al.*, 2020; e Loprencipe *et al.*, 2021). Foi identificada também, por fim, a viabilidade do uso de sistemas eletrônicos para medição indireta do IRI quando avaliada sobre diferentes velocidades de operação do veículo com o uso de regressões lineares (Wessels e Steyn, 2018). Nesse estudo, os autores classificaram o uso de acelerômetros e do GPS na Classe 3 de precisão, em que a estimativa de IRI, a partir de regressão é possível, caso o levantamento de dados seja realizada de forma correta.

3.2. Smartphones

O uso de *smartphones* é estudado na literatura sob duas óticas diferentes. A primeira ótica é a partir da utilização desses equipamentos como um coletor de dados de acelerômetro, de giroscópio ou de coordenadas geográficas, de forma semelhante a alguns estudos que abordaram os sistemas eletrônicos. A principal diferença versa em relação à utilização de aparelhos *smartphones* comerciais disponíveis em detrimento da construção de um sistema eletrônico dedicado.

Em relação aos *smartphones*, os estudos analisados abordaram diferentes modelos de aparelho (Li e Goldberg, 2018; Bisconsini *et al.*, 2019; Opara *et al*, 2022), diferentes locais de instalação do aparelho nos veículos de inspeção (Zhao e Nagayama, 2017; Zhao *et al.*; 2017; Opara *et al*, 2022) ou diferentes tipos de veículos (Jeong *et al.*, 2020). A partir dos dados coletados em campo, os estudos ainda apresentaram a necessidade da aplicação de equações para estimativa do IRI e sua posterior calibração. Exemplos dessas calibrações são a utilização de lombadas físicas com medidas conhecidas (Rana e Asaduzzaman, 2021; Opara *et al.*, 2022) ou de levantamentos realizados com perfilômetro a *laser* (Jeong *et al.*, 2020; Opara *et al.*, 2022). Os resultados dos estudos analisados apresentam viabilidade da utilização de aparelhos *smartphones*, visto que apresentaram R^2 acima de 0,8 (Jeong *et al.*, 2020), correlações dos modelos de 0,59 a 0,85 (Opara *et al.*, 2022) ou precisão da repetibilidade de medições de, aproximadamente, 5% (Rana e Asaduzzaman, 2021).

A segunda ótica dos estudos que analisaram a utilização de aparelhos *smartphones* é em relação ao desenvolvimento de aplicativos para medição indireta do IRI (Almeida, 2018; Souza *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021; Aboah *et al.*, 2021) ou o uso de aplicativos já desenvolvidos (Hossain *et al.*, 2019; Moreira *et al.*, 2020; Chaves *et al.*, 2020). Desses estudos, realça-se a viabilidade do desenvolvimento de aplicativos através do estudo de Aboah *et al.* (2021), em que foi apresentado um R^2 igual a 0,79 entre os valores obtidos e o IRI obtido com perfilômetro a laser. Além disso, ressalta-se que o desenvolvimento de aplicativos com essa finalidade deve considerar características dinâmicas do veículo, permitindo que vários veículos possam ser usados na avaliação da irregularidade do pavimento. Por fim, a utilização de aplicativos comerciais é abordada com a ressalva de que as validações e as calibrações presentes podem estar correlacionadas com as características das rodovias em que foram desenvolvidos (Moreira *et al.*, 2020; Chaves *et al.*, 2020).

3.3. Visão Computacional

O uso da visão computacional para medição indireta do IRI é objeto de algumas revisões de literatura, como as realizadas por Ranyal *et al.* (2022), Sholevar *et al.* (2022) e Cano-Ortiz *et al.* (2022). Nessas revisões, foram apresentadas diversas técnicas de visão computacional e de *Machine Learning* possíveis de serem utilizadas, os quais fazem o uso de redes neurais e de imagens em duas ou três dimensões. Ao avaliar essas revisões, foi possível constatar o alto nível de acurácia e de precisão que estas técnicas de visão computacional proporcionam e também o seu baixo custo. Outro fator importante identificado nos estudos foi a possibilidade de combinar mais de um tipo de dado, como, por exemplo, em uma câmera de ação ou aparelho *smartphone*, em que é possível coletar imagens 2D e vibrações captadas pelos sensores presentes nos equipamentos.

Tem-se, por exemplo, que alguns estudos identificados utilizaram Redes Neurais de Aprendizagem Profunda (Zeng *et al.*; Bashar e Torres-Machi; 2022). Nestes, para calibrar as redes neurais, foram utilizadas imagens em duas dimensões, coletadas por uma câmera de ação instalada na parte traseira de um veículo de inspeção (Zeng *et al.*, 2022) ou imagens de satélite, capturadas por Radar de Abertura Sintética (Bashar e Torrers-Machi, 2022). Ao correlacionar os resultados das aplicações das Redes Neurais de Aprendizagem Profunda com os valores de IRI obtidos com os departamentos de administração rodoviária, os autores obtiveram resultados semelhantes, sendo o R^2 igual a 0,67 (Zeng *et al.*, 2022) e igual a 0,68 (Bashar e Torres-Machi, 2022). Porém, o modelo desenvolvido por Bashar e Torres-Machi (2022) também correlacionou os valores obtidos com as

redes neurais com intervalos de IRI, apresentando uma precisão de 81%.

Por fim, de forma semelhante, porém, utilizando técnicas de *Machine Learning*, Abohamer *et al.* (2021) obtiveram os valores de IRI a partir de imagens em três dimensões disponibilizadas pelo Departamento de Transportes e Desenvolvimento de Louisiana (LaDOTD). Os resultados obtidos pelos autores também foram satisfatórios, apresentando um erro médio de 5,9% e um R^2 igual a 0,985.

4. CONCLUSÃO

Esse artigo objetivou identificar, por meio de uma revisão de literatura, quais os métodos de levantamento do IRI estão sendo estudados na literatura nacional e internacional como alternativa à medição tradicional com equipamentos com tecnologia a laser. A partir disso, foi possível identificar, de forma não exaustiva, alternativas para este fim. Nesse artigo, foram englobados os usos de sistemas eletrônicos, de aparelhos *smartphones* e de visão computacional. A primeira alternativa consiste na instalação de equipamentos físicos nos veículos de medição. A segunda alternativa consiste em obter, a partir de aparelhos *smartphones*, os dados necessários para o cálculo do IRI, como, por exemplo, dados de giroscópio, acelerômetro e de GPS. Por sua vez, a terceira alternativa consiste na utilização de técnicas de visão computacional com o intuito de estimar as variações do perfil longitudinal do pavimento.

De forma geral, as literaturas nacional e internacional destacam a viabilidade das alternativas de medição do IRI, tanto em termos de custo, quanto de repetibilidade das suas medidas. Porém, os estudos também destacam a importância de se definirem os padrões para essas medições alternativas, como, por exemplo, no caso dos aparelhos *smartphones*, em relação ao modelo do aparelho ou do veículo utilizado na inspeção para que se mantenham os mesmos parâmetros de calibração. Sobre a calibração, os estudos reforçam a sua necessidade em relação aos dados de IRI obtidos pelo método tradicional, a fim de que a calibração feita em outra região, e com outras características rodoviárias, não produza resultados que sejam incoerentes para a região aplicada. Por fim, esta revisão de literatura destacou a viabilidade das medições alternativas do IRI de forma a garantir que as medições de IRI possam ser realizadas de forma mais frequente e de forma mais econômica pelos departamentos rodoviários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboah, A.; M. Boeding e Y. Adu-Gyamfi (2021) Mobile sensing for multipurpose applications in transportation. In: 101st Annual Meeting Transportation Research Board. Columbia: Proceedings, v. 1, n. 1, p. 1-16.

Abohamer, H.; M. Elseifi, N. Dhakal, Z. Zhang e C. N. Fillastre (2021) Development of a Deep Convolutional Neural Network for the Prediction of Pavement Roughness from 3d Images. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 147, n. 4, p. 1-11.

Almeida, L. C. (2018) *Aplicativo para Smartphone Destinado à Medição da Irregularidade Longitudinal em Rodovias.* Dissertação (mestrado). Engenharia de Transportes – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Bashar, M. Z. e C. Torres-Machi (2022) Deep Learning for Estimating Pavement Roughness Using Synthetic Aperture Radar Data. *Automation in Construction*, v. 142.

Bidgoli, M. A.; A. Golroo, H. S. Nadjar, A. G. Rashidabad e M. R. Ganji (2019) Road Roughness Measurement Using a Cost-Effective Sensor-Based Monitoring System. *Automation in Construction*, v. 104, p. 140-152.

Bisconsini, D. R.; J. Loureiro e J. L. Fernandes Jr. (2019) Análise de Fatores Relacionados ao Uso de *Smartphones* para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos. In: 33° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2011) *IPR 745:* Manual de Gerência de Pavimentos. IPR. Publ.: Rio de Janeiro.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) Norma DNIT 442/2023 – PRO: Pavimentação – Levantamento do perfil longitudinal de pavimentos com perfilômetro inercial – procedimento. Brasília, DF.

Cano-Ortiz, S.; P. Pascual-Muñoz e D. Castro-Fresno (2022) Machine Learning Algorithms for Monitoring Pavement Performance. *Automation in Construction*, v. 139.

Chaves, J. W. R.; R. C. Pereira, L. C. de Almeida e F. H. L de Oliveira (2020) Análise Comparativa da Irregularidade Longitudinal de Pavimento Rodoviário em Serviço por Meio de Aplicativos para Smartphone. *Revista Tecnologia*, v. 41, n. 2, p. 1-15.

Chen, K; M. Lu, X. Fan, M. Wei e J. Wu (2011) Road Condition Monitoring Using On-Board Three-Axis Accelerometer and GPS Sensor. In: 6TH International ICST Conference on Communications and Networking in China, p. 1032-1037.

Chou, C.; G. Siao, A. Chen e C. Lee (2020) Algorithm for estimating International Roughness Index by response-based measuring device. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 146, n. 3.

Du, Y.; C. Liu, D. Wu e S. Jiang (2014) Measurement of International Roughness Index by Using *Z*-Axis Accelerometers and GPS. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2014, p. 1-10.

Du. Y.; C. Liu, D. Wu e S. Li (2016) Application of Vehicle Mounted Accelerometers to Measure Pavement Roughness. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 12, n. 6, p. 8413146.

Hossain, M. I.; E. Tutumluer, Nikita e C. Grimm (2019) Evaluation of Android-Based Cell Phone Applications to Measure International Roughness Index of Rural Roads. In: International Conference on Transportation and Development, p. 359-370.

Jeong, J.; H. Jo e G. Ditzler (2020) Convolutional Neural Networks for Pavement Roughness Assessment Using Calibration-Free Vehicle Dynamics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 35, n. 11, p. 1209-1229.

Kheirati, A. e A. Golroo (2020) Low-Cost Infrared-Based Pavement Roughness Data Acquisition for Low Volume Roads. *Automation in Construction*, v. 119, p. 103363.

Li, X. e D. W. Goldberg (2018) Toward a Mobile Crowdsensing System for Road Surface Assessment. *Computers, Environment And Urban Systems*, v. 69, p. 51-62.

Loprencipe, G.; F. G. V. de Almeida Filho, R. H de Oliveira e S. Bruno (2021) Validation of a Low-Cost Pavement Monitoring Inertial-Based System for Urban Road Networks. *Sensors*, v. 21, n. 9, p. 3127.

Mirtabar, Z.; A. Golroo, A. Mahmoudzadeh e F. Barazandeh (2020) Development of a Crowdsourcing-Based System for Computing the International Roughness Index. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-10.

Moreira, F. S.; J. W. R. Chaves, L. C. de Almeida (2020) Estudo Sobre o Uso de *Smartphones* na Estimativa do Índice de Irregularidade Longitudinal dos Pavimentos. In: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte Da ANPET.

Opara, K. R.; K. Brzezinski, M. Bukowicki e K. Kaczmarek-Majer (2022) Road Roughness Estimation Through Smartphone-Measured Acceleration. *Intelligent Transportation Systems Magazine,* v. 14, n. 2, p. 209-220.

Rana, S. e Asaduzzaman. Vibration Based Pavement Roughness Monitoring System Using Vehicle Dynamics and Smartphone with Estimated Vehicle Parameters. *Results in Engineering*, v. 12, p. 100294.

Ranyal, E.; A. Sadhu e K. Jain (2022) Road Condition Monitoring Using Smart Sensing and Artificial Intelligence: a Review. *Sensors*, v. 22, n. 8, p. 3044.

Sholevar, N.; A. Golroo e S. R. Esfahani (2022) Machine Learning Techniques for Pavement Condition Evaluation. *Automation In Construction*, v. 136, p. 104190.

Souza, V. M. A.; R. Giusti e A. J. L. Batista (2018) Asfault: a Low-Cost System to Evaluate Pavement Conditions in Real-Time Using *Smartphones* and Machine Learning. *Pervasive and Mobile Computing*, v. 51, p. 121-137.

Wessels I. e W. J. Steyn (2018) Continuous, Response-Based Road Roughness Measurements Utilising Data Harvested from Telematics Device Sensors. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 21, n. 4, p. 437-446.

Zeng, J.; M. Gül e Q. Mei (2022) A Computer Vision-Based Method to Identify the International Roughness Index of Highway Pavements. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, v. 1, n. 1, p. 100004.

Zhang, Z.; H. Zhang, S. Xu e W. Lv (2021) Método de Avaliação da Rugosidade do Pavimento Baseado na Relação Teórica entre a Aceleração Medida por Smartphone e IRI. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-17.

Zhao, Y. e M. L. Wang (2015) Measurement Through Dynamic Tire Pressure Sensor Inside the Tire. In: Airfield and Highway Pavements, p. 282-293.

Zhao, Y. e M. L. Wang (2016) IRI Measurement Using Dynamic Tire Pressure Sensor with an Axle Accelerometer. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 6, n. 5, p. 791-802.

Zhao, Y.; J. G. McDaniel e M. L. Wang (2017) IRI Estimation Using Analysis of Dynamic Tire Pressure and Axle Acceleration. *Smart Structures and Systems*, v. 19, n. 2, p. 151–161.

Zhao, B.; T. Nagayama, M. Toyoda, N. Makihata, M. Takahashi e M. Ieiri (2017) Vehicle Model Calibration in the Frequency Domain and its Application to Large-Scale IRI Estimation. *Journal of Disaster Research*, v. 12, n. 3, p. 446–455

Zhao, B. e T. Nagayama (2017) IRI Estimation by the Frequency Domain Analysis of Vehicle Dynamic Responses. *Procedia Engineering*, v. 188, p. 9-16.

Tiago Augusto Pianezzer (tiago.pianezzer@gmail.com)
Daniel Vieira Machado (danielvm.eng@gmail.com)
Gustavo Garcia Otto (otto.gus@gmail.com)
Camila Belleza Maciel Barreto (camilabmaciel@gmail.com)
Valter Zanela Tani (vztani@gmail.com)
Wellington Longuini Repette (wellington.repette@gmail.com)
Laboratório de Transportes e Logística, Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário – Trindade – Florianópolis, SC, Brasil

Gestão de Pavimentos

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MISTURA ASFÁLTICA DE CONCRETO ASFÁLTICO

Raimundo Nonato da Costa Neto[1], **Mayssa Alves da Silva Sousa**[2]
[1]Universidade de São Paulo (USP), [2]Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

RESUMO
A deterioração dos pavimentos asfálticos pode ocorrer por diversos fatores, como dimensionamento incorreto, técnica de execução ou qualidade dos materiais. Entretanto, um fator pouco abordado é a temperatura a qual o revestimento asfáltico é exposto em campo, que pode influenciar diretamente seu desempenho mecânico. Dessa forma, a pesquisa teve como objetivo analisar a influência da temperatura no comportamento mecânico da mistura asfáltica na cidade de São Luís – MA. Para isso, foram observadas temperaturas através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de medições na camada superficial do revestimento, utilizando um termômetro digital a laser. Assim, foram determinadas as temperaturas de 60°C, 62°C e 64°C, para realização dos ensaios de Estabilidade Marshall e Resistência à Tração por Compressão Diametral. Os resultados, apresentaram pouca variação no comportamento mecânico para o ensaio de estabilidade, mas demonstraram grande impacto na resistência à tração do corpo de prova com a variação da temperatura.

1. OBJETIVO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas usinadas a quente visando a melhoria de sua qualidade e a vida útil dos pavimentos asfálticos. Além de realizar o registro das temperaturas que as misturas asfálticas maranhenses de fato sofrem em campo e avaliar a dosagem de uma mistura asfáltica do tipo Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) com base na volumetria e comportamento mecânico quanto a estabilidade Marshall e Resistência a Tração variando-se a temperatura.

2. METODOLOGIA

A coleta de informações da temperatura ambiente do município foi realizada na base de dados do INMET, sendo analisadas a estação 82280 localizada na Reserva do Itapiracó, e a estação 82281 localizada no Aeroporto. Mesmo assim, ainda foi analisado mais um ponto para a verificação da temperatura próximo a região litorânea, visando observar se há influência dos ventos na variação da temperatura.

A partir da definição das zonas foram escolhidas as vias para realização das medições das temperaturas, e em seguida, realizada a aferição durante três dias da semana (segunda, quarta e sexta) com horário definido conforme os resultados obtidos através da pesquisa do banco de dados do INMET. Ainda assim, para a medição da temperatura da superfície do pavimento asfáltico foi utilizado o termômetro laser digital infravermelho, onde a medição foi realizada bem próxima da superfície do pavimento.

Para avaliar o comportamento mecânico da mistura asfáltica conforme variação da temperatura, foram confeccionados corpos de prova (CPs), sendo três para cada ensaio e cada temperatura Os CPs foram submetidos aos ensaios de Estabilidade Marshall, conforme norma DNIT 447 (2024), e o de Resistência à Tração por Compressão Diametral, de acordo com a norma DNIT 136 (2018). Para ambos os ensaios, exceto para o rompimento da resistência à tração em temperatura ambiente, as amostras foram colocadas em banho-maria a três diferentes temperaturas (60°C, 62°C e 64°C).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise dos dados das estações meteorológicas do INMET, foi possível constatar que o período entre 13:00 e 15:00 horas representa a faixa cujo ambiente atinge a sua temperatura máxima do ar. Sendo assim, realizando a aferição em campo, a Tabela 1 apresenta a divisão das zonas estudadas e o registro das três maiores temperaturas do pavimento para cada dia de medição, ressaltando que foram executadas medições no início e fim dos horários determinados e em intervalos de 30 minutos.

Tabela 01: Maiores temperaturas do pavimento registradas nos dias de aferição

Zona Norte Litorânea				**Zona Central**				**Zona Sul**			
Dia	Temperatura (°C)			Dia	Temperatura (°C)			Dia	Temperatura (°C)		
01/nov	60.6°	58.6°	51.1°	08/nov	61.6°	58.5°	56.6°	18/out	52.8°	52.3°	51.4°
03/nov	55.6°	54.6°	53.2°	10/nov	56.6°	56.3°	55.7°	20/out	62.0°	60.4°	59.9°
06/nov	56.7°	56.6°	55.7°	13/nov	58.0°	57.1°	56.3°	23/out	53.5°	53.5°	53°

Para o ensaio de Estabilidade Marshall, notou-se que todos os CPs testados atenderam ao requisito mínimo de

500 kgf definido pela norma conforme pode ser observado na Figura 1. Além disso, observa-se que com o aumento da temperatura do banho-maria em 2°C ocasionou em um decréscimo de 2,08% da estabilidade Marshall média dos CP's. No entanto, embora que com o aumento da temperatura em 4°C tenha sido observado um acréscimo de 26,04% na estabilidade média em relação à condição de 60°C, este resultado não apresentou consistência, pode estar associado as variações experimentais selecionadas. De acordo com a bibliografia consultada, o comportamento esperado é a redução da estabilidade à medida que a temperatura aumenta.

Já para o ensaio de resistência à tração observa-se na Figura 1 que, com o aumento da temperatura os resultados demonstraram decréscimos significativo, no qual as novas temperaturas atribuídas para esta pesquisa apresentaram resultados inferiores ao mínimo de 0,65 MPa definido pela norma. Ainda assim, os CP's com temperatura de 60°C apresentaram um decréscimo de 90,31%, já os submetidos a 62°C e 64°C, tiveram decréscimo em 91% e 92,47% em comparação a temperatura utilizada na norma. Dessa forma, este resultado demonstra que com o aumento da temperatura, tem-se que a mistura asfáltica torna-se menos resistente em função do aumento da viscosidade do ligante, permitindo que o rompimento do CP aconteça precocemente.

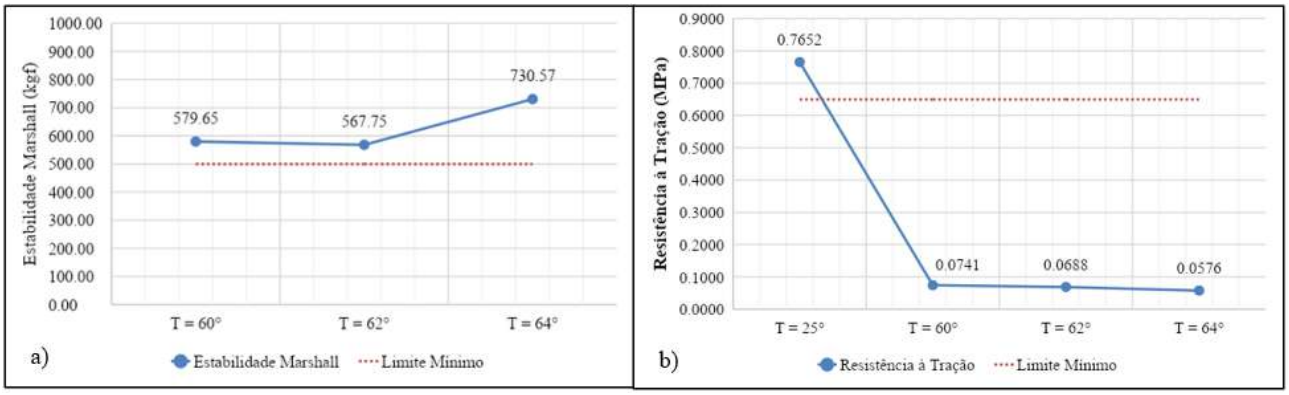


Figura 1: (a) Resultado de Estabilidade Marshall; (b) Resultado de Resistência à Tração (Autor, 2024)

4. CONCLUSÃO

Portanto, os resultados demonstraram que a temperatura do pavimento exerce influência significativa sobre o desempenho mecânico de misturas asfálticas. Nos ensaios de Estabilidade Marshall, a variação de temperatura aplicada (60°C a 64°C) pode ter sido insuficiente para observar alterações consistentes em seu resultado, diferentemente do ensaio de resistência à tração, que demonstrou elevada sensibilidade com o aumento da temperatura. Já para as temperaturas encontradas em campo, notou-se valores discrepantes quanto aos aplicados em ensaio, ou seja, na prática a mistura asfáltica é submetida a fatores térmicos superiores aos aplicados em testes.

Dessa maneira, reforça-se a importância do estudo da temperatura para os ensaios de misturas asfálticas, principalmente no que se refere a aplicar ensaios com parâmetros semelhantes ao encontrado em campo visando minimizar o deterioramento precoce de pavimentos. Este fator torna-se ainda mais essencial para países com grande extensão territorial como o Brasil, no qual há uma grande diferença nas temperaturas a qual o revestimento está submetido dependendo da localidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa (CNPq/FNDCT/MCTI: Processo 405594/2022-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNIT (2018) Norma DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2024) Norma DNIT 447/2024 – ME: Misturas asfálticas – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall – Método de Ensaio. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Mapa de estações. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br>. Acesso em: 15 de setembro de 2023.

Raimundo Nonato da Costa Neto (raimundoneto25@usp.br)
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Carlos – SP, Brasil.
Mayssa Alves da Silva Sousa (mayssasousa@professor.uema.br)
Universidade de Estadual do Maranhão (UEMA), Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, São Luís, MA - Brasil

Gestão de Pavimentos

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

CALIBRAÇÃO DE MODELOS DO HDM-4 PARA EVOLUÇÃO DO IRI EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE MINAS GERAIS COM TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

Leonardo Melo Bittencourt[1], **Marina Donato**[1,2], **Bruno Guida Gouveia**[3]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – ETG, [2]Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ – DTECH,
[3]Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ – DCCT

RESUMO
O gerenciamento eficiente da infraestrutura rodoviária requer modelos de desempenho que representem com precisão as condições reais de uso e deterioração dos pavimentos. Este trabalho tem como objetivo calibrar os modelos de evolução do Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) do HDM-4 para pavimentos flexíveis na malha rodoviária de Minas Gerais. A metodologia compreenderá a coleta de informações de IRI, tráfego, clima e características estruturais, seguida do tratamento dos dados. Algoritmos Random Forest e redes neurais feed-forward serão ajustados e avaliados via validação cruzada estratificada. As importâncias extraídas dos algoritmos subsidiarão a obtenção de coeficientes de calibração, que posteriormente serão implementados no modelo HDM-4. O conjunto calibrado será avaliado para identificar a precisão dos modelos de desempenho dos pavimentos sob condições regionais e comparados com os modelos com calibração padrão. Por fim, espera-se que os modelos calibrados com IA apresentem maior precisão na predição do IRI.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O HDM-4 (*Highway Development and Management Model)* é o padrão internacional mais difundido para prever a deterioração de pavimentos e avaliar cenários de manutenção. Contudo, seus coeficientes originais foram obtidos com dados multicontinentais coletados nos anos 1990, ao serem aplicados sem ajustes locais, podem gerar erros relevantes na previsão do índice de irregularidade longitudinal (IRI) e, por consequência, na programação de obras rodoviárias (Kerali *et al*., 2006).

Experiências de calibração na Coréia do Sul e no estado de Washington mostram reduções de 30 % a 40 % no erro preditivo do IRI quando os parâmetros do HDM-4 são ajustados a condições regionais (Han *et al*., 2008; Li *et al*., 2005). Enquanto isso, o estado de Minas Gerais dispõe de séries históricas de dados de pavimento e tráfego, mas ainda carece de fatores de calibração próprios, refiná-los pode viabilizar a priorização de intervenções com melhor relação custo-benefício.

A melhoria da gestão de pavimentos está alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) 9: "*construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação*" e 11: "*...proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis...*" da Agenda 2030 (ONU 2015). Desse modo, tendo em vista que modelos melhor calibrados podem viabilizar análises mais aderentes de modo a otimizar a utilização dos recursos públicos (Li et al., 2005), essa pesquisa reforça simultaneamente esses dois objetivos globais.

O estudo terá como objetivo estimar os parâmetros de calibração dos modelos de deterioração do HDM-4 para pavimentos flexíveis em Minas Gerais com foco na evolução do índice de irregularidade longitudinal (IRI) com a utilização de algoritmos de Random Forest (RF) e redes neurais (ANN). Ao estudar novas formas de calibração dos modelos HDM-4 e o impacto desses ajustes na capacidade preditiva dos modelos, a pesquisa pretende contribuir para as práticas de gestão de pavimentos no estado de Minas Gerais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O HDM-4 é um modelo para conservação e manutenção de rodovias, desenvolvido em cooperação com o Banco Mundial para facilitar o planejamento de investimentos e análises técnico-econômicas em projetos rodoviários. Com mais de 40 anos de utilização e mais de 2.000 licenças vendidas em 110 países, tornou-se essencial na gestão de pavimentos (Moraes, 2018). No núcleo do sistema estão conjuntos de equações que descrevem a interação entre estrutura, superfície, tráfego e clima, projetando a evolução de defeitos como: trincas, afundamento, perda estrutural e, sobretudo, do IRI (Kerali *et al*., 2006).

2.1. Calibração do modelo HDM-4

Os manuais do HDM-4 distinguem três níveis de calibração, Aplicação (nível 1), Verificação (nível 2) e Adaptação (nível 3), cujo esforço varia de algumas semanas, quando se ajustam apenas os parâmetros mais sensíveis, até vários anos, caso seja necessário substituir ou reformatar inteiramente as equações internas (Bennet e Paterson, 2000).

Estudos desenvolvidos na Índia e no Marrocos demostraram que a adoção de fatores locais pode elevar sensivelmente a aderência dos modelos (Singh e Chopra, 2018; Bannour *et al*., 2019). Uma calibração conduzida em Patiala, resultou em redução do erro médio quadrático RMSE do IRI em 16 % (de 0,494 para 0,416 m/km) enquanto o coeficiente de correlação R^2 subiu de 0,9743 para 0,9811 (Singh e Chopra, 2018). Paralelamente, outro estudo conduzido em rodovias marroquinas demonstrou que o ajuste do fator Kgp fez o RMSE recuar mais de 50 %, com resultados que se deslocaram do intervalo de 0,14 a 0,48 m/km para 0,07 a 0,24 m/km, e elevou o R^2 de 0,45 para até 0,94 (Bannour *et al*., 2019).

2.2. Modelos estatísticos de predição do IRI

Modelos puramente estatísticos ou probabilísticos têm mostrado ganhos expressivos sem recorrer ao HDM-4 (Yshiba e Fernandes Junior, 2005; Soncim, 2013). Yshiba e Júnior (2005) utilizaram a análise de variância (ANOVA) e regressão múltipla para a construção de um modelo de previsão de IRI, alcançando $R^2 = 0,78$, e compararam com os modelos propostos por Queiroz em 1981, por Paterson em 1987 e por Marcon em 1996, que obtiveram R^2 de 0,68, 0,64 e 0,57 respectivamente.

2.3. Modelagem do IRI com Inteligência Artificial

Experiências internacionais com a utilização de inteligência artificial (IA) para a criação de modelos de previsão de IRI tem obtido resultados superiores a métodos sem a utilização de IA (Sidgel *et al*., 2024; Gong *et al*., 2018; Bashar e Torres-machi, 2021). Em rodovias do Nepal, uma ANN do tipo 5-10-1 gerou um modelo de previsão de IRI com R^2 0,82 RMSE de 1,883 m/km e os comparou com os resultados de um modelo obtido por regressão polinomial, com um R^2 de 0,76 e RMSE de 2,375 m/km (Sidgel *et al*., 2024). Nos Estados Unidos, um modelo do tipo *Random Forest* treinado com 11 715 amostras obteve $R^2 = 0,974$ e RMSE = 0,00045 m/km, enquanto o modelo criado com regressão apresentou um R^2 próximo de 0,62 e RMSE de 0,086 m/km (Gong *et al*., 2018).

Bashar e Torres-machi (2021) elaboraram uma meta-análise de vinte estudos, que concluiu que modelos de predição de IRI elaborados com algoritmos de IA apresentam coeficientes de determinação em média 15,6 % maiores do que técnicas convencionais, com destaque para o *Random Forest*, correlação média 0,995, seguido por ANN, R^2 médio de 0,930. Os resultados obtidos apontaram que modelos baseados em IA, alcançam sistematicamente coeficientes de correlação maiores e erros menores que os verificados em regressões lineares.

3. METODOLOGIA

O estudo seguirá cinco etapas para estimar fatores de calibração das equações de deterioração do HDM-4 com a utilização de modelos de IA. Esse processo, bem como a quantificação da alteração na aderência das previsões de desempenho das curvas de IRI não recorrerá ao *software* HDM-4, uma vez que todas as equações do modelo de previsão de desempenho serão implementadas diretamente em Python.

3.1. Base de dados

Será estruturado um banco único que reunirá levantamentos anuais de IRI, registros de defeitos superficiais, deflexões, contagens classificadas de tráfego e séries de precipitação e temperatura médias anuais. Assim, todos os arquivos brutos serão importados para esse banco de dados.

3.2. Pré-processamento

Uma análise exploratória identificará valores faltantes e *outliers*. Os faltantes pontuais serão interpolados, enquanto os *outliers* verificados e removidos ou corrigidos. As variáveis numéricas serão normalizadas com o objetivo de evitar que valores de maior magnitude tenham maior influência no cálculo. Diferentes funções de ativação serão testadas para escolher aquela que produzir o menor erro na rede neural.

3.3. Modelagem de IA

Serão treinados dois algoritmos preditivos: *Random Forest* (*RF*) e rede neural *feed-forward* (*ANN*). Os dados serão divididos em conjuntos de treino, validação e teste e, caso necessário, poderá ser aplicado um *stratified sampling* para preservar a distribuição das classes de tráfego. Os hiper-parâmetros (profundidade de árvore, número de épocas, *learning rate*) serão ajustados por validação cruzada utilizando um *grid-search*.

3.4. Cálculo dos fatores de calibração

As equações de predição de IRI do HDM-4 e seus componentes, estrutural, trincamento, afundamento, panelas e ambiente, serão transcritas em Python. Os coeficientes de calibração padrão serão substituídos por valores obtidos a partir dos coeficientes de importância (*feature importances)* do *RF* e dos pesos e vieses da *ANN*. Esses valores serão refinados via regressão simbólica, garantindo que a forma das equações e a

interpretabilidade física sejam preservadas.

3.5. Validação

Com os novos coeficientes, as equações gerarão séries anuais de IRI para os anos dos quais se dispõe de dados, que serão comparadas aos valores empíricos da base de dados. Métricas de desempenho, RMSE e R^2, serão calculadas tanto para o modelo calibrado por IA quanto para o modelo com calibração padrão. Uma análise comparativa demonstrará a diferença de precisão obtida com a abordagem proposta em comparação com a calibração padrão.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que os modelos calibrados com inteligência artificial apresentem desempenho superior à calibração padrão do HDM-4, com redução significativa no RMSE e aumento do R^2, refletindo maior precisão e capacidade explicativa na previsão do IRI. A aplicação da validação cruzada estratificada e o ajuste dos hiperparâmetros deverão assegurar maior robustez e generalização dos modelos.

Concomitantemente, a análise dos coeficientes de importância do Random Forest e dos pesos das redes neurais permitirá identificar as variáveis mais relevantes para a evolução do IRI. Esses valores servirão de base para o refinamento dos coeficientes de calibração por regressão simbólica, preservando a estrutura física das equações do HDM-4 e adequando-as às condições regionais da malha rodoviária mineira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bannour, A.; M. El Omari; E. Lakhal; M. Afechkar; A. Benamar e P. Joubert (2019) Optimization of the maintenance strategies of roads in Morocco – calibration study of the degradations models of the Highway Development and Management (HDM-4) for flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, n. 2, p. 245–254. DOI: 10.1080/10298436.2017.1293261.

Bashar, M. Z.; C. Torres-Machi (2021) Performance of machine learning algorithms in predicting the pavement International Roughness Index. *Transportation Research Record*, v. 2675, n. 5, p. 226–237. DOI: 10.1177/0361198120986171.

Bennett, C. R.; W. D. O. Paterson (2000) HDM-4: Highway Development and Management – Volume 7: Model calibration and adaptation. Paris: World Road Association – PIARC.

Gong, H.; Y. Sun; X. Shu e B. Huang (2018) Use of random forests regression for predicting IRI of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 890–897. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.017.

Han, D.; K. Kobayashi e M. Do (2008) Improved calibration for HDM-4 implementation: a lesson from Korean experiences. In: Anais do Encontro Anual da Japan Society of Civil Engineers. Kyoto: JSCE. Disponível em: http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/200911_no40/pdf/84.pdf (acesso em 05/07/2025).

Kerali, G. R.; J. B. Odoki e E. E. Stannard (2006) HDM-4: Highway Development and Management Model – Volume 1: Overview of HDM-4. Paris: World Road Association – PIARC.

Li, J.; S. T. Muench; J. P. Mahoney; N. Sivaneswaran; L. M. Pierce e G. C. White (2005) The Highway Development and Management System in Washington State: calibration and application for the Department of Transportation road network. *Transportation Research Record*, v. 1933, p. 53–61. DOI: 10.3141/1933-07.

Moraes, O. L. P. (2010) Avaliação econômica, programação e planejamento de investimentos em rodovias por meio do modelo HDM-4: manual do aluno. Rio de Janeiro: IPR.

Sigdel, T.; R. Pradhananga e S. Shrestha (2024) Artificial neural network-based model to predict the International Roughness Index of national highways in Nepal. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 25, art. 101128. DOI: 10.1016/j.trip.2024.101128.

Singh, A.; T. Chopra (2018) Calibration of rutting and roughness distress models of HDM-4 for developing pavement maintenance management. In: J. Shiau; V. Vimonsatit; S. Yazdani e A. Singh (eds.). Streamlining information transfer between construction and structural engineering. Bangkok. DOI: 10.14455/ISEC.res.2018.77.

Soncim, S. P.; J. L. Fernandes Jr. e L. E. P. Campos (2013) Modelo de desempenho de irregularidade longitudinal desenvolvido com base em dados da rede de rodovias em tratamento superficial duplo do Estado da Bahia. *Transportes*, v. 21, n. 3, p. 22–30. DOI: 10.4237/transportes.v21i3.681.

United Nations (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). New York: United Nations. Disponível em: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf (acesso em 05/07/2025).

Yshiba, J. K.; J. L. Fernandes Jr. (2005) Modelos estatísticos para previsão de desempenho de pavimentos. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 27, n. 2, p. 175–181. DOI: 10.4025/actascitechnol.v27i2.1481.

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURA CICLOVIÁRIA NA PERSPECTIVA DO CONFORTO

Matheus de Oliveira Alcântara Dias, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
A crescente urbanização e a necessidade de soluções sustentáveis impulsionam o uso da bicicleta como meio de transporte. No entanto, a qualidade da infraestrutura cicloviária afeta diretamente o conforto e a segurança dos ciclistas. Este estudo propõe uma metodologia para avaliação da infraestrutura cicloviária sob a perspectiva do conforto de rolamento, utilizando um dispositivo de baixo custo acoplado a bicicletas instrumentadas para medição da irregularidade longitudinal do pavimento. A pesquisa busca a padronização de métodos, estabelecendo faixas de valores para categorização do conforto em diferentes tipos de superfícies. A metodologia será aplicada à malha cicloviária de Fortaleza, permitindo definir os trechos prioritários para intervenções. Espera-se que os resultados contribuam para a melhoria do processo de tomada de decisão acerca da manutenção da infraestrutura cicloviária, servindo de subsídio para políticas públicas voltadas à segurança e ao conforto dos ciclistas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente urbanização e necessidade de modos de transporte mais sustentáveis têm impulsionado políticas voltadas à expansão da infraestrutura cicloviária. O incentivo ao uso da bicicleta como meio de transporte está alinhado a diretrizes internacionais de sustentabilidade e à redução da emissão de gases poluentes, como estabelecido pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), particularmente os ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) (ONU, 2015). No Brasil, a Política Nacional de Mobilidade Urbana reforça a necessidade de integração da bicicleta como meio de transporte viável, garantindo acessibilidade e segurança aos usuários (Brasil, 2012).

Estudos indicam que a qualidade da superfície das ciclovias influencia diretamente a adoção desse meio de transporte, visto que irregularidades longitudinais, descontinuidades e trepidações excessivas geram desconforto e aumentam os riscos de acidentes (Gao *et al.*, 2019; Nuñez *et al.*, 2018). A falta de padronização de critérios para avaliar a qualidade do rolamento da infraestrutura cicloviária representa um problema relevante, uma vez que impede diagnósticos precisos e a formulação de estratégias eficazes para a manutenção dos pavimentos cicloviários.

Este estudo tem como objetivo propor uma metodologia para avaliação da infraestrutura cicloviária sob a perspectiva do conforto de rolamento. A pesquisa fundamenta-se na hipótese de que a adoção de um método padronizado, utilizando uma aparelhagem de baixo custo, permitirá diagnósticos mais objetivos e economicamente viáveis, auxiliando na definição de estratégias de manutenção por meio de intervenções mais eficientes (Gao *et al.*, 2019; Rizelioglu *et al.*, 2023). A mensuração do conforto será realizada por meio da instrumentação de bicicletas com sensores de baixo custo para captar dados de irregularidade longitudinal do pavimento, considerando parâmetros físicos e a percepção dos usuários, estabelecendo, posteriormente, uma faixa de valores para a categorização do conforto percebido pelos ciclistas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A avaliação do conforto de rolagem em infraestruturas cicloviárias baseia-se em indicadores que quantificam a irregularidade longitudinal do pavimento e suas consequências para os ciclistas. *O International Roughness Index* (IRI) é um dos indicadores mais utilizados para medir a qualidade do pavimento em rodovias (DNIT, 2006), mas sua aplicabilidade em ciclovias é limitada. Este foi desenvolvido para avaliar condições de rodagem de veículos motorizados, baseados no quarto de carro (Karamihas e Sayers, 1998). Para superar essa limitação, Lima Terceiro Neto (2020) propôs uma adaptação do IRI para ciclovias, correlacionando valores de irregularidade à percepção subjetiva dos ciclistas.

Outro indicador relevante é o *Root Mean Square Vertical Acceleration* (RMSVA), que mede a aceleração vertical sofrida pelos ciclistas ao passar por irregularidades na via (Gao *et al.*, 2019). Este indicador está relacionado à norma ISO 2631-1 (1997), que classifica os níveis de conforto com base na exposição do corpo humano à vibração. Estudos indicam que a percepção do conforto dos ciclistas é diretamente proporcional aos

valores de RMSVA obtidos em campo (Gao *et al.*, 2019, Lima Terceiro Neto, 2020).

A mensuração da irregularidade do pavimento pode ser realizada por meio de métodos tradicionais e de baixo custo do tipo resposta. Entre os métodos tradicionais temos o método mira-nível, que, apesar de ser altamente preciso (Bisconsini, 2016), é lento e requer uma equipe treinada para a coleta de dados (DNER, 1986). Por isso, seu uso em grandes malhas cicloviárias é inviável.

Com o avanço tecnológico, dispositivos de baixo custo do tipo resposta passaram a ser utilizados para avaliar a irregularidade longitudinal. Esses dispositivos, acoplados a bicicletas instrumentadas, medem a resposta do ciclista às irregularidades do pavimento (Ramos, 2017; Rizelioglu *et al.*, 2023). Entretanto, há uma grande variabilidade nos parâmetros utilizados nesses estudos, como frequência de amostragem, pressão dos pneus e velocidade de deslocamento, o que dificulta a padronização dos métodos de medição. A falta de padronização limita a comparabilidade entre estudos e a aplicação dos resultados na formulação de políticas de mobilidade, havendo uma ampla variação nos parâmetros adotados para a coleta de dados (Ramos, 2017; Nuñez *et al*, 2018; Gao *et al.*, 2019; Lima Terceiro Neto, 2020; Rizelioglu *et al*, 2023), como pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1: Variação dos parâmetros de frequência, velocidade, pressão dos pneus, suspensão e filtro digital em diferentes referências da literatura

Frequências (Hz)	Velocidades (km/h)	Pressão dos Pneus (PSI)	Travamento da suspensão	Filtro Digital
82	5	30	Com travamento	Passa-Faixa
50	10	32	Sem travamento	Passa-Baixa
100	15	50		Média Móvel
400	20			Kalmann
	25			

3. METODOLOGIA

A metodologia será dividida em cinco etapas: desenvolvimento do dispositivo tipo resposta, seleção de trecho experimental, calibração, aplicação em rede e validação dos resultados, e definição de faixas de conforto. Inicialmente, será desenvolvido um dispositivo tipo resposta de baixo custo, baseado em acelerômetro MPU-6050, microcontrolador ESP32 e relógio RTC. Este sistema será acoplado a uma bicicleta instrumentada, como observa-se no esquema apresentado na figura 1 e coletará a aceleração vertical, associada à irregularidade longitudinal do pavimento (Ramos, 2017; Lima Terceiro Neto, 2020; Rizelioglu et al., 2023).



Figura 1: Instrumentação da bicicleta

Em seguida, será selecionado um trecho experimental no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), por oferecer baixo tráfego motorizado e boas condições de controle. Esse trecho servirá como base para calibração, utilizando o método mira-nível como referência, conforme DNER (1986) e Bisconsini (2016), garantindo confiabilidade à mensuração. A calibração será realizada com variações de velocidade, pressão dos pneus e estado da suspensão, seguindo parâmetros reportados na literatura (Ramos, 2017; Nuñez *et al.*, 2018;

Gao *et al*., 2019, 2023; Lima Terceiro Neto, 2020; Rizelioglu *et al*.). Os dados obtidos serão comparados aos valores medidos por mira-nível, ajustando o dispositivo para máxima correspondência.

Concluída essa etapa, o método será aplicado à malha cicloviária de Fortaleza, abrangendo diferentes tipologias (ciclovias, ciclofaixas, ciclorrotas) e pavimentos (asfalto, placas de concreto e blocos intertravados). A coleta será feita com o dispositivo calibrado, e os resultados serão analisados estatisticamente. Paralelamente, será aplicado um questionário a ciclistas experientes, com avaliação subjetiva do conforto de rolamento em escala de 0 a 5, conforme Lima Terceiro Neto (2020).
Com isso, serão realizados testes de correlação e regressão linear envolvendo os dados objetivos (aceleração vertical) e os dados subjetivos (nota de conforto de 0 a 5), com finalidade de estabelecer faixas de valores que definam o nível de conforto, de forma a obter categorização padronizada da infraestrutura cicloviária quanto ao conforto de rolamento.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se que este estudo contribua para a avaliação e gestão da infraestrutura cicloviária, com o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo para analisar a irregularidade longitudinal dos pavimentos. Também é esperado definir faixas de valores para categorizar os pavimentos quanto ao conforto de rolamento, considerando diferentes superfícies, como asfálticas, de concreto e de blocos intertravados, facilitando diagnósticos precisos e a priorização de intervenções de manutenção.

Por fim, espera-se a metodologia proporcione uma análise mais objetiva da qualidade da superfície das vias cicloviárias, ajudando gestores públicos a otimizar recursos e melhorar a infraestrutura. A implementação de um método padronizado que contribua para a promoção de uma mobilidade urbana sustentável e segura, incentivando o uso da bicicleta como meio de transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISCONSINI, D. R. *Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BRASIL. *Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012*. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 4 jan. 2012.

GAO, J.; SHA, A.; HUANG, Y.; LIU, Z.; HU, L.; JIANG, W.; YUN, D.; TONG, Z.; WANG, Z. *Cycling comfort on asphalt pavement: influence of the pavement-tyre interface on vibration*. Journal of Cleaner Production, v. 223, p. 323-341, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.153

ISO (1997) Norma ISO 2631-1. *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements*. International Organization for Standardization, 1997.

KARAMIHAS, S. M.; SAYERS, M. W. *The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*. University of Michigan Transportation Research Institute, 1998.

LIMA TERCEIRO NETO, A. D. de. *Avaliação do conforto em infraestruturas cicloviárias com base em irregularidade longitudinal, vibrações medidas por smartphones e percepções dos ciclistas*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

NUÑEZ, J. Y. M.; TEIXEIRA, I. P.; SILVA, A. N. R.; ZEILE, P.; DEKONINCK, L.; BOTTOELDOOREN, D. *The influence of noise, vibration, cycle paths, and period of day on stress experienced by cyclists*. Sustainability, v. 10, n. 7, p. 2379, 2018. https://doi.org/10.3390/su10072379

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Brasília: Nações Unidas, 2015.

RAMOS, S. P. *Análise da viabilidade técnica dos levantamentos de baixo custo de perfil e irregularidade longitudinal de pavimento com o uso de acelerômetros controlados por Arduino auxiliado por bicicleta*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

RIZELIOĞLU, M.; YAZICI, M. *New approach to determining the roughness of bicycle roads*. Transportation Research Record, v. 2678, n. 1, p. 781–793, 2023. https://doi.org/10.1177/03611981231172753

DNER(1986) Norma DNER-ES 173/86 – *Levantamento de irregularidade longitudinal com o uso de nível e mira*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1986.

Matheus de Oliveira Alcântara Dias (matheus.alcantara@det.ufc.br)
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Departamento de Engenharia de Transportes, Rua Professor Armando Farias, 703 – Pici, Fortaleza – CE, Brasil. e país)

Ligantes para Pavimentos Flexíveis

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO PARA ASFALTO MODIFICADO COM POLÍMERO

Maria Eduarda Olinto Costa Ferreira, Leonardo Rodrigues Guedes, Adla Jamilly Vieira Felipe, Allan Kewen Câmara de Oliveira, Ana Maria Gonçalves Duarte, Arthur Nóbrega de Sousa, João Pedro Silveira Salustiano, Ana Letícia Feitosa de Macêdo
Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO
A modificação de ligantes asfálticos com polímeros busca melhorar a resistência, reduzir deformações térmicas e aumentar a durabilidade dos pavimentos. No entanto, a metodologia Superpave (ASTM D6373), usada para definir temperaturas de usinagem e compactação, mostra-se limitada para asfaltos modificados, sugerindo temperaturas acima de 180 °C que podem comprometer o material. Esta pesquisa analisou os ligantes AMP 55/75 e AMP 65/90, utilizando métodos convencionais e alternativas como *High Shear Rate Viscosity* (HSRV), *Zero Shear Rate Viscosity* (ZSRV) e *Low Shear Rate Viscosity* (LSRV). Os resultados mostraram que as metodologias alternativas, especialmente HSRV e LSRV, fornecem temperaturas mais compatíveis com as condições reais de campo. Essas abordagens oferecem melhor equilíbrio entre desempenho, qualidade e durabilidade, destacando a importância de uma calibragem técnica para alinhar normas e práticas operacionais. Conclui-se que o uso dessas técnicas é promissor para otimizar o desempenho das misturas asfálticas modificadas com polímeros.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Pavimentos com ligantes modificados por polímeros apresentam maior resistência à deformação permanente, e a fadiga, além de menor susceptibilidade térmica (Yildirim, 2007; Mothé, 2009). A modificação do ligante aumenta sua viscosidade, elevando as temperaturas de usinagem e compactação (Domingos et al., 2012). A norma ASTM D6373 (Superpave) define essas temperaturas com base na viscosidade obtida via viscosímetro rotacional, mas para ligantes modificados, essa metodologia tende a indicar temperaturas superiores a 180 °C, incompatíveis com as práticas de campo (Micaelo, Santos, Duarte, 2012).

Altas temperaturas podem causar envelhecimento do ligante, degradação e emissão de vapores tóxicos, o que justifica a busca por métodos que permitam a redução dessas temperaturas (Yildirim, 2000; Azari et al., 2003; Yildirim, 2006). Entre esses métodos, destaca-se a *High Shear Rate Viscosity* (HSRV), que utiliza uma taxa de cisalhamento de 490 s^{-1} (Yildirim et al., 2000), e sua versão HSRV-E com valores ajustados de viscosidade para mistura (0,275 ± 0,03 Pa.s) e compactação (0,550 ± 0,06 Pa.s) (Yildirim et al., 2006). A metodologia *Zero Shear Rate Viscosity* (ZSRV) propõe o uso de viscosidade em cisalhamento zero, com uma versão simplificada que define 0,750 ± 0,05 Pa.s para mistura e 1,40 ± 0,10 Pa.s para compactação (Khatri et al., 2001). Já Bahia et al. (2001) propuseram *a Low Shear Rate Viscosity* (LSRV), com taxa de cisalhamento de 0,001 s^{-1}.

Diante disso, a pesquisa visa determinar as temperaturas ideais de usinagem e compactação de dois asfaltos modificados com polímero (AMP 55/75 e AMP 65/90), utilizando os métodos convencional, HSRV (original e *evolution*), ZSRV (original e simplificado) e LSRV, com o objetivo de comparar os resultados e avaliar sua aplicação em misturas asfálticas.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Foram utilizados, nesta pesquisa, dois ligantes asfálticos modificados por polímero elastomérico, denominados AMP 55/75 e AMP 65/90, ambos amplamente empregados na pavimentação de vias com tráfego pesado. A fim de caracterizar suas propriedades físicas e reológicas, foram realizados os principais ensaios laboratoriais conforme as respectivas normativas técnicas.

2.2. Métodos

Nesta pesquisa, foram realizados os principais ensaios físicos e reológicos dos materiais em estudo, no qual a observância dessas propriedades é importante para a compreensão do desempenho do ligante asfáltico quando submetido a tensões provenientes do tráfego e a tensões térmicas devido a variações da temperatura do meio ambiente (Negrão, 2006). Assim, foi adotado a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 1, sendo estudadas as características físicas e reológicas dos materiais.

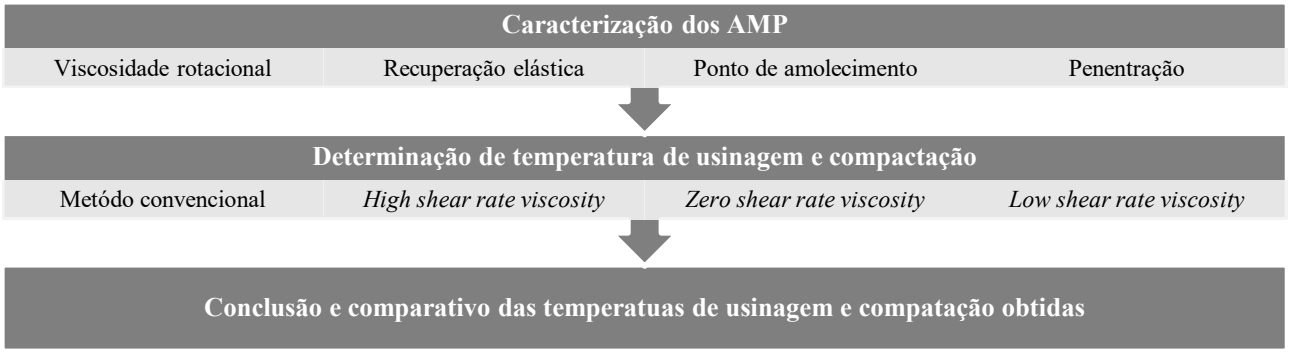


Figura 1: Fluxograma das etapas da pesquisa.

2.2.1 Caracterização dos AMP

O ensaio de penetração, conforme DNIT 155/2010 – ME, avaliou a consistência dos ligantes pela profundidade atingida por agulha padrão. O ponto de amolecimento seguiu a DNIT 131/2010 – ME, indicando a temperatura de transição para o estado líquido. A viscosidade rotacional foi determinada segundo a ABNT NBR 15184 (2005), com viscosímetro Brookfield, para análise do comportamento térmico dos ligantes. Já a recuperação elástica, pela DNIT 130/2010 – ME, avaliou a capacidade de retorno dos ligantes após deformação.

2.2.2. Determinação da temperatura de usinagem e compactação

Foram avaliadas quatro metodologias distintas para determinar as temperaturas ideais de usinagem e compactação dos ligantes, com diferentes critérios de viscosidade. A metodologia convencional, baseada na norma Superpave (ASTM D6373), estabelece temperaturas correspondentes às viscosidades Brookfield de 0,17 ± 0,02 Pa·s (usinagem) e 0,28 ± 0,03 Pa·s (compactação).

Yildirim et al. (2000) propuseram *a High Shear Rate Viscosity* (HSRV), que adota alta taxa de cisalhamento (490 s^{-1}). Na versão HSRV-E, as viscosidades de referência são 0,275 ± 0,03 Pa·s (usinagem) e 0,550 ± 0,06 Pa·s (compactação), otimizando o controle de qualidade e desempenho das misturas.

A *Zero Shear Rate Viscosity* (ZSRV), com base em Khatri et al. (2001), considera fluxo quase nulo, utilizando 0,750 ± 0,05 Pa·s (usinagem) e 1,40 ± 0,10 Pa·s (compactação).

Já a *Low Shear Rate Viscosity* (LSRV), de Bahia et al. (2001), emprega cisalhamento de 0,001 s^{-1}, sendo simplificada pelo uso do Spindle 27 a 20 rpm no Brookfield, com 6,0 ± 0,6 Pa·s (usinagem) e 3,0 ± 0,3 Pa·s (compactação), facilitando a interpretação.

Todas as metodologias foram aplicadas aos dois ligantes asfálticos, permitindo comparação e avaliação de sua adequação à pavimentação. Contudo, devido às limitações nas taxas de cisalhamento do equipamento do Viscosímetro Brookfield, taxas de cisalhamento muito altas ou muito baixas não foram possíveis de serem atingidas, mesmo com a mudança do Spindle no equipamento. Assim, a HSRV foi adaptada às temperaturas de 135, 150 e 177 ºC, com cisalhamentos de 20, 50 e 100 rpm, mantendo-se as faixas de viscosidade. A LSRV foi aplicada com 0,02 s^{-1}, menor taxa possível. Embora LSRV e ZSRV prevejam uso de duas temperaturas, adotaram-se cinco (120, 135, 150, 165 e 177 ºC) para maior confiabilidade. A Tabela 1 apresenta as metodologias utilizadas e suas adaptações.

Tabela 1: Metodologias para determinação de temperaturas de mistura e compactação (AMP) adaptadas.

Metodologia		**Convencional**	**High Shear Rate Viscosity**	**Zero Shear Rate Viscosity**	**Low Shear Rate Viscosity**
			Adaptada	Simplication	Adaptada
Temperatura (ºC)		135, 150 e 177		120, 135, 150, 165 e 177	
Taxa de cisalhamento [s-1]		-	-	6,8	0,02
Faixa de viscosidade [Pa.s]	**Usinagem**	0,17±0,02	0,275±0,03	0,750±0,05	3,0±0,3
	Compactação	0,28±0,03	0,550±0,06	1,40±0,10 ou 1,10±0,20	6,0±0,6

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização Asfalto Modificado com Polímero

Por meio dos ensaios de caracterização reológica e física pelos quais foram submetidas as amostras em estudo, obteve-se os resultados que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização dos ligantes AMP 55/75 e AMP 65/90.

Ensaio	Método	AMP 55/75		AMP 65/90	
		Especificação	Resultado do ligante	Especificação	Resultado do ligante
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	NBR 6576	45 a 70	50	45 a 70	61
Ponto de amolecimento, °C	NBR 6560	≥55	57	≥65	74
Recuperação Elástica (%)	NBR 15086	≥75	77	≥90	95
Viscosidade Rotacional a 135°C SP 21 20 rpm, cP	NBR 15184	≤3000	1179	≤3000	1623
Viscosidade Rotacional a 150°C SP 21 50 rpm, cP		≤2000	557	≤2000	660
Viscosidade Rotacional a 177°C SP 21 100 rpm, cP		≤1000	188	≤1000	235

Ao analisar os resultados da caracterização do AMP 55/75 e do AMP 65/90, é possível afirmar que os ligantes asfálticos estão em concordância com as especificações, pois atendem aos critérios do DNIT 16 095/2006.

3.2. Comparativo entre as temperaturas de Usinagem e Compactação pelas metodologias estudadas

Os gráficos dispostos nas Figuras 2 e 3 mostram os valores das temperaturas de usinagem e compactação, respectivamente, sendo dispostos o valor máximo de 180ºC estabelecido pela Especificação de Serviço 385/1999 do DNIT na linha vermelha. Além disso, os intervalos recomendados por Stratura (2020) para temperatura de usinagem são representados pelas linhas azuis para o AMP 55/75 e pelas linhas amarelas para o AMP 65/90 na Figura 2, e os valores mínimos para temperatura de compactação é representado pela linha azul para o AMP 55/75 e pela linha amarela para o AMP 65/90 na Figura 3.

A comparação entre as metodologias convencionais e as alternativas para determinar as temperaturas de usinagem e compactação dos materiais AMP 55/75 e AMP 65/90 revela diferenças nos resultados obtidos. Pelo método convencional, as temperaturas médias para usinagem e compactação do AMP 55/75 foram de 179°C e 168°C, respectivamente, enquanto o AMP 65/90 apresentou valores de 184°C e 172°C. Apesar de alguns deles estarem em conformidade com a Especificação de Serviço 385/1999 do DNIT, esses resultados divergem das recomendações da literatura, especialmente as de Stratura (2020), que sugerem valores mais baixos. Dessa forma, é possível observar que os resultados obtidos pela metodologia convencional são elevados, não sendo recomendado seu uso. Esses valores elevados são justificados pelo fato de a metodologia convencional ser idealizada para ligantes sem a modificação com polímero, no qual essa modificação aumenta o resultado da viscosidade rotacional e, consequentemente, gera valores maiores para as temperaturas de usinagem e compactação.

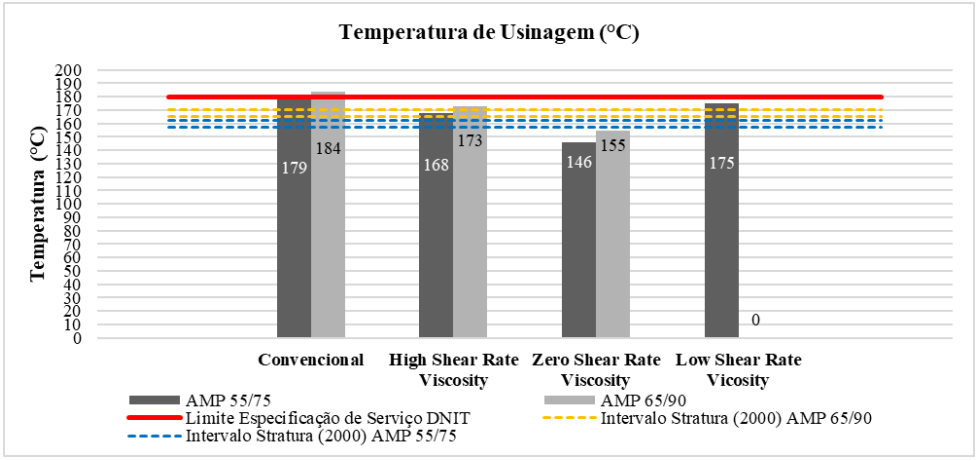


Figura 2: Comparativo entre as temperaturas de usinagem do AMP 55/75 e AMP 65/90 por diferentes metodologias.

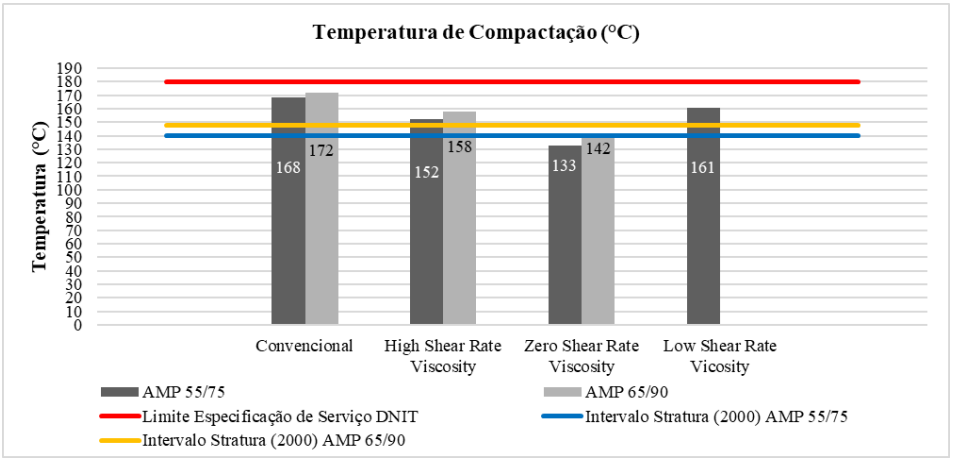


Figura 3: Comparativo entre as temperaturas de compactação do AMP 55/75 e AMP 65/90 por diferentes metodologias.

Por outro lado, as metodologias adaptadas, como a HSRV e a LSRV, apresentaram temperaturas inferiores, aproximando-se mais das recomendações literárias e normativas, tornando os resultados obtidos recomendados para uso. Esses resultados podem ser justificados pelo fato do aumento das faixas de viscosidade de ambas as metodologias, se adaptando ao comportamento do asfalto modificado com polímero que apresenta uma viscosidade rotacional mais elevada do que os ligantes asfálticos puro.

Entretanto, foi possível observar que a metodologia LSRV, mesmo adaptada, apresentou limitações durante a execução do ensaio em laboratório com o AMP 65/90, podendo-se interpretar essa limitação ocasionada pelo fato da taxa de cisalhamento baixa tem uma velocidade angular muito baixa, e, como o AMP 65/90 é um material altamente viscoso, impossibilitou a leitura dos resultados. Assim, baseado nos dados obtidos nessa pesquisa, a HSRV adaptada é a metodologia mais recomendada.

Ao utilizar a metodologia ZSRV, os valores das temperaturas de usinagem e compactação para o AMP 55/75 foram ainda menores, com médias de 146°C e 133°C, respectivamente, e comportamento semelhante foi observado para o AMP 65/90 (155° e 142° C) Essas temperaturas mais baixas podem ser justificadas pelo fato da metodologia usar uma baixa taxa de cisalhamento (resultando em viscosidade rotacional reduzida) e pela faixa de viscosidade elevada em comparação às demais metodologias, contudo, a ZSRV, na forma como foi adaptada, pode não ser apropriada. Assim, os resultados ficaram abaixo do limite máximo estabelecido pelas normativas e no mínimo recomendado pela literatura, o que pode indicar possíveis prejuízos à trabalhabilidade das misturas asfálticas.

Comparando os dois materiais estudados, o AMP 65/90 apresentou temperaturas mais elevadas em relação ao AMP 55/75 em todas as metodologias aplicadas. Contudo, ambos os materiais demonstraram que

metodologias baseadas em cisalhamento e viscosidade adaptada produzem temperaturas mais adequadas às recomendações da literatura, reduzindo os riscos de envelhecimento excessivo e degradação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ligantes asfálticos AMP 55/75 e AMP 65/90 utilizados neste estudo atendem à DNIT 16 095/2006. A análise dos resultados obtidos para as temperaturas de usinagem e compactação demonstrou que as metodologias alternativas baseadas em viscosidade e cisalhamento, como HSRV e LSRV, apresentaram valores mais próximos das recomendações da literatura, como as de Stratura (2020). Em contrapartida, embora as metodologias convencionais estejam de acordo com as normas vigentes, tendem a indicar temperaturas mais elevadas, o que pode acelerar o envelhecimento e a degradação dos materiais asfálticos. A metodologia ZSRV, por sua vez, resultou em temperaturas próximas ao limite inferior, o que pode prejudicar a trabalhabilidade das misturas. Observou-se também que o ligante AMP 65/90 exige temperaturas mais altas do que o AMP 55/75, independentemente do método adotado, reforçando a importância da escolha adequada da metodologia. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam a necessidade de equilibrar os requisitos normativos com as condições práticas de produção, levando em conta as particularidades dos ligantes modificados. A adoção de metodologias alternativas, como *High Shear Rate Viscosity* e *Low Shear Rate Viscosity*, mesmo com eventuais ajustes técnicos, mostra-se promissora para otimizar o controle de qualidade e o desempenho das misturas asfálticas, desde que estejam devidamente calibradas em relação às exigências normativas e operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM (2015) Norma ASTM D6373 - Standard Specification for Performance Gradead Asphalt Binder.

Azari, H., McCuen, R.H., and Stuart, K.D. (2003). Optimum compaction temperature for modified binders. *Journal of Transportation Engineering*, v. 129, p. 531-537. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(531)

Bahia, H.U., et al. (2001). *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).* Transportation Research Board. (1ª. ed.). Cidade: Washington. National Academy Press.

Domingos, M. D. I. *et al*. (2012) Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. *Transportes*, v. 20, n. 2, p. 15-22. DOI: https://doi.org/10.4237/transportes.v20i2.560.

Khatri, A., Bahia, H.U., and Hanson, D. (2001). Mixing and Compaction Temperatures for Modified Binders using the Superpave Gyratory Compactor. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, p. 368-402. DOI:https://www.asphalttechnology.org/site_page.cfm?pk_association_webpage_menu=9169&pk_association_webpage=19109.

Micaelo, R.; Santos, A.; Duarte, C. (2012). Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Mixtures with Modified Bitumen. EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, Istanbul. Anais [...]. Istanbul: Eurasphalt & Eurobitume.

Mothé, M. G. *Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica.* Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Stratura. Asfaltos Modificados: determinação das temperaturas de trabalho na sua obra. Disponível em: https://stratura.com.br/wp-content/uploads/2020/09/BoletimTecnico-No-05.pdf. Acesso em: 22 set. 2024

Yildirim, Y., Solaimanian, M., and Kennedy, T.W. (2000). Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete. *University of Texas, Austin*.

Yldirim, Y. Polymer (2007) Mofield Asphalt Binders. *Construction and Building Materials*, v. 21, n.1, p. 66 –72. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007

Yildirim, Y., Ideker, J., and Hazlett, P.E.D. (2006). Evaluation of Viscosity Values for Mixing and Compaction Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.18, p. 545-553. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(545)

Maria Eduarda Olinto Costa Ferreira (maria.olinto@estudante.ufcg.edu.br)
Leonardo Rodrigues Guedes (leonardo.guedes@estudante.ufcg.edu.br)
Adla Jamilly Vieira Felipe (adlajamilly18@outlook.com)
Allan Kewen Câmara de Oliveira (allankewen7@gmail.com)
Ana Maria Gonçalves Duarte (ana.duartemendonca@gmail.com)
Arthur Nóbrega de Sousa (arthur_nobregas@hotmail.com)
João Pedro Silveira Salustiano (joao.silveira@estudante.ufcg.edu.br)
Ana Letícia Feitosa de Macêdo (leticiamacedo.engcivil@gmail.com)
Universidade Federal de Campina Grande, CTRN, Engenharia Civil, Rua Aprigio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, Brasil.

ESTUDO SOBRE A VARIABILIDADE ENTRE REMESSAS DE ASFALTO-BORRACHA AB8

Gabriel Pinheiro[1], Cecilia Saraiva[1], Leidy Espinosa[1], Zila Mascarenhas[2], Gustavo Pinheiro[1], Kamilla Vasconcelos[1], Jorge Barberan[3], Luis Klinsky[3]
[1]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo; [2]Universidade Federal do Maranhão; [3]MOTIVA S.A.

RESUMO
No Brasil, o asfalto-borracha consolidou-se como um dos principais insumos na construção de rodovias, devido aos ganhos ambientais, econômicos e mecânicos que proporciona ao setor. Essa vantagem decorre da reutilização de um material de descarte de outra indústria e da potencial melhoria no desempenho do ligante asfáltico. No entanto, o processo de produção e a variabilidade inerente da matéria-prima podem resultar em heterogeneidade nas propriedades do material. Este estudo apresenta a avaliação de cinco remessas de asfalto-borracha, AB8, coletadas em usina, para verificar a possível variabilidade entre produções sucessivas. A caracterização convencional – com testes de viscosidade Brookfield, recuperação elástica, penetração e separação de fases – foi contrastada com a caracterização reológica dos ligantes, determinando o grau de desempenho, a susceptibilidade à fadiga e à deformação permanente. Os resultados indicam que, na classificação convencional, as cinco remessas correspondem a um mesmo material. Contudo, a caracterização reológica evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre elas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O asfalto modificado com borracha, mais conhecido como asfalto-borracha, é o material resultante da incorporação de pó de borracha de pneu moído – geralmente em porcentagens entre 15% e 20% – a um ligante asfáltico convencional (CAP), o que modifica significativamente as propriedades do ligante (DNIT, 2009). A modificação com borracha melhora o comportamento mecânico do CAP e confere maior durabilidade ao material (Aldagari; Kabir; Fini, 2022; Picado-Santos; Capitão; Neves, 2020; Ramarad et al., 2015; Tang et al., 2023; Xing et al., 2024).

No entanto, características da borracha, como a distribuição granulométrica e porcentagem de modificação do ligante base (Liu et al., 2009), podem afetar a resistência do asfalto modificado à deformação permanente e ao trincamento térmico e por fadiga (Liang et al., 2015; Navarro et al., 2004; Wang et al., 2012). Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a variabilidade em remessas mensais consecutivas de asfalto-borracha, provenientes de um mesmo fornecedor. Para isso, a variabilidade observada na caracterização convencional foi contrastada com a obtida por meio da caracterização reológica. Os resultados foram analisados estatisticamente para determinar se as diferenças observadas são significativas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O asfalto-borracha avaliado neste estudo foi coletado mensalmente em usina, no período de março a julho de 2024, de modo que R1 (Remessa 1) corresponde ao mês de março; R2, a abril; R3 a maio; R4 a junho, e R5 a julho. Os dados de caracterização convencional, realizados em conformidade com a especificação ANP nº 897/2022 (Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis, 2022), foram obtidos a partir do certificado do material, a proporção de borracha em cada remessa não foi informada pelo fornecedor, mas todas foram distribuídas como asfalto-borracha AB8.

A caracterização reológica foi efetuada em um reômetro de cisalhamento dinâmico modelo Discovery HR-3 da TA Instruments, seguindo a norma AASHTO M332-23 (AASHTO, 2023) para a determinação do Grau de Desempenho (PG - performance grade) e a norma ASTM D7643-22 (ASTM, 2022) para a obtenção da temperatura contínua alta de PG. O ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery Test* (MSCR), descrito na norma ASTM D7405-20 (ASTM, 2024), foi utilizado para avaliar a susceptibilidade do material à deformação permanente, na temperatura de 76°C. Para cada ensaio não convencional, foram analisadas três amostras por remessa. O envelhecimento do material foi simulado em laboratório de acordo com os procedimentos da ASTM D2872-22 (ASTM, 2012) (*Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT) para envelhecimento de curto prazo e da ASTM D6521-19a (ASTM, 2019) (*Pressure Aging Vessel* – PAV) para envelhecimento de longo prazo.

A análise estatística dos resultados da caracterização convencional baseou-se no cálculo do coeficiente de variação (COV), o qual expressa a dispersão dos dados em relação à média, representando o desvio padrão como uma porcentagem da média. Essa medida permite avaliar a homogeneidade de uma série de dados. Para os ensaios não convencionais foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de fator único, considerando

as três amostras de cada remessa. A ANOVA é um procedimento estatístico que recorre ao teste F para comparar a variabilidade entre três ou mais grupos, a fim de determinar se suas médias diferem estatisticamente. Adotou-se um nível de significância (α) de 0,05, e o valor-p foi calculado para cada ensaio, tomando como hipótese nula a ausência de diferenças significativas entre as remessas. Assim, um valor-p superior ao nível de significância implica a não rejeição da hipótese nula, indicando que as remessas podem ser consideradas equivalentes.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização convencional

A Figura 1 apresenta os resultados da caracterização convencional das 5 remessas do ligante AB8. Os limites estabelecidos pela especificação estão representados pelas linhas vermelhas tracejadas. Por questão de brevidade, são apresentados e discutidos os resultados de viscosidade Brookfield, recuperação elástica, penetração e separação de fases, mas a classificação completa mostrou que todas as remessas estavam dentro da especificação ANP nº 897/2022 (Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis, 2022) classificados com AB8.

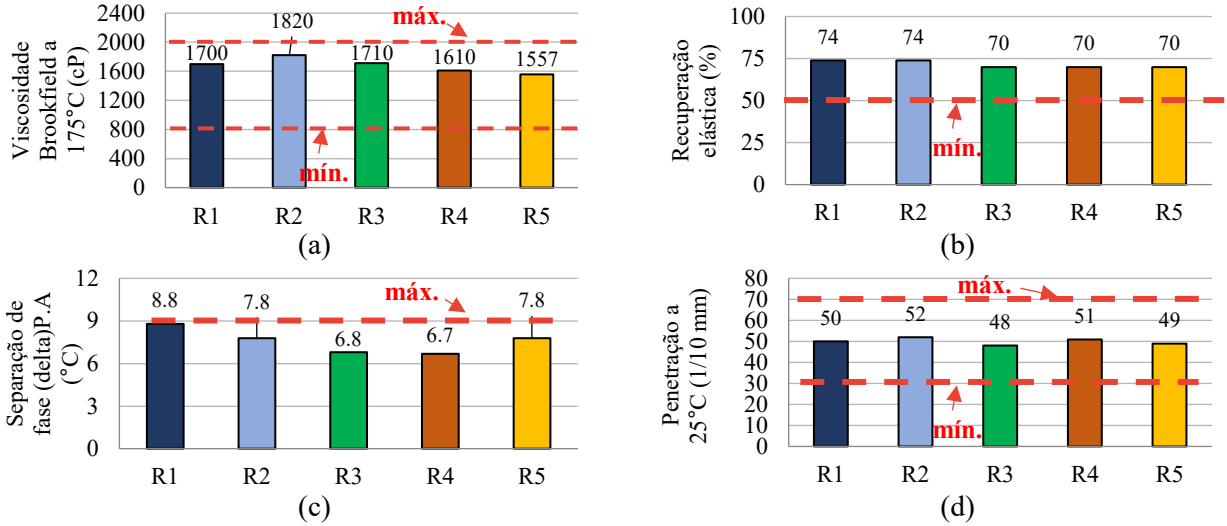


Figura 1: Caracterização convencional das 5 remessas do AB8 em termos de (a) Viscosidade Brookfield a 175°C, (b) Recuperação elástica, (c) Separação de fases, e (d) Penetração a 25°C Penetração a 25°C .

Como é possível observar na Figura 1, os ensaios convencionais já acusam uma diferença entre as remessas, mesmo todas sendo classificadas como AB8. Porém, essa variabilidade é baixa, com COV para a viscosidade (Figura 1(a)) de 6%, para a recuperação elástica (Figura 1(b)) de 3,1%, e para a penetração (Figura 1(d)) de 3,2%. A separação de fases (Figura 1(c)) apresentou o maior COV (11,4%,) quando comparado aos outros ensaios.

3.2. Caracterização reológica

A norma ASTM D7643-22 estabelece que o PG contínuo do material é a menor temperatura entre o material antes e após o envelhecimento de curto prazo, RTFOT. A Figura 2 apresenta a temperatura alta do PG contínuo para as cinco remessas estudadas, nas duas condições de envelhecimento. As barras correspondem à média de três amostras, e as linhas de erro indicam os valores máximo e mínimo obtidos. A análise dos resultados identificou uma diferença superior a 4°C entre a Remessa 1 (R1) e a Remessa 4 (R4). Considerando que se trata de remessas produzidas pelo mesmo fornecedor, sob as mesmas condições, mas coletadas com três meses de diferença, essa variação é considerada significativa. Tal diferença impacta diretamente a classificação do ligante, uma vez que a R1 atende à especificação para uso em regiões com temperatura máxima de PG de 76°C (AASHTO M332-23), enquanto as demais remessas não seriam adequadas para temperaturas superiores a 70°C.

A ANOVA, com um nível de significância de 0,05, foi aplicada aos valores de temperatura contínua alta do PG, a qual, para todas as remessas, correspondeu ao valor obtido após o envelhecimento RTFOT. O valor-p resultante para esse ensaio foi de 4,1E-07. Considerando um nível de confiança de 95%, esse valor é

significativamente inferior ao nível de significância estabelecido (α = 0,05). Portanto, rejeita-se a hipótese nula de que não há diferenças significativas entre as remessas, concluindo-se que a variabilidade observada não é aleatória.

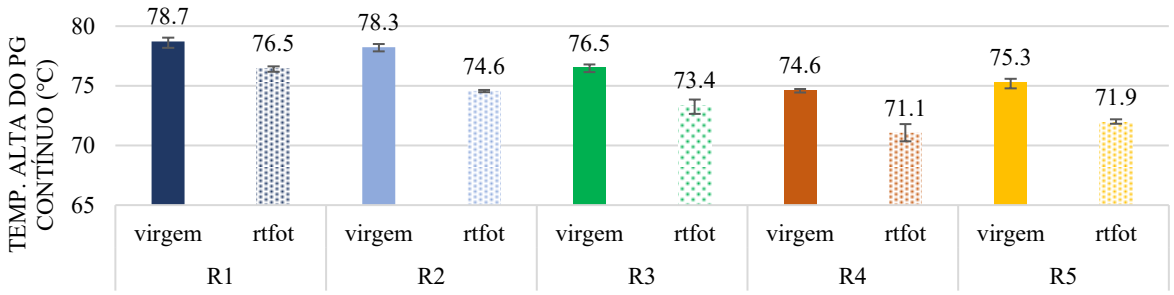


Figura 2: Temperatura alta do PG das 5 remessas do AB8.

A norma AASHTO M332-23 inclui a avaliação da susceptibilidade à deformação permanente dos materiais por meio do ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery Test* (MSCR). As cinco remessas foram ensaiadas à mesma temperatura, a fim de permitir uma comparação equitativa sob condições idênticas. A Figura 3 apresenta os valores médios da compilância não recuperável (Jnr) (Figura 3(a) e da porcentagem de recuperação (R) (Figura 3(b)), obtidos a partir de três amostras por remessa. As barras de erro indicam os valores máximo e mínimo observados para cada conjunto de medições.

O parâmetro Jnr (compilância não recuperável) refere-se à medida da deformação permanente que um material – neste caso, o asfalto-borracha (AB8) – sofre sob carga repetida e que não é recuperada após a remoção da carga. Quanto maior o valor de Jnr, maior a susceptibilidade do material à deformação permanente. Por outro lado, o parâmetro R (porcentagem de recuperação) quantifica a fração da deformação que é elasticamente recuperada após a remoção da carga. Valores mais elevados de R indicam maior elasticidade e, consequentemente, menor susceptibilidade à deformação permanente.

Como se observa na Figura 3(a), a susceptibilidade à deformação permanente variou entre as remessas, sendo a R1 a menos susceptível a esse fenômeno. Quanto à recuperação elástica (Figura 3(b)), as remessas R1 e R5 apresentaram os melhores desempenhos sob o maior nível de tensão avaliado.

O valor-p foi calculado para os dados obtidos no nível de tensão de 3,2 kPa. Para o parâmetro Jnr, o valor-p foi de 3,2E-06, e para o parâmetro R, 5,0E-07. Uma vez que ambos os valores estão significativamente abaixo do nível de significância adotado (α = 0,05), rejeita-se a hipótese nula. Portanto, com 95% de confiança, conclui-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias das remessas para ambos os parâmetros reológicos.

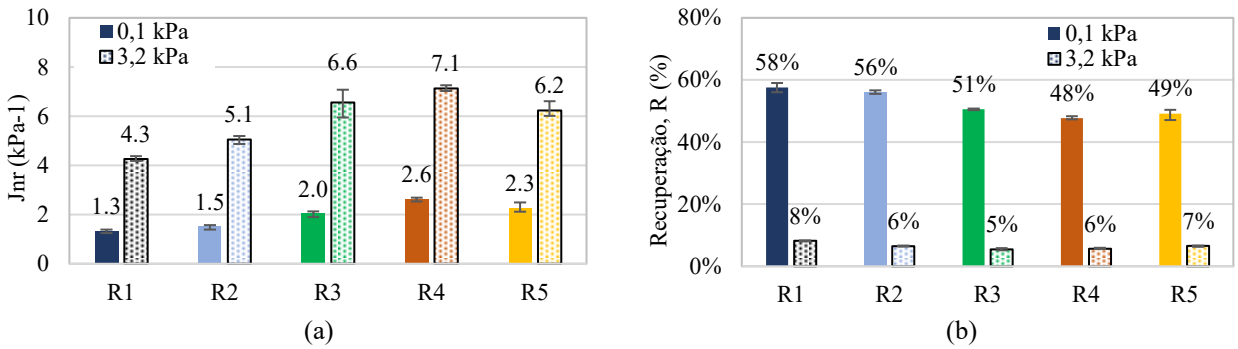


Figura 3: Resultados do ensaio MSCR para as 5 remessas do AB8 em termos de (a) Compliância não recuperável, e (b) Percentual de recuperação.

A susceptibilidade à fadiga é avaliada pela norma AASHTO M332-23 por meio do parâmetro |G*|·senδ,

determinado no material após envelhecimento de longo prazo (PAV). De acordo com a especificação, valores mais elevados deste parâmetro indicam maior susceptibilidade ao trincamento por fadiga. Neste estudo, optou-se por analisar os resultados desse parâmetro à temperatura de 25°C para todas as remessas. Os resultados são apresentados na Figura 4, na qual as barras representam o valor médio e as barras de erro correspondem aos valores máximo e mínimo de cada remessa. Os dados obtidos evidenciam uma variabilidade significativa na resposta dos materiais, indicando diferenças na susceptibilidade à fadiga entre as remessas – em particular, as remessas R1 e R3 demonstraram maior susceptibilidade em comparação às demais. O valor-p calculado para este parâmetro foi de 2,2E-05, resultado inferior ao nível de significância adotado (α = 0,05), o que confirma a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as remessas.

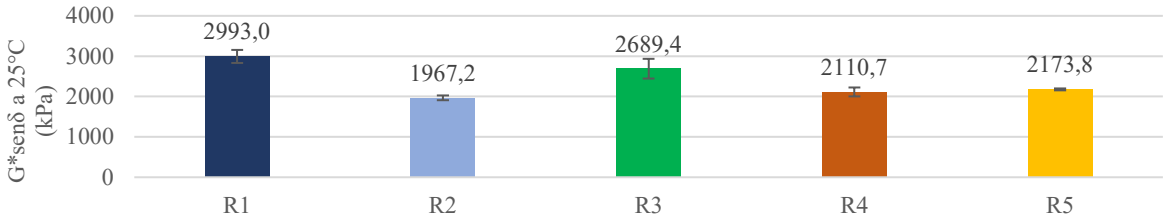


Figura 4: Parâmetro |G*|.senδ para as 5 remessas do AB8.

Além das variações intrínsecas aos ensaios realizados, as diferenças observadas entre as remessas podem estar associadas às características da matéria-prima. A borracha utilizada para a modificação do asfalto é proveniente da reciclagem de pneus descartados, o que pode resultar em variações na distribuição granulométrica e na composição química do material (Navarro et al., 2004; Wang et al., 2012; Liang et al., 2015). Adicionalmente, é possível que exista uma variabilidade inerente ao próprio ligante asfáltico base. Os fornecedores geralmente não divulgam detalhes sobre os tratamentos ou métodos de produção específicos de cada remessa, uma vez que o requisito obrigatório se resume ao atendimento dos parâmetros estabelecidos na especificação técnica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a variabilidade de asfaltos modificados por borracha, classificados como AB8, por meio da caracterização convencional prevista na especificação nacional e de ensaios de caracterização reológica. Os resultados obtidos para cinco remessas produzidas por um mesmo fornecedor e coletadas em usina indicam a existência de uma variabilidade significativa no comportamento do material, embora todas as cinco remessas se enquadrem nos requisitos da especificação e sejam classificadas como o mesmo tipo de material (AB8).

As características do ligante asfáltico base e da borracha moída utilizados na produção do asfalto-borracha exercem influência direta no comportamento reológico do produto final e, consequentemente, em seu desempenho em serviço. Entre os ensaios de caracterização convencional realizados para as cinco remessas de asfalto-borracha, o teste de separação de fase apresentou o maior coeficiente de variação (COV), superando os valores obtidos para viscosidade Brookfield, recuperação elástica e penetração – ainda que tenha se mantido em um patamar relativamente baixo. Em contrapartida, a caracterização reológica, que incluiu a determinação do Grau de Desempenho, da compliância não recuperável e da recuperação percentual, demonstrou que as diferentes remessas são estatisticamente distintas entre si.

Análises mais avançadas, como análises químicas de microscopia e térmicas, como TGA, permitiriam uma caracterização mais completa do ligante e da interação entre o asfalto e a borracha. Porém, os resultados obtidos até o fechamento deste documento ressaltam a necessidade de um maior controle de qualidade durante a produção de ligantes modificados por borracha, bem como da incorporação de critérios reológicos na fase de classificação desses materiais. Um estudo complementar envolvendo mais remessas está sendo desenvolvido a fim de aumentar a matriz experimental.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo

suporte financeiro durante a pesquisa e a concessionária Motiva S.A. pelo fornecimento do material estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **AASHTO M 332-23 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test**. , 2023. Disponível em: <https://www.stdlink.com/standards/aashto-m-332-18.html>. Acesso em: 22 jul. 2025

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RESOLUÇÃO ANP Nº 897**. , 24 nov. 2022.

ALDAGARI, Sand; KABIR, Sk Faisal; FINI, Elham H. A comparative study on efficacy of waste plastic and waste Rubber in bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 126724, mar. 2022.

ASTM. **ASTM D 2872 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) Last modification in 2021**. American Society for Testing and Materials, , 2012. Disponível em: <https://www.astm.org/d2872-21.html>. Acesso em: 19 maio. 2022

ASTM. **ASTM D6521-19a - Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. , 2019. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/astmd652119a?gclid=Cj0KCQjw_viWBhD8ARIsAH1mCd7TNCGSMCn5-nZsxKgW-wC52SwzDMrKOONCA6hyMtgPY_GTl2e2rnoaAhbKEALw_wcB>. Acesso em: 25 jul. 2022

ASTM. **Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for PG Graded Asphalt Binders**. , 2022. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/astmd764316>. Acesso em: 25 jul. 2022

ASTM. **ASTM D7405-15 Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. , 2024. Disponível em: <https://store.astm.org/d7405-15.html>. Acesso em: 4 set. 2025

DNIT. **DNIT 111/2009 - EM Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo "Terminal Blending" - Especificação de material**. , 2009.

LIANG, Ming; XIN, Xue; FAN, Weiyu; SUN, Huandong; YAO, Yan; BAODONG, Xing. Viscous properties, storage stability and their relationships with microstructure of tire scrap rubber modified asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 124–131, jan. 2015.

LIU, Shutang; CAO, Weidong; FANG, Jianguo; SHANG, Shujie. Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2701–2708, jul. 2009.

NAVARRO, F. J.; PARTAL, P.; MARTÍNEZ-BOZA, F.; GALLEGOS, C. Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. **Fuel**, v. 83, n. 14–15, p. 2041–2049, out. 2004.

PICADO-SANTOS, Luis G.; CAPITÃO, Silvino D.; NEVES, Jose M. C. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118577, jun. 2020.

RAMARAD, S.; KHALID, M.; RATNAM, C.T.; CHUAH, A.; RASHMI, W. Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. **Progress in Materials Science**, v. 72, p. 100–140, jul. 2015.

TANG, Yunchao; WANG, Yufei; WU, Dongxiao; CHEN, Mengcheng; PANG, Lan; SUN, Junbo; FENG, Wanhui; WANG, Xiangyu. Exploring temperature-resilient recycled aggregate concrete with waste rubber: An experimental and multi-objective optimization analysis. **REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE**, v. 62, n. 1, p. 20230347, 8 ago. 2023.

WANG, Hainian; YOU, Zhanping; MILLS-BEALE, Julian; HAO, Peiwen. Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 583–590, jan. 2012.

XING, Chao, ZHENG, Guiping; YU, Chao; ZHANG, Lei; SHAN, Mingyu; TAN, Yiqiu. Phase-change pavement structures with gradient low-thermal conductivity for permafrost protection. **Construction and Building Materials**, v. 438, p. 137168, ago. 2024.

Gabriel Pinheiro[1] (gabriel.gpinheiro@usp.br), *Cecilia Saraiva*[1] (ceciliasdal@usp.br), *Leidy Espinosa*[1] (leidyespinosa@usp.br), *Zila Mascarenhas*[2] (zila.mascarenhas@ufma.br), *Gustavo Pinheiro*[1] (gustavopnhr@usp.br), *Kamilla Vasconcelos*[1] (kamilla.vasconcelos@usp.br), *Jorge Barberan*[3] (jorge.barberan@motiva.com.br), *Luis Klinsky*[3] (luis.klinsky@motiva.com.br)

[1]Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Professor Almeida Prado, Travessa do Biênio, 83 Butantã, São Paulo – SP, Brasil

[2]Universidade Federal do Maranhão. Av. dos Portugueses, s/nº, Campus do Bacanga, São Luís – MA, Brasil.

[3]MOTIVA S.A. Rod. Pres. Dutra, km 184,3 Sentido SP/RJ - Morro Grande, Santa Isabel - SP

INFLUÊNCIA DE ÓLEOS VEGETAIS COMO REDUTORES DE VISCOSIDADE EM LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM BORRACHA DE PNEUS

Priscila Reis[1], **Ricardo Oliveira de Souza**[1], **Edna Possan**[1], **Daniela Kunz**[2]
[1]Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, [2]Faculdade Uniguaçu

RESUMO
Este estudo avaliou o uso de óleos vegetais como redutores de viscosidade em ligantes asfálticos 50/70 (grau de penetração) modificados com 21% de borracha moída de pneus inservíveis. Produziram-se amostras com teores de 10%, 15% e 20% de óleo de soja, nas condições nova e residual, avaliadas por meio do ensaio de viscosidade rotacional, cisalhamento dinâmico e flexão em viga. Os resultados mostraram que a adição de óleo reduziu a viscosidade em até 80%, possibilitando enquadramento dentro da faixa exigida para o asfalto-borracha AB8. No entanto, observou-se queda no desempenho em altas temperaturas, com a formulação contendo 10% de óleo atendendo ao requisito |G*|/seno(δ) até aproximadamente 70 °C, enquanto teores mais elevados apresentaram desempenho inferior. Em baixas temperaturas, foram necessárias condições extremas para que os limites fossem atendidos. Não houve diferenças significativas entre condições do óleo, o que corrobora a viabilidade da aplicação em larga escala e a flexibilidade de fornecimento.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a degradação ambiental tem impulsionado a busca por soluções mais sustentáveis em diversos setores produtivos. A emissão de gases de efeito estufa, o consumo intensivo de energia e o acúmulo de resíduos sólidos são fatores críticos que exigem ações integradas e inovadoras, especialmente em cadeias produtivas de grande escala. Nesse contexto, a construção civil destaca-se como uma das atividades que mais consome recursos naturais e gera impactos ambientais, sendo responsável por significativa parcela das emissões globais de CO_2 e pela geração de elevados volumes de resíduos, tanto em suas fases construtivas quanto operacionais (Shajidha e Mortula, 2025; Soto-Paz *et al*., 2023).

No âmbito da infraestrutura viária, a pavimentação asfáltica representa uma das principais frentes de consumo energético e emissão de poluentes atmosféricos, especialmente durante as etapas de produção e aplicação dos ligantes betuminosos. A necessidade de aquecimento elevado dos materiais asfálticos resulta em expressivo consumo de combustíveis fósseis, emissão de compostos orgânicos voláteis, partículas em suspensão e outros subprodutos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente (Avila *et al*., 2021).

Nesse cenário, a incorporação de resíduos na formulação de ligantes asfálticos tem se destacado como uma estratégia promissora para mitigar impactos ambientais e ampliar a eficiência dos recursos. A borracha de pneus inservíveis, por exemplo, tem sido amplamente estudada como modificador de ligantes, promovendo ganhos em desempenho mecânico e durabilidade, ao mesmo tempo em que contribui para a destinação adequada de um passivo ambiental de difícil degradação (Li *et al*., 2025; Bressi *et al*., 2019). Contudo, a utilização de borracha moída está associada a um aumento substancial da viscosidade do ligante, o que eleva a temperatura de aplicação e, consequentemente, os impactos ambientais (Xie *et al*., 2023).

Como alternativa, a adição de óleos vegetais tem sido investigada como redutor de viscosidade em ligantes asfálticos modificados com polímeros. Além de serem produtos de base renovável, apresentam potencial para reduzir a temperatura de fabricação e aplicação, contribuindo para redução das emissões e do consumo energético, contudo, elevada dosagem de óleo pode resultar em queda de desempenho (Langa *et al*., 2023). A combinação de borracha e óleos associa a elasticidade dos polímeros ao efeito plastificante dos óleos, resultando em ligantes com melhor comportamento (Zhao *et al*., 2023). Diante do exposto na literatura, estudos indicam que a dosagem é o fator crítico no uso de óleos em ligantes asfálticos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso de altas dosagens de óleos vegetais, novos e residuais, como redutores de viscosidade em ligantes de elevada viscosidade rotacional, bem como aprofundar a compreensão comparativa da influência do estado do óleo (novo ou residual) sobre o comportamento dos ligantes modificados por meio de ensaios reológicos e de envelhecimento, de modo a definir a faixa de uso compatível com desempenho.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Nesta pesquisa, foi utilizada borracha moída proveniente da trituração de pneus descartados, realizada à temperatura ambiente. As partículas apresentavam diâmetro médio de 0,42 mm. O ligante asfáltico empregado foi o CAP 50/70 (grau de penetração), cujos parâmetros de caracterização encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70)

Ensaio	Resultado	Ensaio	Resultado
Penetração	52×10^{-1} mm	Ponto de fulgor	280 °C
Ponto de amolecimento	46 °C	Variação em massa	0,13 %
Ponto de amolecimento pós RTFOT	51 °C	Viscosidade Rotacional 135 °C 150 °C 177 °C	 364,33 cP 191,33 cP 83,88 cP

Foi utilizado óleo vegetal de soja, nas condições nova e residual. O óleo novo apresentou viscosidade rotacional de 42 cP e ponto de fulgor de 240 °C, enquanto o óleo residual, obtido após uso culinário, apresentou viscosidade de 44 cP e ponto de fulgor de 255 °C. O óleo residual foi coletado em um restaurante localizado na região do estudo. Para este trabalho, considerou-se como "residual" o óleo submetido a, no mínimo, cinco ciclos completos de fritura. Após a coleta, o material passou por um processo de filtração para remoção de partículas sólidas, a fim de garantir maior homogeneidade e reprodutibilidade nas análises subsequentes.

2.2. Métodos

A produção do asfalto-borracha com 21% de borracha moída seguiu o procedimento descrito por Guimarães (2019). Inicialmente, a borracha foi incorporada ao CAP aquecido a 180 °C por 15 minutos, com agitação a 500 rpm. Em seguida, diferentes tipos e condições de óleo foram adicionados separadamente, em proporções de 10%, 15% e 20%, mantendo-se a temperatura de 180 °C por mais 30 minutos, com rotação de 1200 rpm. As amostras obtidas foram submetidas a ensaios convencionais e reológicos nas condições não envelhecidas, envelhecidas em curto prazo (RTFOT) (AASHTO T 240) e envelhecidas em longo prazo (PAV) (AASHTO R 28).

2.2.1. Viscosidade rotacional

Com o objetivo de analisar a capacidade de escoamento do ligante asfáltico e sua adequação às operações de mistura e aplicação em campo, foram realizadas medições de viscosidade utilizando o viscosímetro rotacional Brookfield (modelo LVDV-E), equipado com a haste SC4-27. O procedimento adotado seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 15529.

2.2.2. Ensaio de cisalhamento dinâmico (DSR)

O ensaio foi realizado conforme a norma AASHTO T 315, utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico com placas de 25 mm de diâmetro e folga de 1 mm entre as placas. Considerando a frequência de 1,59 Hz, determinou-se a razão $|G|/\operatorname{sen}\delta$ em diferentes temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente.

2.2.3. Ensaio de flexão em vigas (BBR)

A resistência à deformação por flexão em baixas temperaturas foi avaliada conforme a norma AASHTO T 313, por meio de reômetro de feixe de flexão com resfriamento termoelétrico. As amostras foram submetidas à aplicação de carga constante no centro de vigas com apoio duplo. O ensaio forneceu os valores de rigidez e módulo de relaxação (m-valor), conforme os critérios do método Superpave.

3. RESULTADOS

A viscosidade rotacional dos ligantes modificados determinada a 180 °C mostrou que a formulação contendo 21% de borracha moída, sem adição de óleo, apresentou resultado de aproximadamente 4300 cP, excedendo o limite superior definido pela Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) nº 897/2022 para o CAP AB22 (2200–4000 cP). A incorporação de óleo de soja, tanto novo quanto residual, promoveu redução significativa da viscosidade. Com a adição de 10%, 15% e 20%, as reduções foram de aproximadamente 62%, 74% e 79%, respectivamente. Todas as amostras ficaram dentro da faixa estabelecida para o CAP AB8 (800–2000 cP) (Figura 1). Observou-se uma pequena diferença entre os óleos novos e residuais, no entanto, ambos apresentaram comportamento semelhante quanto à eficiência na redução da viscosidade.

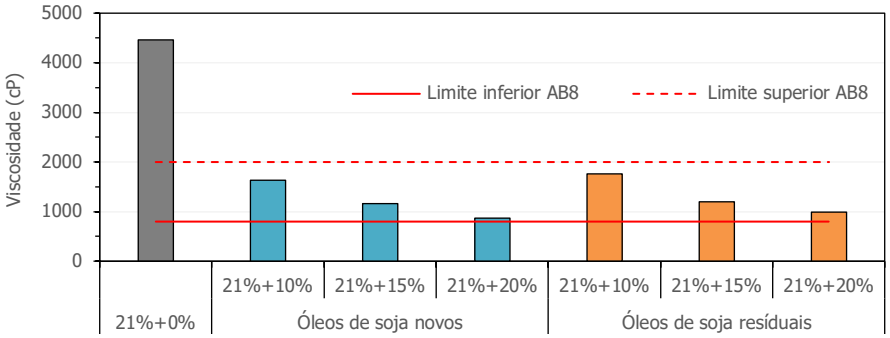
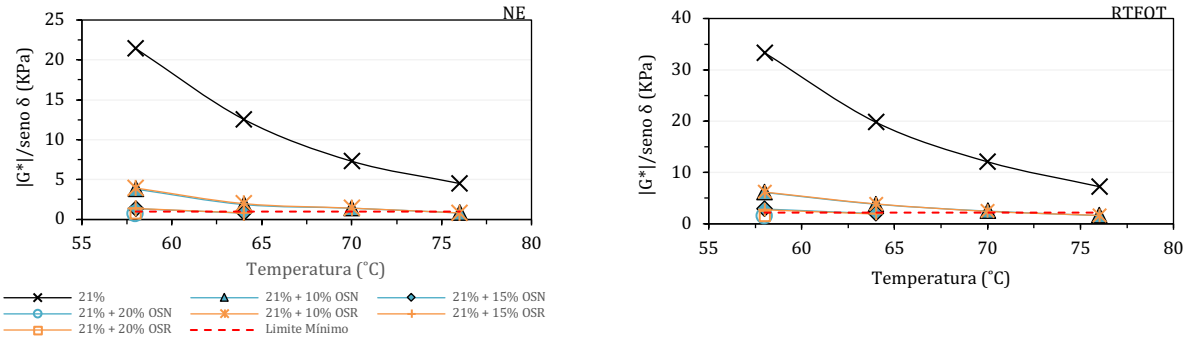


Figura 1: Viscosidade rotacional aos 180 ˚C dos CAPs modificados

O comportamento viscoelástico dos ligantes foi avaliado por meio do ensaio de cisalhamento dinâmico, com determinação do parâmetro |G*|/sen(δ), conforme preconizado pelo método Superpave. Os resultados obtidos para as amostras não envelhecidas (NE) indicaram que o CAP 50/70 virgem atendeu ao critério mínimo de |G*|/sen(δ) > 1,00 kPa até a temperatura de 64 °C. A modificação com 21% de borracha moída promoveu um aumento significativo na resistência à deformação permanente, mantendo desempenho satisfatório até 100 °C. A adição de óleo vegetal resultou em redução progressiva dessa resistência, proporcional ao teor de óleo e à elevação da temperatura. Ainda assim, a formulação com 10% de óleo vegetal atendeu ao limite mínimo próximo a 70 °C, demonstrando desempenho superior ao do ligante convencional. Para o teor de 15%, o valor mínimo foi atendido apenas até aproximadamente 64 °C, enquanto as amostras com 20% de óleo atingiram o critério mínimo antes dos 58 °C (Figura 2).



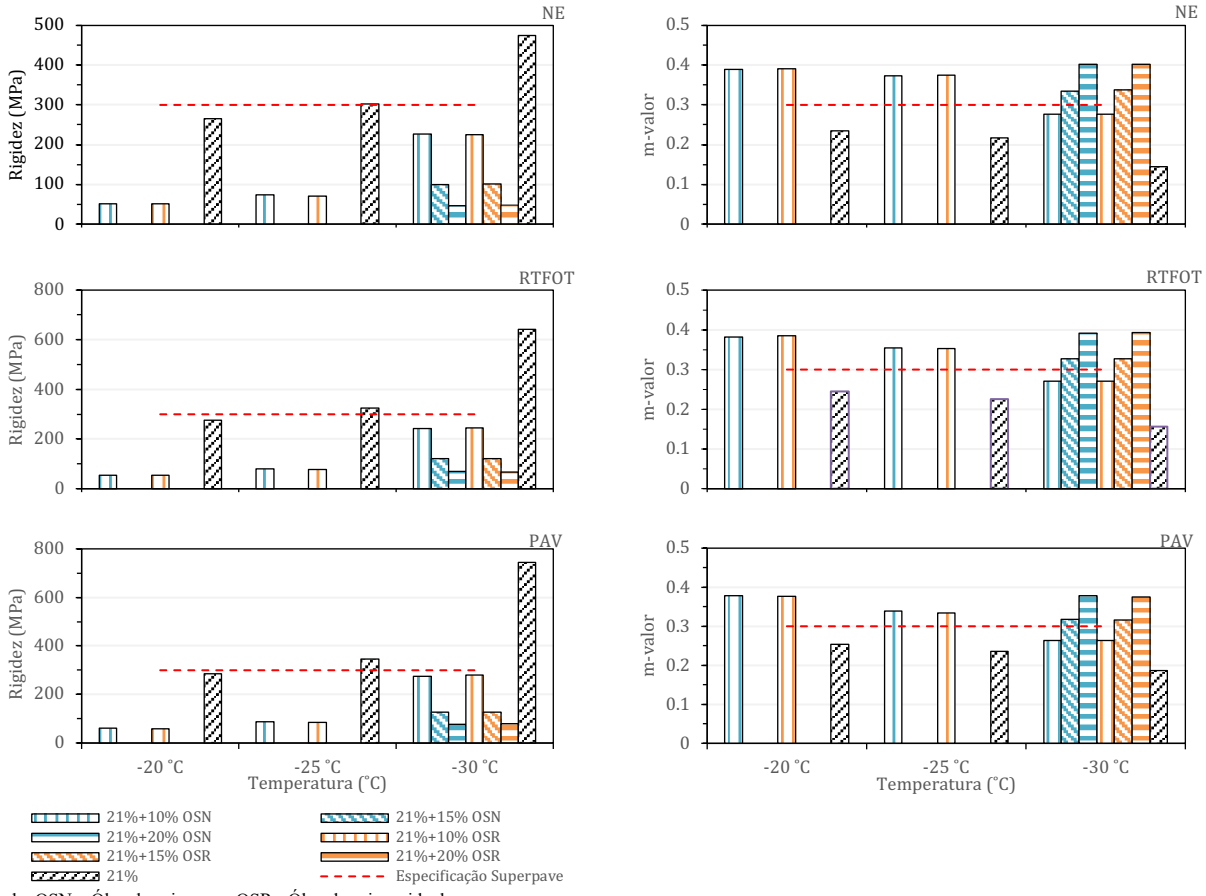
Legenda: OSN – Óleo de soja novo; OSR - Óleo de soja residual

Figura 2: Valores de |G*|/seno (δ) dos CAPs modificados

Nas amostras envelhecidas em curto prazo (RTFOT), todas as amostras ficaram mais rígidas, mantendo a mesma ordem observada no estado não envelhecido, sendo o critério de aceitação elevado para |G*|/sen(δ) > 2,20 kPa. Além disso, as formulações contendo óleo vegetal apresentaram menor variação nos valores de |G*|/sen(δ), sugerindo que o aditivo contribui para a estabilização das propriedades viscoelásticas do ligante base durante o envelhecimento. Não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os óleos vegetais novos e residuais, indicando que ambos os tipos de óleo exerceram efeitos semelhantes sobre as propriedades viscoelásticas avaliadas. Para avaliar o comportamento do material em baixas temperaturas, o ensaio de flexão em viga foi realizado a -20 °C, -25 °C e -30 °C, uma vez que a viscosidade das amostras com óleo vegetal impossibilitou a condução dos testes em temperaturas inferiores. O CAP 50/70 virgem excedeu o limite de rigidez do Superpave (<300 MPa) em todas as condições e temperaturas, com módulo de relaxação (m-value) também inferior ao mínimo exigido (>0,30), evidenciando sua baixa resistência ao trincamento térmico.

A adição de 21% de borracha moída permitiu atendimento ao critério de rigidez apenas a -20 °C. Com a introdução de 10% de óleo de soja, observou-se redução de até 80,6% na rigidez em relação à formulação sem óleo, com desempenho adequado (rigidez < 300 MPa) em todas as temperaturas. Teores de 15% e 20% só puderam ser avaliados a -30 °C, apresentando rigidez compatível com a norma. Quanto ao m-valor, o teor de 10% atendeu ao critério a -20 °C e -25 °C, enquanto os teores superiores de óleo atenderam ao critério apenas a -30 °C. O envelhecimento, tanto de curto quanto de longo prazo, intensificou esse comportamento,

aumentando a rigidez e reduzindo a capacidade de relaxação (Figura 3). Para a maioria das amostras avaliadas, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os óleos novos e residuais.



Legenda: OSN – Óleo de soja novo; OSR - Óleo de soja residual

Figura 3: Valores de Rigidez e m-valor dos CAPs modificados

Estudos têm relatado resultados consistentes com os observados neste trabalho. Langa *et al*., (2023) identificaram uma redução significativa da viscosidade em ligantes CAP 50/70 modificados com polietileno de alta densidade e óleos vegetais. Da mesma forma, Gao *et al*., (2018) modificaram um ligante 40/60 com 1% de polímero SBS e diferentes teores de bio-óleo (10%, 15% e 20%), observando que, embora o polímero tenha aumentado a resistência do material, a adição do óleo comprometeu esse desempenho, ou seja, o polímero elevou |G|*/seno (δ) (maior fração elástica e melhor resistência a trilha), enquanto os óleos atuam como plastificantes, reduzindo esse parâmetro e exigindo dosagens moderadas para evitar perdas em alta temperatura. Já Zhao *et al*., (2023) constataram que a adição de 6% de óleo de cozinha residual e 4% de SBS a um ligante base 70 resultou em melhora significativa da resistência ao trincamento em baixas temperaturas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de óleos vegetais em ligantes asfálticos modificados com borracha moída reduziu significativamente a viscosidade rotacional, sendo esse efeito mais acentuado com o aumento do teor de óleo, o que pode favorecer a redução das temperaturas de usinagem. No entanto, comprometeu a resistência à deformação permanente em altas temperaturas e exigiu temperaturas muito baixas para atendimento dos critérios de rigidez e m-valor. O melhor desempenho foi observado para 10%, enquanto teores de 15% e 20% apresentaram desempenho técnico inferior, o que levanta questionamentos sobre a viabilidade de incorporar grandes quantidades desses materiais. Do ponto de vista prático, a utilização desse tipo de aditivo em escala industrial demanda atenção à disponibilidade de matéria-prima em grandes volumes, bem como à variabilidade das propriedades dos óleos e aos custos de coleta, filtração e padronização. Como os resultados não apontaram diferenças significativas entre os óleos novo e residual, a escolha entre eles pode ser orientada pela disponibilidade local (na ausência de óleo residual, o óleo novo mostra-se alternativa tecnicamente viável). Como recomendação para estudos futuros, sugere-se a realização de ensaios de recuperação por fluência (MSCR), análises térmicas e químicas,

bem como avaliações de ciclo de vida e econômicas, de modo a aprofundar o entendimento sobre os efeitos da adição de óleo vegetal e responder a questões relacionadas a custo, disponibilidade e ao impacto ambiental.

Agradecimentos
Os autores expressam sua gratidão ao Programa de Bolsa Institucional da UNILA (PROBIU) pelo suporte financeiro disponibilizado, o qual foi essencial para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2012) Norma AASHTO R 28: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officals.

AASHTO (2019) Norma AASHTO T 315-19: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officals.

AASHTO (2019) Norma AASHTO T 313-19: Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officals.

AASHTO (2019) Norma AASHTO T 240-13: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officals.

ABNT (2007) ABNT NBR 15529: Asfalto borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Avila, M. Giovani; S. Oda; F. Guerrero; P. F. Carrasco. (2021) Sustainable Practices in Asphalt Pavements and their Possible Applications in the Brazilian Market, *International Journal of Development Research*, v.11, n. 02, p. 44850-44855. DOI: https://doi.org/10.37118/ijdr.21245.02.2021.

Brasil, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2022) Resolução nº 897, de 18 de novembro de 2022. Estabelece as especificações para os ligantes asfálticos no Brasil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-897-de-18-de-novembro-de-2022-445759308. Acesso em: 10/06/2025.

Bressi, S. *et al*. (2019) Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: State of the art and statistics. *Coatings*, v. 9, n. 6. DOI: https://doi.org/10.3390/coatings9060384.

Gao, J. *et al*. (2018) Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test. Construction and Building Materials, v. 160, p. 786–793. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.048.

Guimarães, M. E. (2019) *Efeito da adição de resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico 50/70.* Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Foz do Iguaçu-PR. Disponível em: https://dspace.unila.edu.br/items/b1e074c4-5f79-4f9c-8635-86f03eb02dc5. Acesso em: 03/06/2025.

Langa, E. *et al*. (2023) Effect of Vegetable Oil on the Properties of Asphalt Binder Modified with High Density Polyethylene. *Polymers*, v. 15, n. 3, Article number 749. DOI: 10.3390/polym15030749.

Li, J. *et al*. (2025) Performance assessment of micro-nano tire rubber and SBS composite-modified asphalt based on the combination weighting and TOPSIS method. *Construction and Building Materials*, v. 471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140592.

Shajidha, Hafsa e Md M. Mortula. (2025) Sustainable waste management in the construction industry. *Frontiers in Sustainable Cities*, v. 7, n. 2025. DOI=10.3389/frsc.2025.1582239.

Soto-Paz, J.; O. Arroyo; L. E. Torres-Guevara; B. A. Parra-Orobio e M. Casallas-Ojeda. (2023) The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *Journal of Building Engineering*, v. 78, n. 107724. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107724.

Xie, J. *et al*. (2023) Harmful emissions of rubber asphalt at high temperatures: A review. *Materials Express*, v. 13, n. 2, p. 206–221. DOI: 10.1166/mex.2023.2350.

Zhao, X. *et al*. (2023) Effect of Sasobit/Waste Cooking Oil Composite on the Physical, Rheological, and Aging Properties of Styrene–Butadiene Rubber (SBR)-Modified Bitumen Binders. Materials, v. 16, n. 23, e7368. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16237368.

Priscila Reis (priiscilareis@hotmail.com)
Ricardo Oliveira de Souza (ricardo.souza@unila.edu.br)
Edna Possan (epossan@gmail.com)
Universidade Federal da Integração Latino-Americana - UNILA, Avenida Tancredo Neves, 6731, Unidade Itaipu Parquetec, Foz do Iguaçu, PR – Brasil
Daniela Kunz (dani-kunz@hotmail.com)
Faculdade Uniguaçu, Rua Valentin Celeste Palavro, 707, Jardim Bela Vista, São Miguel do Iguaçu, PR - Brasil

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO LINEAR VISCOELÁSTICO E DE PERFORMANCE À FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE LIGANTE MODIFICADO COM FIBRA DE AÇO

Maiara Heinrich, Junior Fragoso Cousseau, Lorenzo Chaves Pacheco, Tuani Zat, Silvio Lisboa Schuster, Luciano Pivoto Specht, Deividi da Silva Pereira
Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Este estudo investiga o efeito da adição de fibras de aço em ligante asfáltico 50/70, visando futura aplicação em misturas capazes de regeneração por indução eletromagnética. Foram avaliados os teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 25% em massa do ligante quanto ao desempenho reológico por meio dos ensaios HPG, MSCR e LAS. Os resultados mostraram que a adição de fibras teve impacto limitado na temperatura de performance (HPG) e na resistência à deformação permanente (Jnr), com melhora significativa em 25%. Por outro lado, observou-se ganho de resistência à fadiga (FFL) até o teor de 6%, com redução em teores superiores. A modificação com fibras de aço não comprometeu o desempenho do ligante, sendo viável para continuidade da pesquisa em misturas asfálticas. O teor de 6% foi considerado o mais eficiente, equilibrando desempenho mecânico e viabilidade prática.

1. INTRODUÇÃO

O trincamento por fadiga e as deformações permanentes em trilha de rodas são dois dos principais defeitos encontrados nas rodovias brasileiras (Fontes *et al*., 2008). Tais degradações podem ser diretamente associadas a estrutura do pavimento, a mistura asfáltica e ao tráfego atuante, além da influência das condições climáticas (Boeira *et al*., 2018).

Apesar da ocorrência de trincamento por fadiga ser visualmente percebida, o concreto asfáltico é um material com a capacidade de regeneração do dano por fadiga quando submetido a condições específicas dependentes, principalmente, da temperatura (Sun *et al.*, 2017). Ou seja, a mistura asfáltica pode ser considerada um material com características de regeneração, no sentido de que quando um pavimento fissurado é submetido a temperaturas elevadas e períodos de descanso, o ligante asfáltico pode fluir pelas microfissuras, de maneira a preenche-las levando a "cicatrização" e ao aumento da integridade do material (Norambuena-Contreras, J.; Garcia, A. 2016; Gallego *et al.*, 2013; García, A. 2012; García *et al.*, 2013; Aragão, L. C., *et al.* 2020). À vista disso, a indução eletromagnética é uma possibilidade técnica para viabilizar o aquecimento do pavimento asfáltico, com o intuito de fomentar o processo de regeneração. Para isso há a necessidade de incorporar à mistura aditivos metálicos que atuam no aumento da condutividade térmica do pavimento, de forma a torna-lo mais suscetível à indução eletromagnética, e com isso gerando um aquecimento com maior eficiência ao que tange o uso de energia (Gallego *et al.*, 2013). Por fim, Norambuena-Contreras, J.; Gutierrez Aguilar, V.; Gonzalez-Torre, I. (2015) corroboram a tese acerca do uso de fibras metálicas em materiais compósitos, a fim de aumentar as taxas de aquecimento do material.

O estudo apresentado neste trabalho é parte de uma pesquisa maior em desenvolvimento, que busca aplicar protocolos de healing em misturas asfálticas com indução eletromagnética e partículas metálicas dentro dos corpos de prova. Diante disso, como objetivo deste trabalho, busca-se caracterizar em um primeiro momento o comportamento reológico dos ligantes asfálticos modificados com inserção de fibras metálicas por testes avançados de caracterização do domínio linear viscoelásticos, da resistência à fadiga e da resistência à deformação permanente, verificando se as alterações observadas não inviabilizam a modificação por fibras de aço já nesta primeira fase e determinando um teor "ótimo" de adição que leve ao melhor desempenho em geral do ligante.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

O material utilizado como base para esse estudo consiste no ligante 50/70 modificado com diferentes teores de fibras de aço. Os teores foram estabelecidos como 2, 4, 6, 8 da massa total do ligante, e posteriormente um teor de 25% foi investigado na tentativa de observar maiores variações no comportamento reológico, embora ressalta-se que teores tão elevados como esse possivelmente não sejam praticáveis no processo de usinagem de uma possível mistura.

A lã de aço comercial do tipo ML-366 é fornecida pela empresa BOMBRIL. Sua caracterização física foi realizada por meio de análises em microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figura 1), com ampliação de 400×, e microscopia óptica, com ampliações de 10× e 50×. A microscopia óptica, aliada à análise de imagem

realizada por meio do software ImageJ, permitiu a medição de pelo menos 50 partículas de fibra. Os resultados indicaram um diâmetro médio de 86 µm e comprimento médio de 1376 µm, resultando em uma razão de aspecto de 16,00. A densidade aparente foi determinada em 7700 kg/m³, enquanto a massa específica foi de 7487,8 kg/m³.

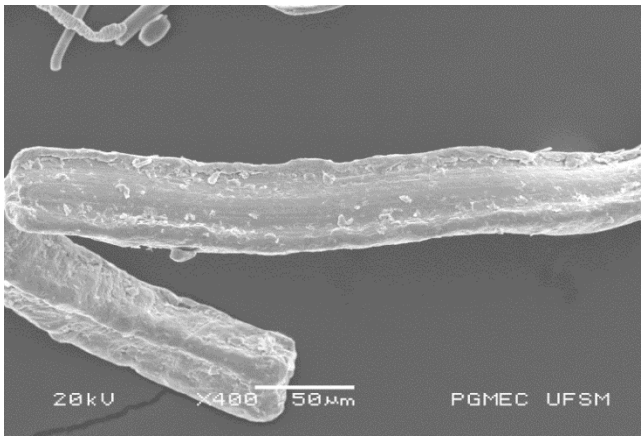


Figura 1: Caracterização física da lã de aço

2.2. *Performance Grade* de alta temperatura (HPG)

O ensaio *High Performance Grade* – HPG seguiu o procedimento descrito na norma AASHTO M320, de forma a constatar a máxima temperatura resistida pelos ligantes em campo a fim de conservar um grau de desempenho admissível frente à deformação permanente de trilha de roda durante a vida útil do pavimento asfáltico. O teste foi realizado em reômetro de cisalhamento dinâmico considerando duas amostras válidas para o ligante virgem e duas amostras válidas para o ligante modificado com cada teor de fibra de aço estudado. A máxima temperatura que o ligante asfáltico suporta sem que manifeste tendencia à deformação permanente, chamada de Performance Grade de alta temperatura, é a temperatura média máxima de projeto do pavimento em 7 dias consecutivos. O HPG corresponde a menor temperatura em que o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\,\delta \geq 1$ kPa na condição virgem.

2.3. Resistência à deformação permanente a partir do *Mutiple Stress Creep and Recovery* (MSCR)

O teste de MSCR foi realizado em reômetro de cisalhamento dinâmico, seguindo o procedimento descrito na norma AASHTO T350. O indicador Jnr foi obtido do ensaio e é aplicado, de acordo com AASHTO M332, para a classificação do nível de tráfego suportado pelo ligante. O ensaio foi realizado considerando duas amostras válidas para o ligante virgem e duas amostras válidas para o ligante modificado com cada teor de fibra de aço estudado. O teste foi conduzido na temperatura fixa de 64°C.

2.4. Resistência a fadiga a partir do Linear Amplitude Sweep Test (LAS)

O ensaio *Linear Amplitude Sweep Test* – LAS seguiu o procedimento descrito na norma AASHTO T391, e posteriormente obteve-se o parâmetro FFL, isto é, fator de fadiga do ligante e, com base nisso, classificou-se o ligante em relação a sua resistência ao trincamento por fadiga. O teste foi realizado em reômetro de cisalhamento dinâmico considerando duas amostras válidas para o ligante virgem e duas amostras válidas para o ligante modificado com cada teor de fibra de aço estudado.

A área abaixo das curvas de fadiga, obtidas pelo ensaio de LAS, e tratadas a partir do modelo VECD, para uma definição de falha baseada no pico da pseudo-energia liberada (MaxPSE) (Nascimento 2015), entre às deformações de 1,25 a 5,00%, fornece o FFL, sendo que quanto maior esse valor, maior a vida de fadiga do material. Possebon (2021) define intervalos para a classificação dos ligantes quanto à fadiga, segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de ligantes pelo FFL19°C

Classes	FFL19°C
1 - Pobre	FFL < 1,22
2 – Inferior	1,22 < FFL < 1,31
3 - Mediano	1,31 < FFL < 1,48

4 - Superior	1,48 < FFL < 1,57
5 - Excelente	FFL > 1,57

3. RESULTADOS

3.1. Performance Grade de alta temperatura

Os resultados de HPG do ligante 50/70 modificado com os respectivos teores de fibra de aço estão apresentados na Figura 2.

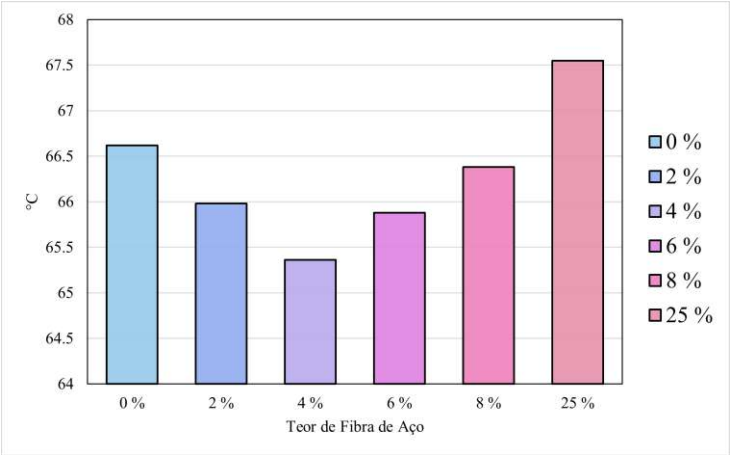


Figura 2: Resultados de HPG

O ligante estudado apresentou HPG médio de 66,62°C na condição virgem, 65,98°C para o teor de 2%, 65,36°C para o teor de 4%, 65,88°C para o teor de 6%, 66,38°C para o teor de 8% e 67,55°C para o teor de 25%. Foi possível verificar que os valores de HPG diminuem até o teor de 4% de adição de fibra, demonstrando posterior acréscimo para os teores mais elevados. O teor de 25% levou a um aumento mais expressivo devido a grande quantidade de fibras, entretanto, o impacto nos valores de HPG foram considerados pequenos, dado que todos os teores modificados mantiveram a mesma classe de HPG que o ligante virgem, sendo está de 64°C. Sugere-se assim que não há perda nem ganho expressivo de desempenho atribuído ao parâmetro HPG a partir do uso de fibra de aço.

3.3. Resistência à deformação permanente a partir do Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

A resistência à deformação permanente do ligante em seus diferentes estados de modificação foi avaliada a partir da análise do parâmetro Jnr (Figura 3). O ligante investigado apresentou Jnr médio de 8,46 na condição virgem, 9,10 para o teor de 2%, 9,20 para o teor de 4%, 8,93 para o teor de 6%, 8,92 para o teor de 8% e 6,02 para o teor de 25%.

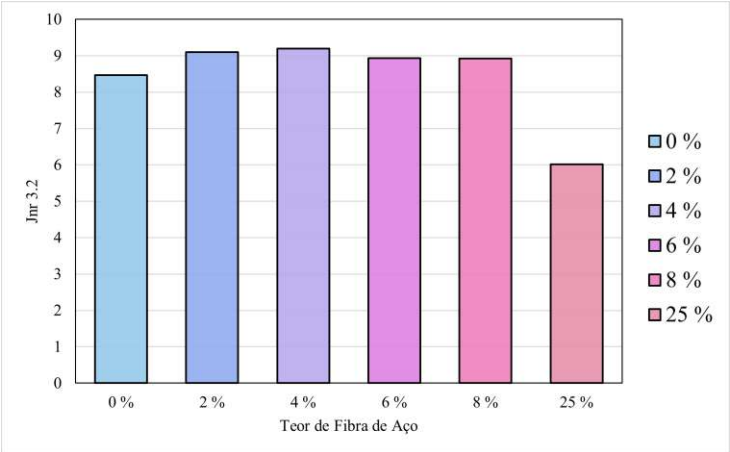


Figura 3: Resultados de Jnr

Os valores demonstram que o parâmetro Jnr 3.2kPa foi pouco impactado pela adição de fibra de aço, mantendo o ligante similar a sua condição original virgem. Apenas para a análise com 25% de modificação que os valores de Jnr 3,2kPa demonstram queda expressiva, sugerindo que neste nível de adição, o ligante passa a ganhar uma parcela considerável de rigidez, levando a menores deformações não recuperáveis e melhorando o desempenho à deformação permanente.

3.4. Resistência a fadiga a partir do *Linear Amplitude Sweep Test* (LAS)

Os resultados de FFL dos ligantes estudados podem ser visualizados na Figura 4. O ligante estudado apresentou FFL médio de 1,341 na condição virgem, 1,388 para o teor de 2%, 1,394 para o teor de 4%, 1,395 para o teor de 6%, 1,369 para o teor de 8% e 1,355 para o teor de 25%.

Os resultados demonstram alteração nos valores de resistência a fadiga do ligante até teores de 6%, quando então passa a apresentar pior desempenho para adições de 8% e depois confirmando a tendencia para adição de 25%. O ligante que inicialmente é classificado no limite da classe mediano, continua se classificando como mediano, mas na parte intermediaria superior da classe quando modificado entre 2% e 6% de fibra de aço.

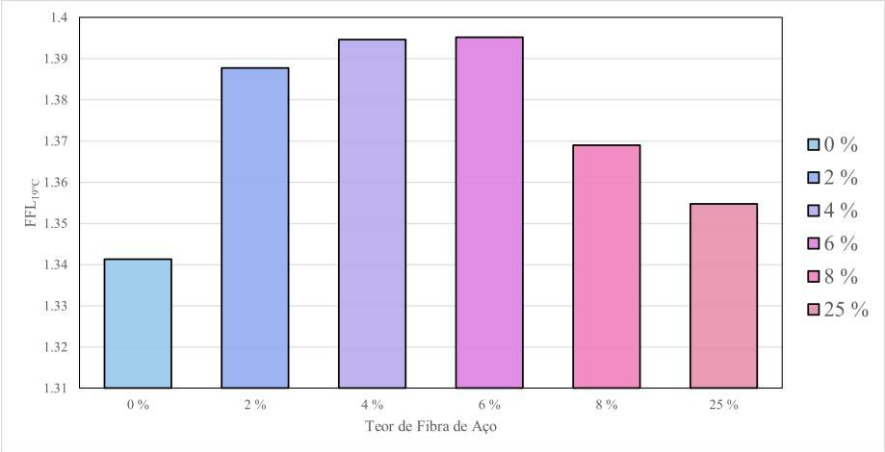


Figura 4: Resultados de Fator de fadiga do ligante

4. CONCLUSÕES

A partir da modificação de um ligante convencional, penetração 50/70, com teores de 2, 4, 6 e 8% e posteriormente um cenário mais elevado de 25%, foi possível observar o impacto em propriedade reológicas de desempenho como o performance grade de alta temperatura (HPG), resistência à deformação permanente e resistência à fadiga. O estudo apresentado neste trabalho é parte de uma pesquisa maior em desenvolvimento, que busca aplicar protocolos de healing em misturas asfálticas com indução eletromagnética e partículas metálicas dentro dos corpos de prova. Desta forma, neste primeiro momento, o impacto da adição de fibras foi monitorado nos ligantes asfálticos, a fim de se definir possíveis teores de modificação para a continuação da pesquisa, e principalmente para verificar se a adição de fibras não impactou negativamente a ponto de inviabilizar seu uso. Considera-se também que novos estudos que avaliam a altura (gap) das amostras no reômetro sejam realizados para a investigação da possível interferência do comprimento da fibra na acurácia das medições reológicas. Assim, as principais conclusões obtidas foram:

a) O impacto da adição dos teores propostos de fibra foi pouco expressivo nas variações de HPG e da resistência a deformação permanente dos ligantes, possivelmente vinculado a estrutura lisa apresentada pela fibra nas imagens de Mev.

b) A adição de fibras de aço foi positiva no ganho de resistência à fadiga do ligante até o teor de 6%, demonstrando que de desempenho para teores maiores que este.

c) A adição de fibra não deteriorou o comportamento do ligante asfáltico em nenhum cenário, considerando-se assim que pode ser usada para a modificação e seguimento da pesquisa com misturas asfálticas.

d) O teor de 6% foi determinado como o mais interessante em termos globais de desempenho nesta pesquisa, e será utilizado faturamento nos protocolos de misturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO T 315 (2020) *Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear*

Amplitude Sweep. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO M 320 (2023) *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.* Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO M 332 (2023) *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test.* Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 350 (2019) *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).* Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Aragão, L. C., et al. (2020) *Extending the service life of asphalt concrete pavements through the addition of conductive metallic waste particles for induced crack healing. Australian Journal of Civil Engineering*. v. 19, p. 58-71. https://doi.org/10.1080/14488353.2020.1795566.

Bastos, J. B. S., et al. (2015). Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. TRANSPORTES v. 23, n. 3, 2015. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.14295/transportes. v23i3.914

Boeira, F.D., et al. Projeto e implementação de ensaio de fadiga por tração-compressão direta (uniaxial) para avaliação de dano em misturas asfálticas. Revista Matéria, v.23, n.3, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/SkDMxsBG5Yz45WbQVRqJBNK/?format=pdf&lang=pt (Acesso em 30/05/2025).

Fontes, L. P.T.L., et al (2008). Comportamento à fadiga e à deformação permanente de misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha brasileiro. 19° Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro. Disponível em: https://repositorium.uminho.pt/bitstream/1822/17217/1/CN38_Comportamento%20%c3%a0%20fadiga%20e%20%c3%a0%20deforma%c3%a7%c3%a3o%20permanente%20de%20misturas%20asf%c3%a1lticas%20confeccionadas%20com%20asfalto-borracha%20brasileiro.pdf (Acesso em 30/05/2025).

Gallego, J., et al. (2013). *Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. Construction and Building Materials.* v. 42, p. 1-4. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.007.

García, A. (2012) *Self-healing of open cracks in asphalt mastic*. *Fuel.* v. 93, p. 264-272. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009.

García, A., et al. (2013) *Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers. Construction and Building Materials.* v. 43, p. 107-117. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.030.

Nascimento. L. A. H. (2015). *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. North Carolina State University. Ph.D. Dissertation.*

Nguyen, Q. T., et al. (2015). *Influence of transient effects for analysis of complex modulus tests on bituminous mixtures. Road Materials and Pavement Design*, v. 17, n. 2, p. 132–148.

Norambuena-Contreras, J.; Garcia, A. (2016). *Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. Materials & Design.* v. 106, p. 404-414. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.095.

Norambuena-Contreras, J.; Gutierrez Aguilar, V.; Gonzalez-Torre, I. (2015). *Physical and mechanical behaviour of a fibre-reinforced rubber membrane with self-healing purposes via microwave heating. Construction and Building Materials.* v. 94, p. 45-56. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.068.

Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). *General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. Road Materials and Pavement Design*, *4*(2), 185–224. https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946

Possebon. E. P. (2021). *Advanced characterization of brazilian bitumens and mixtures***.** Tese de Doutorado. Universidade federal de Santa Maria. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22487 (Acesso em: 09/06/2025).

Sun, Y., et al. (2017) *Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate*. *Construction and Building Materials.* v. 150, p. 673-680. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.007.

Maiara Heinrich (maiara.heinrich@acad.ufsm.br)
Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Grupo de Estudos e Pesquisa em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV)
Av. Roraima, nº1000. Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP: 97105-900 Brasil

RELAÇÃO ENTRE A ESTRUTURA MOLECULAR E A RESISTÊNCIA À FADIGA EM LIGANTES ASFÁLTICOS BRASILEIROS

Alexis Jair Enríquez-León[1,3], Marcos Lamha Rocha[1,3], Leni Figueiredo Mathias Leite[1,3], Francisco Thiago Sacramento Aragão[1], Luciana Nogueira Dantas[2], Margareth Carvalho Coutinho Cravo[3], Luis Alberto Herrmann do Nascimento[3], Silvino Chinelatto Júnior[3]

[1]Programa de Engenharia Civil - Coppe/UFRJ, [2]Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, [3]Cenpes/Petrobras

RESUMO

A evolução das especificações de ligantes asfálticos exige métodos que transcendam os tradicionais parâmetros empíricos, visando maior precisão na previsão do desempenho em serviço. Este estudo investiga as correlações entre a composição química de ligantes asfálticos, caracterizada por espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (NMR), e suas propriedades empíricas e reológicas, com ênfase na resistência à fadiga, avaliada pelo Fator de Fadiga do Ligante (FFL). Foram analisados 18 ligantes brasileiros, incluindo tipos convencionais e modificados por polímeros. Os resultados demonstraram forte correlação positiva entre o FFL e o tamanho médio das cadeias lineares (r = 0,81), bem como com o teor de alcanos lineares (r = 0,75) para os ligantes convencionais. Conclui-se que a caracterização química via NMR pode atuar como uma importante ferramenta para abordagens mais robustas de caracterização do material e previsão de desempenho à resistência à fadiga.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a especificação de ligantes asfálticos no Brasil e em muitas partes do mundo tem se apoiado em parâmetros empíricos, como penetração e viscosidade. Contudo, é amplamente reconhecido que tais métodos possuem limitações significativas na predição do desempenho de pavimentos em serviço, particularmente diante da crescente diversidade de fontes de petróleo, processos de refino e da utilização de ligantes modificados com polímeros ou borracha (Zhang *et al*., 2025). Adicionalmente, o fenômeno do envelhecimento termo-oxidativo, que ocorre tanto durante a produção da mistura quanto ao longo da vida útil do pavimento, altera progressivamente a composição química e, por conseguinte, as propriedades reológicas e mecânicas do ligante, adicionando uma camada de complexidade à predição de desempenho (Islam *et al*., 2024; Li *et al*., 2024; Yao *et al*., 2015). Islam *et al*. (2024), por exemplo, demonstraram a correlação entre o índice de carbonila, um indicador químico do envelhecimento obtido por *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) portátil, e a idade de serviço e o início de fissuramento em pavimentos em campo.

A caracterização e especificação de ligantes asfálticos têm evoluído significativamente, afastando-se de abordagens puramente empíricas, em direção a uma compreensão mais fundamental baseada na reologia dos materiais. Também têm sido estudadas a composição química e a estrutura molecular. Reconhece-se cada vez mais que o desempenho macroscópico do ligante é governado pelas interações em nível molecular e pela natureza química dos seus componentes, o que justifica a aplicação de técnicas analíticas avançadas para sua investigação.

A análise química, por meio de diversas técnicas, investiga a composição e suas modificações durante o envelhecimento. A separação em frações SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos) é uma abordagem comum. Estudos indicam que o envelhecimento aumenta a fração de asfaltenos, devido à conversão de aromáticos e resinas. Essa alteração correlaciona-se ao aumento da rigidez do ligante (Sultana e Bhasin, 2014). Técnicas espectroscópicas como FTIR quantificam a formação de grupos funcionais (como carbonilas e sulfóxidos), enquanto a espectroscopia de NMR fornece informações detalhadas sobre a estrutura molecular, complementando a análise elementar tradicional (Li *et al*., 2024).

Apesar dos avanços na caracterização química e das correlações identificadas entre alterações em grupos funcionais e parâmetros reológicos, a conexão direta entre as modificações na composição química e o desempenho macroscópico do ligante e da mistura asfáltica ainda requer aprofundamento. Uma abordagem integrada das perspectivas química, reológica e morfológica é vista como necessária para transpor a lacuna entre micro e macro aspectos.

Nesse contexto, o estudo investiga as correlações entre indicadores químicos obtidos por NMR com propriedades empíricas e reológicas de ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímero, com

ênfase na resistência à fadiga, avaliada pelo Fator de Fadiga do Ligante (FFL) do ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS). Foram empregados métodos tradicionais, ensaios reológicos e análises químicas, permitindo uma avaliação integrada entre composição química e desempenho reológico dos ligantes brasileiros.

2. METODOLOGIA E MATERIAIS

A metodologia deste estudo consistiu na avaliação de 18 ligantes asfálticos representativos do mercado brasileiro, compreendendo 14 ligantes convencionais do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), designados como PEN, e quatro ligantes asfálticos modificados por polímeros (*Polymer-Modified Asphalt*, PMA, em inglês), que incluíram tipos 60/85 e de alta modificação (*Highly Modified Asphalt*, HiMA, em inglês) e um de origem Russo, abrangendo diferentes origens, processos de refino e modificações. Todos os ligantes foram identificados por códigos de A a R e caracterizados pelos ensaios empíricos tradicionais penetração, ponto de amolecimento (PA) e viscosidade Brookfield a 135°C, além da classificação por grau de desempenho (PG) conforme a Metodologia Superpave, como apresentado na Tabela 1. A caracterização reológica foi conduzida com um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR, em inglês), avaliando o |G*|/senδ a 64°C e a 10 rad/s e o FFL obtido do LAS a 19°C e com o material envelhecido a curto prazo, seguindo a Norma DNIT 439/2022-ME. Para assegurar a precisão e repetibilidade dos dados, os ensaios para cada ligante foram conduzidos em replicata, sendo o valor médio de FFL utilizado nas análises. Paralelamente, a caracterização química foi realizada por NMR, utilizando um equipamento de 11,75 Tesla para os experimentos de hidrogênio e carbono-13, com determinação da relação C/H, a distribuição de carbonos aromáticos (Caro) e saturados (Csat), o percentual de alcanos lineares, o tamanho médio das cadeias lineares, o Índice de Oxidação (R), e o Índice de Suscetibilidade ao Asfalteno (ISA), permitindo uma compreensão aprofundada da composição e da estrutura molecular dos ligantes.

Tabela 1: Informações dos ligantes analisados

ID	Tipo	Classe	Penetração (0,1 mm)	Ponto de amolecimento (°C)	Viscosidade a 135°C (cP)	|G*|/senδ a 64°C (kPa)	Grau PG
A	Não modificados	30/45	36	53,4	428	2,0	64S-16
B		50/70	53	50,1	295	1,3	64S-16
C		50/70	63	49,1	288	1,1	58S-22
D		50/70	55	51,1	380	1,8	64S-16
E		50/70	56	50,6	392	1,6	64S-16
F		50/70	52	50,1	395	1,7	64S-16
G		50/70	59	49,5	296	0,8	58S-22
H		50/70	66	52,9	388	1,1	64S-22
I		50/70	48	51,0	395	1,5	64S-16
J		50/70	51	51,8	370	1,2	64S-16
K		50/70	55	53,7	417	1,7	64S-16
L		50/70	51	52,0	375	1,2	64S-22
M		50/70	54	48,6	272	0,9	58S-16
N		50/70	70	49,7	348	1,1	64S-28
O	Modificados por polímeros	60/85	52	68,3	1,685	2,7	70H-22
P		60/85	34	59,0	1,171	4,1	76S-22
Q		HiMA	45	86,9	2,041	4,9	82E-22
R		Russo	49	75,0	1,919	11,3	82S-22

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados foi conduzida com o objetivo de investigar as correlações entre a composição química dos ligantes asfálticos, obtida por espectroscopia de NMR, e suas propriedades empíricas e reológicas, com foco especial na resistência à fadiga representada pelo FFL. Os ligantes avaliados incluíram amostras convencionais e modificadas, conforme descrito na Tabela 1, permitindo uma abordagem comparativa abrangente entre diferentes tipos de formulações.

A Figura 1 apresenta os perfis químicos obtidos por NMR para os ligantes asfálticos analisados, abrangendo ligantes convencionais (CAP 30/45 e CAP 50/70) e modificados (AMP 60/85, HiMA e Russo). Observa-se

uma ampla variação nos parâmetros moleculares, evidenciando distinções estruturais relevantes entre os ligantes. No grupo dos ligantes convencionais, a razão C/H se manteve relativamente constante entre 0,57 e 0,61, com valores típicos de alcanos lineares variando entre 21,7% (ligante N) e 31,7% (ligante H), e tamanhos médios das cadeias lineares entre 17 unidades e 28 unidades. De modo geral, valores mais elevados de razão C/H sugerem a presença de moléculas mais densas e complexas. Já os ligantes modificados, em especial o HiMA (Q) e o Russo (R), apresentaram características diferenciadas: o HiMA possuiu razão C/H de 0,59, teor de alcanos lineares de 21,6% e tamanho médio das cadeias lineares de 20, enquanto o Russo apresentou o maior valor de razão C/H (0,70), teor de alcanos lineares de 26,5% e um dos menores tamanhos médios de cadeia (16). Por outro lado, o AMP 60/85 (ligante P) apresentou o menor valor de ISA (3,92%) e o maior índice de oxidação (0,18), acompanhado do maior teor de carbono aromático (39,0%) e do menor teor de hidrogênios saturados (88,1%).

Essas diferenças estruturais refletem o maior grau de funcionalização química dos ligantes modificados. Além disso, os dados da Tabela 1 evidenciam que tais características podem estar associadas a um desempenho superior. Por exemplo, o HiMA (Q) apresentou o maior valor de |G*|/senδ a 64 °C (4,9 kPa) entre os ligantes modificados com viscosidade elevada (2.041 cP), enquanto o Russo (R) atingiu o valor mais elevado de |G*|/senδ (11,3 kPa) e uma das maiores viscosidades medidas (1.919 cP).

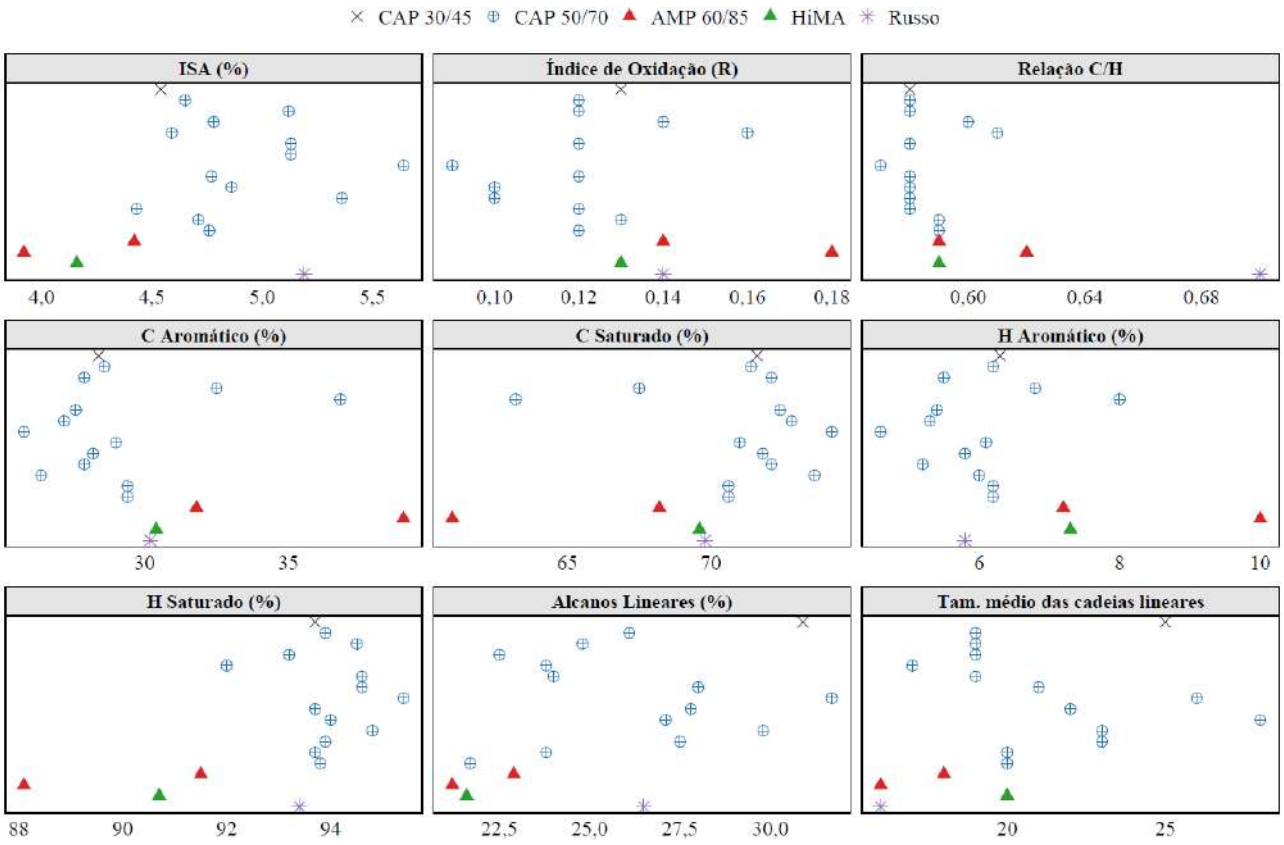


Figura 1: Perfis químicos por NMR de ligantes asfálticos convencionais e modificados

A Figura 2 detalha as correlações de Pearson entre as propriedades físico-químicas e reológicas dos ligantes asfálticos, considerando exclusivamente os convencionais. Esta delimitação foi adotada com o objetivo de evitar a influência de comportamentos atípicos observados entre os ligantes modificados por polímero, em especial o Ligante Russo (R), que se comportou como um outlier. Nessa análise, o FFL, obtido pelo ensaio LAS, apresentou correlação positiva significativa com o tamanho médio das cadeias lineares (r = 0,81), o teor de alcanos lineares (r = 0,75) e o ponto de amolecimento (r = 0,69), ao passo que se correlacionou negativamente com o teor de hidrogênios saturados (r = -0,53), com o índice de oxidação (r = -0,71) e com a razão C/H (r = -0,63). De acordo com Saifullah *et al.* (2018), cadeias alifáticas mais longas e abundantes

tendem a oferecer maior ductilidade e tenacidade ao material. Os autores demonstraram que, à medida que as cadeias se tornam mais longas, elas formam uma rede física interpenetrada mais densa e robusta. Essa rede de emaranhados serve como o principal mecanismo para dissipar a energia durante o carregamento cíclico, o que resulta em uma maior tenacidade mecânica.

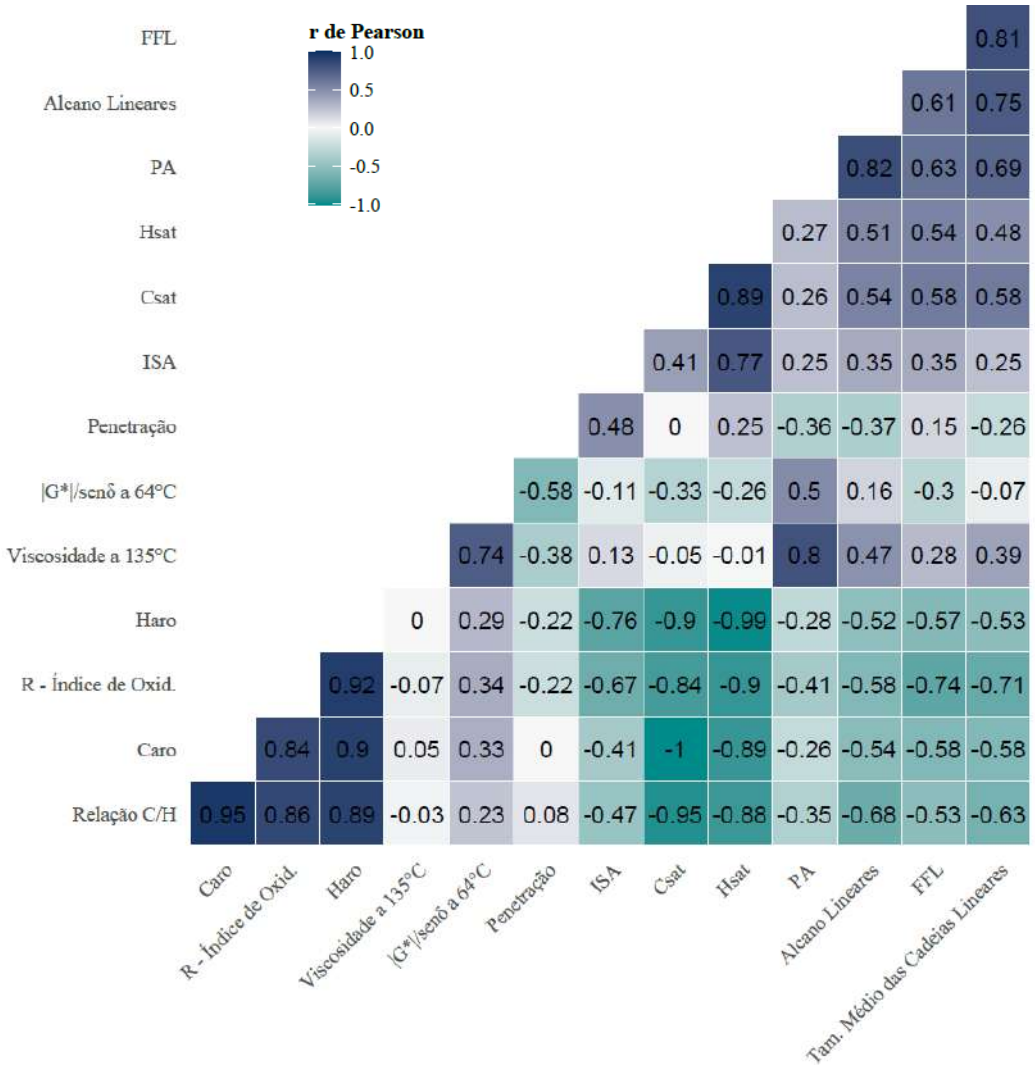


Figura 2: Mapa de correlação de Pearson entre propriedades físico-químicas e reológicas dos ligantes asfálticos convencionais (CAP 30/45 e CAP 50/70)

A Figura 3 ilustra a correlação entre o FFL e o tamanho médio das cadeias lineares obtido por NMR. Na parte (a), considerando exclusivamente os 14 ligantes convencionais, observa-se uma correlação linear positiva expressiva (R^2 = 0,65; r = 0,81), evidenciando uma tendência clara de aumento do FFL com o crescimento do tamanho médio das cadeias lineares. No entanto, ao expandir a análise para incluir todos os ligantes, convencionais e modificados, conforme mostrado na parte (b), a correlação se enfraquece substancialmente (R^2 = 0,05; r = 0,22). Esse comportamento é influenciado principalmente pela inclusão do ligante Russo (R), que se destaca com um valor de FFL elevado (superior a 2,0) e um dos menores tamanhos médios de cadeias lineares (16), caracterizando-se como um outlier.

Os resultados obtidos evidenciam uma forte conexão entre a estrutura molecular dos ligantes asfálticos e seu desempenho mecânico, em especial a resistência à fadiga medida pelo FFL. O tamanho médio das cadeias lineares, determinado por espectroscopia de NMR, destacou-se como um parâmetro com alta sensibilidade na diferenciação entre ligantes com maior ou menor desempenho à fadiga dentro do grupo de ligantes convencionais. A redução da correlação ao incluir ligantes modificados, em especial o comportamento atípico do ligante Russo, reforça a complexidade introduzida por modificações poliméricas e a necessidade de abordagens específicas para sua avaliação. A associação entre características químicas e propriedades

reológicas, portanto, demonstra potencial como ferramenta complementar para a seleção e o desenvolvimento de ligantes asfálticos com desempenho superior.

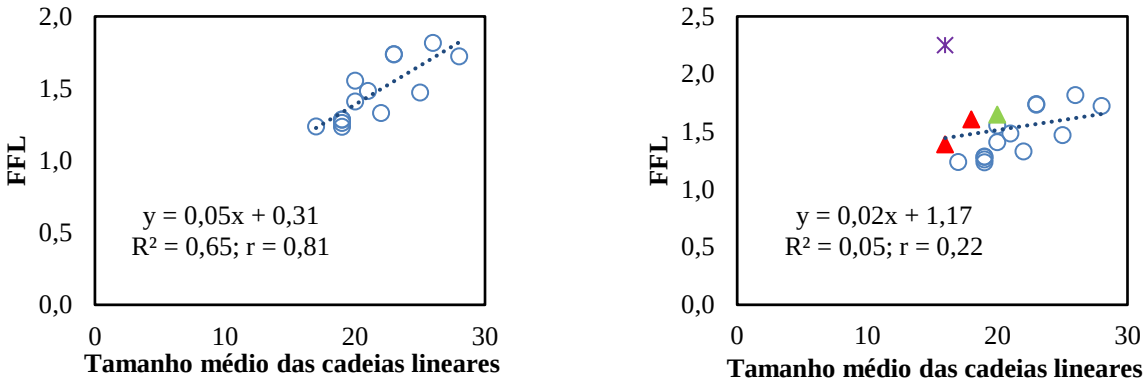


Figura 3: Correlação entre o Fator de Fadiga do Ligante (FFL) e o tamanho médio das cadeias lineares para (a) ligantes convencionais e (b) todos os ligantes (convencionais e modificados)

4. CONCLUSÕES

Com base na abrangente caracterização química, empírica e reológica dos ligantes asfálticos brasileiros convencionais e modificados por polímeros avaliados, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

- A espectroscopia de NMR demonstrou ser uma ferramenta eficaz para diferenciar a composição e a estrutura molecular de ligantes asfálticos, revelando variações entre ligantes convencionais e, mais acentuadamente, entre os ligantes modificados por polímero.
- Para os ligantes asfálticos convencionais, uma forte correlação positiva foi observada entre o FFL e o tamanho médio das cadeias lineares (r = 0,81) e o teor de alcanos lineares (r = 0,75). Esses resultados indicam que a presença de cadeias alifáticas mais longas e lineares está diretamente associada a uma melhor resistência à fadiga avaliada pelo FFL.
- A inclusão de ligantes asfálticos modificados por polímeros na análise de correlação do FFL com o tamanho médio das cadeias lineares (r = 0,22) demonstrou uma significativa redução na correlação observada em ligantes convencionais. Isso pode evidenciar que a modificação polimérica introduz um novo nível de complexidade ao ligante, onde a contribuição do polímero no desempenho à fadiga pode sobrepor ou alterar a influência das características químicas do asfalto base.
- Esta abordagem, que relaciona a composição química e o desempenho reológico dos ligantes, abre novas perspectivas para o desenvolvimento de critérios de especificação mais robustos.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), do Cenpes/Petrobras e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNIT 439/2022-ME. (2022). Pavimentação - Ligante asfáltico - Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS - Linear Amplitude Sweep) - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

Islam, M. R., Salomon, D., & Wasiuddin, N. M. (2024). Investigation of oxidative aging of field-extracted asphalt binders at various conditions using carbonyl index. *Construction and Building Materials*, 415, 134969.

Li, G., Qi, C., Han, S., Fan, L., Kuang, D., Chen, H., & Wu, Y. (2024). Effects of cutting temperature on the genes and fatigue properties of asphalt during its refining process. *Fuel*, 375, 132602.

Saifullah, A., Thomas, B., Cripps, R., Tabeshfar, K., Wang, L., & Muryn, C. (2018). Fracture toughness of rotationally molded polyethylene and polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 58(1), 63-73.

Sultana, S., & Bhasin, A. (2014). Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 72, 293-300.

Yao, H., Dai, Q., & You, Z. (2015). Fourier Transform Infrared Spectroscopy characterization of aging-related properties of original and nano-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 101, 1078-1087.

Zhang, F., Falchetto, A. C., Wang, D., Li, Z., Sun, Y., & Lin, W. (2025). Prediction of asphalt rheological properties for paving and maintenance assistance using explainable machine learning. *Fuel*, 396, 135319.

Ligantes para Pavimentos Flexíveis

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECICLABILIDADE DE MATERIAIS ASFÁLTICOS FRESADOS POR MEIO DA ANÁLISE DA LUBRICIDADE DO LIGANTE

Ana Flavia Davanzo Lopes, Kamilla Vasconcelos
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

RESUMO
A reutilização do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) é uma alternativa eficaz para reduzir o consumo de insumos virgens e estender o ciclo de vida dos materiais. Seu uso em misturas asfálticas a quente ou mornas é considerado o mais nobre, pois aproveita propriedades dos agregados e do ligante envelhecido. No entanto, sua aplicação e aumento de seu teor são limitados por fatores ligados, principalmente, ao desempenho do ligante enrijecido, tais como a lubricidade, que pode influenciar tanto a trabalhabilidade quanto a ativação do ligante durante a usinagem. Contudo, a lubricidade ainda não foi adequadamente correlacionada a outras características do ligante, nem empregada como parâmetro na dosagem de misturas asfálticas. Este estudo investigará o potencial de reciclabilidade de RAPs através da análise da lubricidade dos ligantes, relacionando-a com a ativação do ligante envelhecido e propondo critérios e metodologia para sua aplicação na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente e mornas.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

A construção e manutenção de rodovias representam de 5 a 25% das emissões de carbono provenientes da rede rodoviária, que por sua vez é responsável por quase 18% das emissões mundiais (IEA, 2021; Liu *et al*., 2022). A utilização do RAP em novas misturas asfálticas recicladas a quente e mornas é uma solução que se apresenta vantajosa ambiental e economicamente (Mascarenhas *et al*., 2023; NAPA, 2022; Shacat *et al*., 2024), mas é muitas vezes limitada devido a diversos fatores que envolvem características próprias do seu ligante, seu grau de envelhecimento, a interação com os demais materiais, além de questões operacionais como a eficiência das usinas de asfalto. É estimado que o Brasil gere mais de 2,1 milhões de toneladas de RAP por ano, mas menos de 1% desse montante é empregado em misturas recicladas a quente e mornas (Davanzo Lopes *et al*., 2024). Diante do potencial brasileiro para reciclagem do RAP e da necessidade de otimização dessa prática, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar o potencial de reciclabilidade de RAPs por meio da análise da lubricidade dos ligantes asfálticos. Além disso, traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Correlacionar as propriedades reológicas, químicas e tribológicas de ligantes asfálticos extraídos de RAPs, puros ou com adição de agentes de reciclagem, a fim de relacionar as características de lubricidade e o envelhecimento do ligante;
- Avaliar o grau de ativação do ligante envelhecido dos RAPs e sua correlação com as características químicas, reológicas e, principalmente, com a lubricidade do respectivo ligante;
- Propor um critério de utilização dos parâmetros de lubricidade e/ou ativação do ligante envelhecido na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente e mornas a fim de aprimorar seu desempenho e elevar o teor de RAP nas misturas, sem comprometer o desempenho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

O *Degree of Binder Activity* (DoA), ou grau de ativação do ligante, é um índice que indica a porcentagem mínima de ligante disponível do RAP que poderá ser considerado na produção da mistura asfáltica reciclada, sem a interferência de outros materiais rejuvenescedores (Lo Presti *et al*., 2019). É uma propriedade intrínseca do RAP e pode variar de acordo com sua origem, com as condições de armazenamento e processos sofridos durante a usinagem. Quando ocorre o uso de agentes de reciclagem, o índice recebe o nome de *Degree of Binder Availability* (DoAv), ou grau de disponibilidade do ligante. Além da ativação do ligante, é de suma importância conhecer o grau de interação entre os ligantes novo e velho em uma mistura reciclada. Conhecido como *Degree of Blending* (DoB), trata-se de um indicador que descreve como o ligante do RAP contribui nas propriedades do ligante final da mistura reciclada. O DoB é influenciado por diversos fatores, como a temperatura e tipo de usinagem, as características e o teor do ligante virgem, o uso ou não de agentes de reciclagem, a origem do RAP e as propriedades do ligante envelhecido, que influenciam também diretamente o DoA (Sabouri *et al*., 2015; Gaspar, 2019). Diversos trabalhos apontam para a influência da lubricidade do ligante asfáltico nas características de usinagem e compactação das misturas asfálticas, tais como temperatura e trabalhabilidade (Li *et al*., 2019; Lopes *et al*., 2022; Rodrigues *et al*., 2021).

A lubricidade é uma propriedade dos materiais inserida no ramo da ciência da tribologia, dedicado à

investigação das interações que ocorrem entre superfícies em contato quando estas são separadas por uma camada de lubrificante (Bhushan, 2013). Comparada com outros usos, sua aplicação em pavimentação é um campo de pesquisa ainda pouco explorado, com aumento significativo do número de publicações nos últimos 15 anos (Wagh *et al.*, 2022), destacando-se sua aplicação no estudo de misturas asfálticas mornas (Bairgi *et al*., 2019; Ingrassia *et al*., 2018; Puchalski, 2012). Contudo, ainda há diversas questões a serem investigadas acerca da lubricidade, como qual método de ensaio utilizar para avaliar ligantes asfálticos, como classificá-los quanto a esta propriedade e como utilizá-la na dosagem de misturas asfálticas recicladas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho utilizará ligantes asfálticos virgens convencionais, modificados por polímeros e borracha a fim de estabelecer referenciais para os parâmetros estudados. Até o momento, seis RAPs de origem distinta, obtidos de rodovias do Sudeste brasileiro e de composição desconhecida farão parte da análise. Pretende-se, também analisar agentes de reciclagem comerciais puros e adicionados aos ligantes. Os agregados empregados na avaliação de desempenho de misturas recicladas serão obtidos diretamente de usinas parceiras a esta pesquisa.

O trabalho será dividido conforme fluxograma da Figura 1. Inicialmente, será realizada uma revisão bibliográfica a fim de escolher qual método de ensaio será utilizado para avaliar a lubricidade de ligantes asfálticos. Uma possibilidade de geometria para o teste seria a "*Ball on three plates*", que foi a mais utilizada por estudos de ligantes asfálticos e que pode ser empregada em reômetro de cisalhamento dinâmico (da sigla em inglês, DSR). Esta geometria consiste em uma bola que desliza em um movimento rotativo unidirecional entre três placas inclinadas, conforme indicado no fluxograma da Figura 1. Ao aplicar uma força normal e uma velocidade rotacional, torna-se possível calcular o coeficiente de fricção do material em função da velocidade de deslizamento através da *Stribeck Curve* (Wagh *et al.*, 2022).

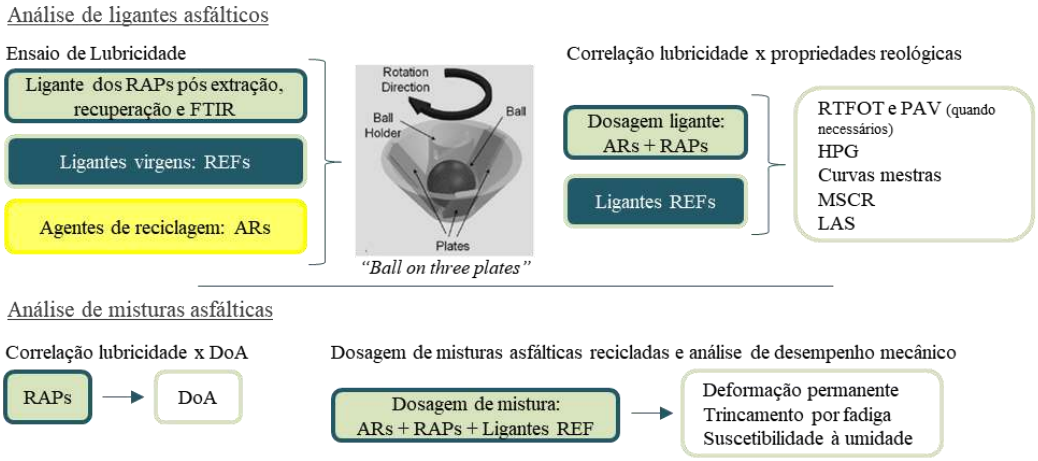


Figura 1: Fluxograma da metodologia do trabalho

Os ligantes virgens serão submetidos ao envelhecimento a curto prazo no *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) (ASTM D2872-22) e a longo prazo no *Pressure Aging Vessel* (PAV) (ASTM D6521-19a), a depender das condições exigidas em cada ensaio. Para a avaliação do ligante dos RAPs, será realizada a extração automatizada (ASTM D8159-19) e recuperação no rotavapor (EN 12697-3), seguidas de uma análise química de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) (ASTM E1252-98), a fim de identificar a presença do solvente residual. A priori será utilizado o solvente tetracloroetileno, convencionalmente utilizado na extratora automatizada para misturas asfálticas, sendo avaliada a possibilidade de uso de outros solventes caso necessário. Posteriormente, utilizando o DSR, serão realizados os ensaios de: Grau de Desempenho Contínuo em alta temperatura (HPG) utilizado na classificação da metodologia *Superpave*, que indica a temperatura máxima na qual o pavimento não apresentaria tendência de sofrer deformação permanente (AASHTO M332-23); varredura de frequência e temperatura (AASHTO T315-19), a fim de construir as curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico (|G*|) e do ângulo de fase (δ) e obter o parâmetro *Glover-Rowe* (G-R) associado a fadiga em ligantes asfálticos; *Multiple Stress Creep Recovery* – MSCR (ASTM D7405-20), que consiste na aplicação de ciclos de fluência e recuperação para determinação da susceptibilidade do ligante sofrer deformação permanente (Jnr) e da capacidade de recuperação da deformação sofrida (R%); *Linear Amplitude Sweep* - LAS (DNIT 439/2022), utilizado como método de

correlação da resistência à fadiga de ligantes; além do ensaio de lubricidade (metodologia a ser definida), com o objetivo de correlacioná-lo com o nível de envelhecimento dos ligantes.

Será definido um protocolo de avaliação do DoA dos RAPs entre os conhecidos na literatura, como o desenvolvido pelo Grupo de Trabalho 5 do *RILEM Technical Committee 264* RAP e atualmente em adaptações pelo Grupo de Trabalho 3 do *RILEM Technical Committee 308 PAR*. Os DoAs obtidos serão relacionados com os parâmetros extraídos dos ensaios dos ligantes a fim de estabelecer uma relação entre a ativação do ligante e suas propriedades, principalmente, a lubricidade. Correlacionados os parâmetros, serão realizadas dosagens de misturas asfálticas recicladas com o objetivo de estabelecer um critério de utilização do RAP de acordo com a lubricidade e/ou DoA, buscando otimizar o desempenho das misturas. Serão utilizados ensaios para avaliação da deformação permanente, como o *High-Temperature Indirect Tensile Test* (HT-IDT) e simulador de tráfego francês *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) (EN 12697-22); de resistência ao trincamento, como o ensaio de viga à flexão em quatro pontos (ASTM D7460-10); e de suscetibilidade à umidade como o Lottman modificado (AASHTO T283-22).

O tratamento e análise dos dados serão realizados através dos softwares R e Prism para verificação da normalidade e outras análises estatísticas a fim de avaliar a magnitude das diferenças das informações colhidas.

Agradecimentos
As autoras agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento e incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bairgi, B. K.; U. A. Mannan e R. A. Tarefder (2019) Tribological approach to demonstrate workability of foamed warm-mix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, 9.

Bhushan, B. (2013) *Principles and applications of tribology*. John Wiley & Sons.

Davanzo Lopes, A. F.; K. Vasconcelos; M. S. S. Almeida e L. L. B. Bernucci (2024) Geração e utilização de RAP no Brasil. *Revista ENINFRA*, v. 3, n. 3, p. 201-217.

Gaspar, M. S. (2019) *Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo. São Paulo.

IEA (2021) Greenhouse Gas Emissions from Energy. Paris: International Energy Agency (IEA).

Ingrassia, L. P.; X. Lu; F. Canestrari e G. Ferrotti (2018) Tribological characterization of bituminous binders with Warm Mix Asphalt additives. *Construction and Building Materials*, v. 172, 309-318.

Li, J.; P. Li; J. Su; Y. Xue e W. Rao (2019) Effect of aggregate contact characteristics on densification properties of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, v. 204, p. 691-702.

Liu, N.; Y. Wang; Q. Bai; Y. Liu; P. Wang; S. Xue; Q. Yu e Q. Li (2022) Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 9, n. 4, p. 532-555.

Lopes, A. F. D.; G. S. Pinheiro; J. A. Rodrigues; K. Vasconcelos e L. L. B. Bernucci (2022) Avaliação do grau de ativação do ligante de RAPs provenientes de campo e produzidos em laboratório. In Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza: ANPET.

Lo Presti, D.; K. Vasconcelos; M. Oreskovic; G. M. Pires e S. Bressi (2019) On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents. *Road Materials and Pavement Design*, v. 21, n. 8, p. 2071-2090.

Mascarenhas, Z. M. G.; Z. Piao; K. Vasconcelos; L. Poulikakos e L. L. B. Bernucci (2023) Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. *Science of the Total Environment*, v. 858, n. 159862.

NAPA (2022) Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2021.

Puchalski, S. (2012) *Investigation of Warm Mix Asphalt Additives Using the Science of Tribology to Explain Improvements in Mixture Compaction*. Dissertação (Mestrado). Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison. Madison.

Rodrigues, J. A.; G. S. Pinheiro e K. Vasconcelos (2021) Avaliação do processo de produção de RAP artificial em laboratório. In Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. ANPET.

Sabouri, M.; T. Bennert; J. E. Sias e Y-R. Kim (2015) A comprehensive evaluation of the fatigue behavior of plant-produced RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, p. 1-26.

Shacat, J.; R. Willis e B. Ciavola (2024) The Carbon Footprint of Asphalt Pavements: A Reference Document for Decarbonization. NAPA.

Wagh, V. P.; N. Saboo e A. Gupta (2022) Tribology as emerging Science for war mix technology: A review. *Construction and Building Materials*, v. 359.

Ana Flavia Davanzo Lopes (anaflopes@usp.br)
Kamilla Vasconcelos (kamilla.vasconcelos@usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, Travessa do Biênio, 83, Butantã, São Paulo, SP, Brasil

ESTUDO COMPARATIVO DO NÍVEL DE ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Berta Jenice Jaime Chilole[1]
Patrícia Hennig Osmari[1]
[1]Universidade de São Paulo

RESUMO
Divergências entre o nível de envelhecimento do ligante asfáltico simulado em laboratório por meio do Rolling Thin Film Oven test (RTFOT), e o envelhecimento observado em misturas usinadas têm sido identificadas em diversas pesquisas. Esta pesquisa, visa verificar a eficiência do RTFOT em simular o efeito do envelhecimento durante o processo de usinagem, por meio de comparação das propriedades do ligante envelhecido no laboratório com as do ligante recuperado da mistura usinada. Serão analisados três materiais: ligante envelhecido no RTFOT, extraído e recuperado de uma mistura coletada em uma usina e extraído e recuperado de uma mistura produzida no laboratório. A metodologia envolve uma calibração para eliminar o solvente residual, os finos, além de recuperar o ligante contendo partículas de borracha. As amostras serão submetidas a ensaios de monitoramento no Dynamic Shear Rheometer (DSR) para caracterização e avaliação dos efeitos do envelhecimento com base nas suas propriedades.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Por ser um material orgânico, o ligante asfáltico sofre alterações físico-químicas, como volatilização e oxidação, que ocorrem durante o processo construtivo e a vida útil do pavimento, influenciado por fatores climáticos e reações químicas. Como resultado, o material apresenta aumento de sua rigidez e começa a apresentar defeitos na estrutura do pavimento, como trincamento por fadiga e danos causados pela umidade. Embora o RTFOT seja amplamente utilizado para simular o envelhecimento que ocorre durante o processo construtivo do pavimento, usualmente denominado envelhecimento de curto prazo, ele pode não refletir com precisão o envelhecimento real do ligante asfáltico. Foram adotados parâmetros viscoelásticos pela especificação Superpave, que permitem a quantificação dos efeitos do envelhecimento, como o aumento no módulo complexo de cisalhamento (G*) e a diminuição do ângulo de fase (δ) do ligante (Simonea *et al*., 2012; Abdullah *et al*., 2018; Rosi & Faxina, 2018; Bernucci *et al*., 2022; Vijayan *et al*., 2023).

Alguns estudos buscaram simular o envelhecimento de curto prazo em laboratório para compará-lo com o que ocorre durante o processo construtivo. Mallick & Brown (2004), constataram que os ligantes asfálticos apresentam um envelhecimento um pouco mais avançado no processo de mistura na usina em comparação ao simulado no RTFOT. Lee *et al*. (1991) afirmam que o tempo real de envelhecimento de curto prazo no campo varia conforme as distâncias de transporte e a duração do espalhamento e da compactação da mistura asfáltica. Os estudos de Rossi & Faxina (2018) e de Abdullah *et al*. (2017) indicaram que o protocolo convencional de envelhecimento de curto prazo, conforme a ASTM D2872, pode não ser suficiente para simular o envelhecimento de curto prazo dos ligantes asfálticos em condições climáticas específicas.

O estudo comparativo do nível de envelhecimento de ligantes asfálticos requer a realização do processo de extração e recuperação do ligante da mistura asfáltica para permitir a avaliação das suas propriedades reológicas. A principal preocupação na realização deste procedimento está na possível alteração das suas características, que pode ser causada pela presença de solvente residual, pelo superaquecimento durante a etapa de recuperação e pela presença de finos. No caso de misturas asfálticas com borracha, devido à natureza heterogênea do ligante, torna-se impossível recuperar o ligante e a borracha como um único componente, o que pode modificar a rigidez do material obtido após o procedimento (Sirin e Tia 2003; Mikhailenko *et al*., 2019; Hemida *et al*., 2021; Dare e Hedaoo, 2023).

Vale destacar que os métodos de extração e recuperação existentes, não especificam claramente um protocolo adequado para realizar a recuperação do ligante modificado por borracha, mesmo que este material seja uma opção interessante tanto para mitigar impactos ambientais quanto para aumentar a resistência à fadiga e prolongar a vida útil dos pavimentos (Lee *et al*., 2008; Huang e Pauli, 2011). Como alternativa para a recuperação da borracha, será adotado um procedimento complementar de recuperação baseado na separação por diferença de densidade, as quantidades de borracha não puderem ser extraídas serão determinadas e adicionadas novamente ao ligante recuperado, a fim de corrigir o ligante recuperado.

Considerando o contexto apresentado, este estudo busca contribuir para o avanço de pesquisas e o aprimoramento dos métodos e normas relacionadas ao envelhecimento e à recuperação de ligantes asfálticos no Brasil. Para isso, o estudo tem como objetivo avaliar a eficiência do RTFOT na simulação do efeito do envelhecimento que ocorre durante o processo de usinagem. Além disso, pretende-se analisar os parâmetros reológicos que podem ser influenciados nas diferentes condições de envelhecimento, uma vez conhecidas, poderão ser usadas na comparação do envelhecimento de curto prazo de ligantes asfálticos. Espera-se assim, que os resultados obtidos contribuam para o aumento da precisão e da eficiência dos procedimentos atualmente utilizados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais e Equipamentos

O ligante investigado na pesquisa será do tipo asfalto modificado com borracha oriundo de usinas da região e, além disso, serão coletados todos os demais insumos empregados na preparação da mistura asfáltica em usina. Adicionalmente, serão coletadas amostras de misturas asfálticas usinadas soltas. O solvente que será usado no processo de extração e recuperação será o percloroetileno (PCE). Dentre os equipamentos a serem utilizados estão: estufas, extrator por refluxo, evaporador rotativo, estufa de filme fino rotativo, estufa de ventilação forçada, reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).

2.2. Métodos

O delineamento experimental da pesquisa é baseado em quatro materiais, conforme esquematizado no fluxograma da Figura 1. A pesquisa será dividida em três etapas: Produção da Mistura e Envelhecimento do ligante e da Mistura asfáltica, Extração e Recuperação do ligante asfáltico e Caracterização Reológica.

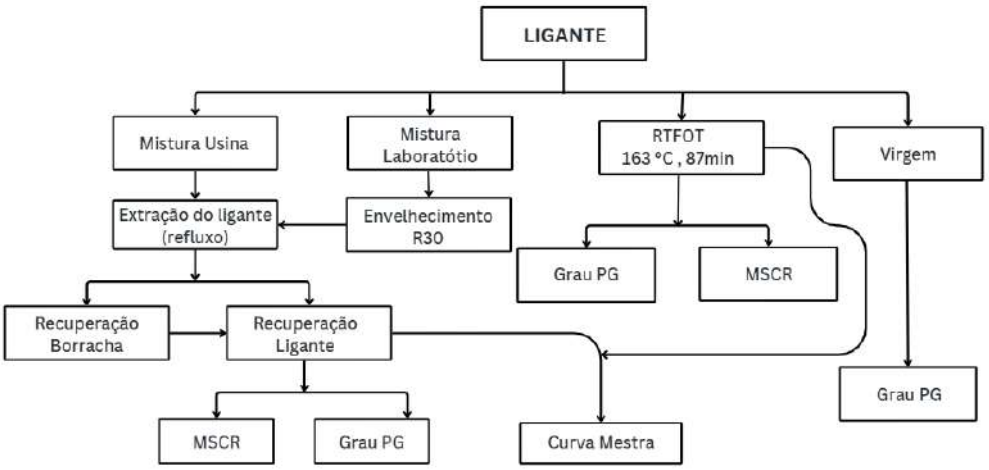


Figura 1: Fluxograma do delineamento experimental.

Etapa 1 – Produção da Mistura e Envelhecimento do ligante e da Mistura asfáltica

A partir do ligante virgem, serão produzidas cinco misturas em laboratório, conforme o traço e temperaturas indicadas por cada usina, que serão comparadas às misturas produzidas nas respetivas usinas. A mistura produzida será envelhecida em uma estufa de ventilação forçada por 4 horas a 135°C, conforme a norma AASHTO_R30-15, e passará pelos procedimentos de extração, recuperação do ligante e recuperação da borracha. O ligante será também envelhecido no RTFOT, a 163°C e 87min (ajuste no tempo de ensaio de acordo com a elevação local - acréscimo de 1 minuto para cada 305 metros de elevação acima do nível do mar), conforme o procedimento da norma ASTM D2872-22.

Etapa 2 – Extração e Recuperação do ligante asfáltico

A mistura coletada na usina passará pelo processo de extração por refluxo, em que um vapor solvente gerado pela placa quente passa ao redor e através da amostra de mistura asfáltica contida em um cone de malha de arame revestidos com papel de filtro, conforme descrito na norma ASTM D 2172 – 05, método B. O ligante será recuperado no evaporador rotativo, com base no procedimento da norma europeia EM 12697-3:2013 e utilizando as condições de destilação recomendadas pela norma para o PCE. A borracha da mistura borracha

e agregados será recuperada por diferença de densidade, onde, a mistura é embebida em solvente, visto que, as densidades da borracha, do solvente e dos agregados são de 1,15 g/cm³, 1,33 g/cm³ e 2,8 g/cm³ respetivamente. A borracha recuperada será adicionada ao ligante que para posterior caracterização reológica.

Etapa 3 – Caracterização Reológica
Serão realizados ensaios MSCR com réplicas e nas temperaturas de 64°C a 76°C para as amostras recuperadas e envelhecidas em laboratório de acordo com a norma ASTM D 7405-15. Os resultados de compliância de fluência não recuperável (Jnr), porcentagem de recuperação (R), rigidez e taxa de relaxação serão analisados para a verificação do efeito do envelhecimento em cada um dos materiais. Também será determinado o grau PG e PG Contínuo de cada material com réplicas, e geometria de placas paralelas de 25mm de diâmetro e 1mm de distância, nas temperaturas de 64°C a 76°C, para a análise da sua resistência a deformação permanente à altas temperaturas e viscosidade.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até o momento, a pesquisa buscou avaliar a eficiência dos protocolos laboratoriais na simulação do envelhecimento do ligante durante o processo de usinagem, por meio de processos de extração e caracterização reológica do ligante. A partir dos ensaios do grau PG, MSCR e curva mestra, a expectativa é que seja possível observar diferenças entre os ligantes avaliados na pesquisa do ponto de vista de desempenho mecânico dos materiais.

Agradecimentos
Este trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Chamada CNPq/MCTI Nº 10/2023 (Processo nº: 409583/2023-5)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdullah, N. H.; Hamzah, M.O; Golchin, B.; Hasan, M.R.M. An alternative protocol to artificially simulate short-term ageing of binders for selected regional conditions. Construction and Building Materials, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.045.

American Association of State Highway and Transportation Officials, "AASHTO R 30: Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt," 2002.

American Society for Testing and Materials, "ASTM D7643-10. Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for Performance-Graded (PG) Asphalt Binders," 2010.

American Society for Testing and Materials, "ASTM. D2172/D2172M: Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures," 2017

American Society for Testing and Materials, "ASTM. D2872: Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)," 2022

Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2022). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros (2ª ed.). Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA.

Dare, P. D.; Hedaoo, N. Assessment of Removal of Fines from Reclaimed Asphalt Binder Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Advances in Science and Technology Research Journal, 17(4), 79–88, 2023. https://doi.org/10.12913/22998624/169059.

Hemida, A.; Abdelrahman, M.; Deef-Allah, E. Quantitative evaluation of asphalt binder extraction from hot mix asphalt pavement using ashing and centrifuge methods. Transportation Engineering 3 (2021) 100046. https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100046.

Lee, S-J.; Amirkhanianb, S. N.; Kwang, K. W. Laboratory evaluation of the effects of short-term oven aging on asphalt binders in asphalt mixtures using HP-GPC. Construction and Building Materials 23 (2009) 3087–3093. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.03.012.

Mikhailenko, P.; Ataeian, P.; Baaj, H. Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review. Journal of https://doi.org/10.1007/s42947-0081-5

Rosi, B.F.; Faxina, A.L. Caracterização reológica de ligantes asfálticos, 32° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado 2018.

Simonea, A.; Pettinari, M.; Petretto, F. Madella, A. The Influence of the Binder Viscosity on the Laboratory Short Term Aging. Procedia - Social and Behavioral Sciences 53 (2012) 421 – 431.

Sirin, O.; Paul, D.K.; Kassem, E. State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives. Hindawi Advances in Civil Engineering, Volume 2018. https://doi.org/10.1155/2018/3428961.

Vijayan, V.; Mantalovas, K.; Acuto, F.; Di Mino, G. Evaluating the Ageing Sensitivity of the Asphalt Binder via Distinct Ageing Methods. Infrastructures 2023, 8, 163. https://doi.org/10.3390/infrastructures8110163.

Misturas Asfálticas ou com Ligantes Alternativos

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ÍNDICE REOLÓGICO BTSV DE ASFALTOS MODIFICADOS POR BIOMASSA EM COMPARAÇÃO COM ASFALTOS COMERCIAIS

Leni F. M. Leite[1,2], Margareth C. Cravo [2], Luís Alberto H. Nascimento[2], Alexis J. Enríquez-León[1,2], Francisco T. S. Aragão[1]
[1]COPPE/UFRJ, [2]PETROBRAS/CENPES

RESUMO
O objetivo deste estudo é verificar o comportamento de asfaltos modificados por biomassa - AMB, quanto aos índices reológicos BTSV (teste rápido de comportamento reológico de betume) de temperatura alta e intermediária, por meio da comparação com o comportamento de ligantes comerciais - cinco amostras de diferentes origens de cimentos asfálticos de petróleo – CAP e cinco amostras de diferentes classes de asfalto modificado por polímero – AMP, tanto com relação a resistência à deformação permanente, quanto ao trincamento por fadiga e ainda ao envelhecimento de curto prazo. Os AMB apresentam comportamento bem mais viscoso no BTSV de alta temperatura. Os CAP de origem naftênica apresentam comportamento mais próximo aos de AMP, tanto a alta temperatura como a temperatura intermediária. BTSV de temperatura intermediária ainda não foi publicado em normas, mas sua estimativa conduz a resultados interessantes, quando comparados ao comportamento do CAP e AMP em relação à fadiga. Faz-se uma comparação com os resultados dos ensaios LAS, PG e MSCR. O envelhecimento de curto prazo dos ligantes renováveis tem uma trajetória diferente dos ligantes comerciais.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O fornecimento de CAP e o seu preço estão ligados ao preço internacional do petróleo. Mudanças das políticas internacionais em resposta às mudanças climáticas levam ao crescimento de fontes renováveis para geração de energia elétrica que também substituirão combustíveis fósseis em veículos, ocasionando redução no refino de petróleo, e, portanto, redução da produção de CAP, alterando o balanço entre a oferta e a demanda. O emprego de materiais alternativos protege o mercado rodoviário de futuras flutuações de preço. Asfaltos modificados por biomassa - AMB poderão ajudar também a reduzir a pegada de carbono referente à construção de estradas, onde o revestimento se tornará um mecanismo de sequestro de carbono (Van den Kerkhof et al., 2021).

A adição de óleos vegetais (mamona e soja) ao CAP acarreta redução da viscosidade a alta temperatura, aumento no ângulo de fase, redução da resistência a deformação permanente e melhoria na resistência ao trincamento (Chen et al, 2023). Os testes LAS demonstram que o biooléo aumenta a resistência à fissuração por fadiga, indicada pelo aumento dos valores de Nf (Al-Khateeb et al, 2024). Os resultados do reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR indicam que o módulo complexo diminui, o ângulo de fase aumenta e o parâmetro de resistência a deformação permanente dos ligantes diminui com a adição de óleo vegetal de fritura ao CAP. A avaliação do desempenho da fissuração e da deformação permanente das misturas asfálticas com diferentes dosagens de óleo vegetal de fritura (2, 3, 4, 5 e 7% m/m) demonstraram que o óleo melhorou a resistência à fissuração, mas reduziu sua resistência a formação de trilhas de roda (Alkuime et al, 2024).

São sete ligantes AMB a serem tratados neste estudo, seis são constituídos por resíduos asfáltico com teores de até 5% de óleos vegetais e seus derivados, denominados de asfaltos modificados por produtos renováveis e um é 100% vegetal, sendo denominado, bioligante. Foi feita uma comparação entre o comportamento reológico BTSV (Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren - Teste rápido de caracterização de ligante) segundo Schrader et al. (2020) de 17 amostras de ligantes asfálticos: cinco amostras de cimentos asfáltico de petróleo - CAP, (oriundos de diferentes petróleos e processos de produção), cinco amostras de diferentes classes de asfaltos modificados por polímero – AMP e sete amostras de AMB. Foram ainda realizados ensaios relativos a trincas por fadiga, deformação permanente e envelhecimento, empregando ensaios varredura linear de amplitude de deformação (LAS), fluência e recuperação a tensões múltiplas (MSCR), grau PG e BTSV antes e após envelhecimento a curto prazo (estufa de filme fino rotativo).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostras de ligante asfáltico

Foram selecionadas 17 amostras para efetuar a comparação dos valores BTSV:

a) Cinco amostras de CAPs (três de CAP 50/70 e dois de CAP 30/45), um dos CAP 50/70 é oriundo de petróleo naftênico, que apresenta desempenho superior à fadiga e deformação permanente (Becker et al, 2001);

b) Cinco amostras de AMP (uma de 55/75, três de 60/85 e uma de 65/90);
c) Seis amostras de AMB com teores de até 5% de diluentes renováveis no resíduo asfáltico (biodiesel, óleo de palma, cera de carnaúba, óleo de linhaça, monooleato de glicidila e óleo de soja) e ainda uma amostra 100 % vegetal, constituída de resina de pinho e solvente vegetal.

2.2 Métodos de ensaio

As amostras foram submetidas aos ensaios LAS, MSCR e varredura de frequência a diferentes temperaturas para a construção do Espaço Black. Por meio do LAS, foram determinados os parâmetros FFL-PSE. Com os dados do Espaço Black foram obtidos valores BTSV de alta temperatura - ângulo de fase e temperatura BTSV nas amostras virgens e após envelhecimento de curto prazo (estufa de filme fino rotativo -RTFO) (Alisov et al, 2020; Leite et al, 2022). Foram também determinados os valores de BTSV de temperatura intermediária - ângulo de fase e temperatura BTSV nas amostras virgens, ainda em estudo, na Universidade de Braunschweig (Sigwarth, 2024). BTSV de alta temperatura está relacionada ao ponto de amolecimento e ao comportamento a altas temperaturas onde ocorre deformação permanente, enquanto BTSV de temperatura intermediária se relaciona a ocorrência de trincamento por fadiga.

Foi estabelecido um novo teste de caracterização de ligantes, introduzido nas normas alemãs DIN 52050, intitulado "Teste rápido de caracterização de ligante BTSV" Schrader et al. (2020). Utilizando este procedimento, determina-se a temperatura iso-módulo correspondente ao módulo de cisalhamento de 15KPa quando se efetua uma varredura de temperatura na frequência de 1,59Hz, e assim o comportamento reológico de qualquer ligante a alta temperatura é precisamente caracterizado. Outra vantagem deste procedimento é possibilitar distintos dados reológicos em função do grau ou classe de ligante, necessitando de pequena quantidade de amostra num teste rápido e fácil. O teste BTSV já foi realizado em mais de 100 amostras de ligante, sempre com resultados confiáveis, em termos de clareza e diferenciando as características dos ligantes na faixa de temperatura alta, tanto os CAP como os AMP (Koyun et al, 2020; Buchner et al, 2022). Assim sendo, a intenção é que BTSV venha a substituir o gráfico - penetração versus ponto de amolecimento. Exemplifica-se na figura 1a, como determinar o ângulo de fase BTSV - AFBTSV e a temperatura BTSV – TBTSV a partir do módulo de cisalhamento. Na curva módulo versus temperatura, encontra-se a temperatura correspondente ao módulo de 15kPa, e a partir desta temperatura, na curva ângulo de fase versus temperatura, determina-se o ângulo de fase. Verifica-se, que os tipos de CAP estão bem diferenciados, que a temperatura fornece uma indicação de rigidez do ligante e que o ângulo de fase dá uma informação sobre o grau de modificação do AMP. Baixos ângulos de fase são associados a alto grau de modificação, enquanto altos valores de ângulo indicam baixo grau de modificação. Utilizando os dados obtidos em ligantes envelhecidos em diferentes níveis de RTFOT, os efeitos do envelhecimento em TBTSV e AFBTSV podem ser avaliados. A Figura 1b que discrimina os tipos de CAP e AMP no gráfico BTSV de alta temperatura apresenta um exemplo de envelhecimento de CAP 50/70 e AMP 25/55-55, após vários estágios de envelhecimento RTFOT. Ambos os ligantes apresentam uma tendência linear no que diz respeito à mudança nas propriedades reológicas devido ao envelhecimento. Com base nos parâmetros TBTSV e AFBTSV, padrões de envelhecimento podem ser identificados na forma de funções matemáticas, que são vantajosas para classificar os ligantes em termos de suscetibilidade ao envelhecimento.

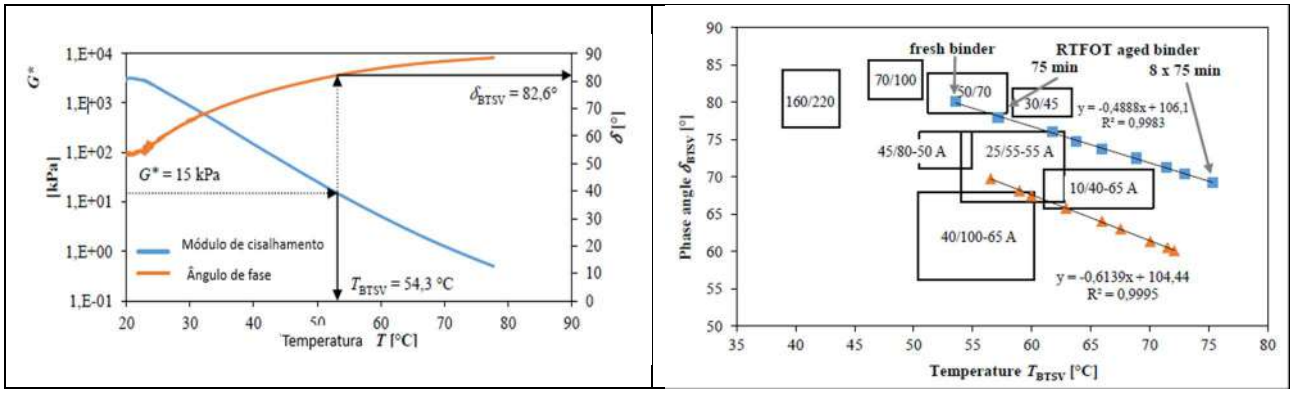


Figura 1: 1a - Determinação de BTSV a partir da isócrona a 1,59Hz de G*= 15 kPa e 1b - Efeito do envelhecimento nos ligantes no gráfico BTSV (Alisov et al, 2018).

O mesmo grupo da Universidade de Braunschweig que desenvolveu BTSV para alta temperatura está estudando agora o parâmetro relacionado ao comportamento reológico a temperatura intermediária. A determinação do AFBTSV e TBTSV de temperatura intermediaria são efetuados da mesma maneira que a de temperatura alta, empregando 5000KPa, como o módulo de cisalhamento dinâmico de temperatura intermediária.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta resultados das 11 amostras comerciais de CAP e AMP e a Tabela 2 apresenta resultados de ensaios das 7 amostras preparadas em laboratório de bioligante e asfalto modificado por óleo vegetal.

Tabela 1: Resultados de amostras comerciais de CAP e AMP

Ensaios	50/70	50/70Naf	30/45	30/45	50/70	55/75	60/85	60/85	65/90	60/85
Pen a 25°C	53	55	35	37	54	43	45	42	45	42
FFL-PSE	1,42	1,7	1,29	1,48	1,34	1,62	1,58	1,68	1,51	1,61
Jnr 3,2, 64°C, Kpa^{-1}	4,3	2,2	1,8	2,1	3,69	0,093	0,23	0,21	0,09	0,21
PG	64-22	70-22	70-16	64-16	64-22	76-22	76-28	76-22	82-22	76-22

A Figura 2a mostra o gráfico BSTV de temperatura alta para as amostras comerciais de CAP e AMP. Verifica-se que CAP, oriundo de petróleo naftênico se apresenta na fronteira entre CAP e AMP, estabelecida pela especificação alemã, publicada em 15/09/23 pelo FGSV, correspondente ao ângulo de fase de 75°, diferenciando os CAP e AMP. A Figura 3b, acrescenta os ligantes renováveis ao gráfico BTSV anterior. Observa-se que o bioligante (100% vegetal) apresenta comportamento próximo ao CAP 50/70, sendo muito viscoso, e os demais AMB tem o comportamento de CAP 50/70, porém menos viscosos que o bioligante. O quadrante inferior direito do gráfico BSTV é o local de materiais com maior rigidez e menor ângulo de fase acarretando melhor resistência a deformação permanente.

Tabela 2: Resultados de 7 amostras preparadas em laboratório de bioligante e asfalto mod. por óleo vegetal

		Asfalto modificado por óleo vegetal e derivados					
Ensaios	Bioligante	Palma	Soja	Biodiesel	Linhaça	Carnaúba	Monooleaato de glicidila
Pen a 25°C	57	37	41	48	40	45	31
FFL-PSE				1,42			
Jnr 3,2, 64°C, Kpa^{-1}	4,39			1,9			0,8
PG	64-10	64-16	64-16	70-16	64-16	64-22	76-16

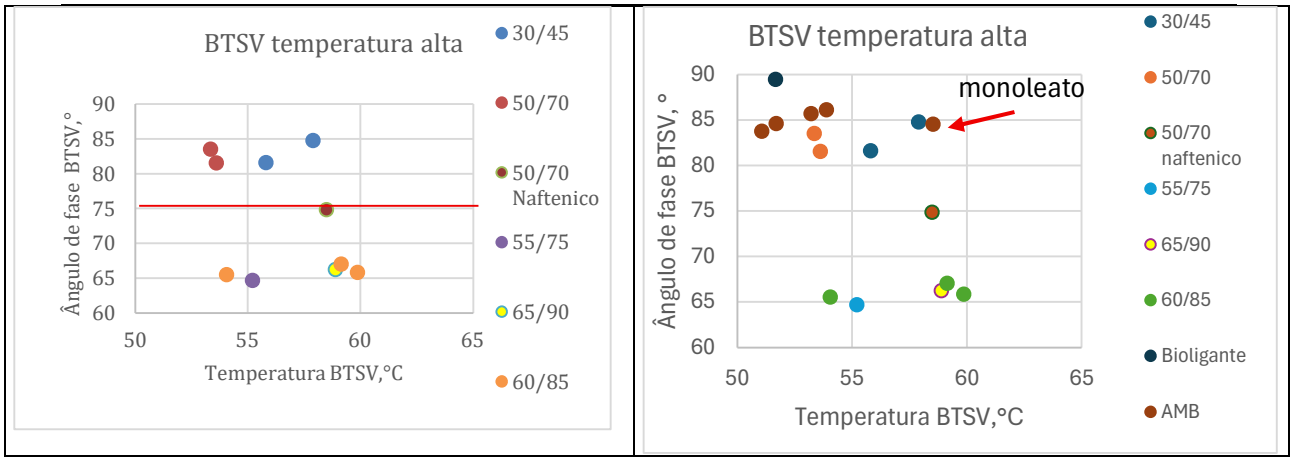


Figura 2: 2a - BTSV de amostras comerciais e 2b - BTSV de com amostras comerciais e AMB

Todos os renováveis a exceção do asfalto modificado por monooleato de glicidila apresentam baixa temperatura BTSV (menor rigidez) e alto ângulo de fase, devendo apresentar menor resistência a deformação

permanente. Vale ressaltar que o ligante com monooleato de glicidila se localizou mais à direita (mais rígido), com PG 76 e Jnr a 64°C de 0,8 kPa^{-1}, confirmando melhor comportamento a resistência a trincas de roda do que CAP 30/45. A Figura 3a mostra o gráfico BSTV de temperatura intermediária para as amostras comerciais de CAP e AMP. Verifica-se que CAP oriundo de petróleo naftênico que é conhecidamente bom ligante tanto para resistência a deformação permanentes, como trincamento por fadiga se apresenta na fronteira entre CAP e AMP, assim como no BTSV de alta temperatura. Sendo a fronteira próxima a linha de 55º de ângulo de fase. O local de boa resistência a fadiga é o quadrante inferior esquerdo (baixo ângulo de fase) e menor rigidez. A Figura 3b, acrescenta os AMB ao gráfico BTSV anterior. Observa-se que o bioligante apresenta comportamento pior que CAP 30/45, sendo muito viscoso, não devendo se desempenhar bem quanto a resistência a fadiga, enquanto os demais AMB apresentam o comportamento próximo ao de CAP 50/70, sendo dois deles (óleo de soja e linhaça) na fronteira de 55ºde ângulo de fase, com baixa temperatura BTSV (baixa rigidez), indicando bom comportamento em relação ao trincamento por fadiga.

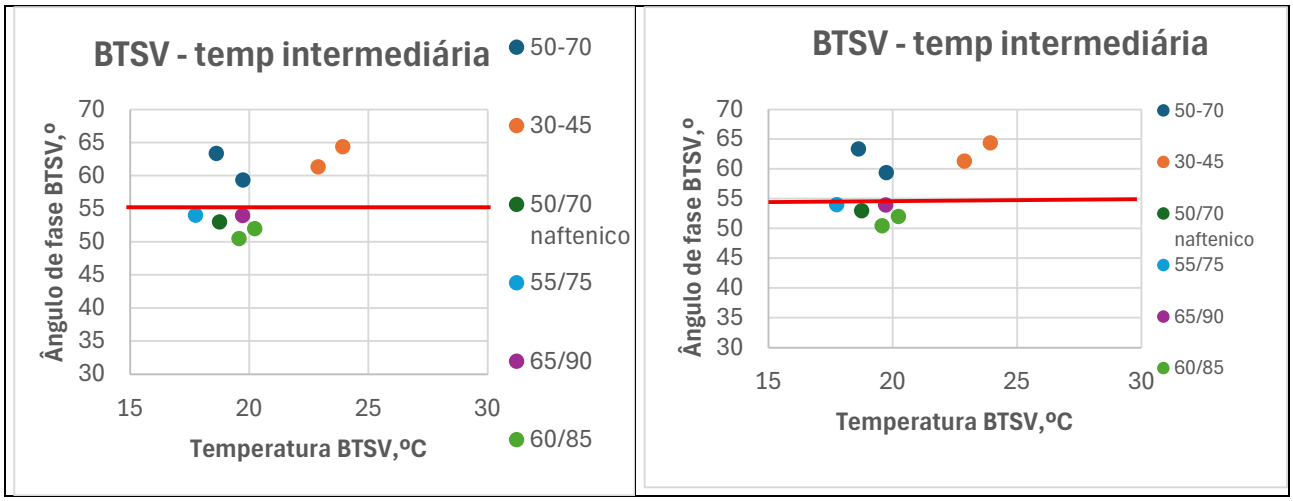


Figura 3: 3a - BTSV de amostras comerciais e 3b - BTSV de amostras comerciais e AMB

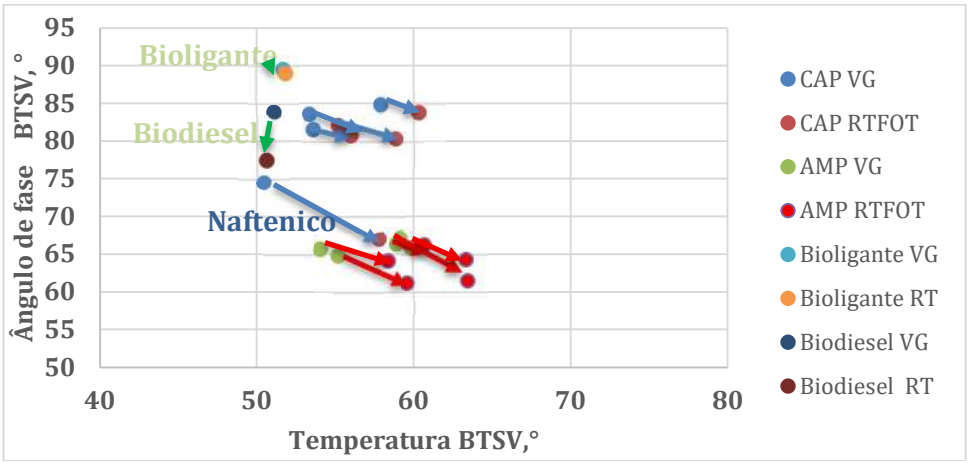


Figura 4: – Trajetória do envelhecimento RTFO no BTSV de alta temperatura

O asfalto modificado por monooleato de glicidila que apresentou PG 76, e teve desempenho semelhante ao CAP 30/45, no gráfico BTSV de alta temperatura devido à alta rigidez, não deve se desempenhar bem em relação a trincas por fadiga. Vale ressaltar que os melhores valores de LAS (FFL-PSE) acima de 1,5 dos asfaltos comerciais estão neste quadrante inferior esquerdo. AMB não foram submetidas ao ensaio LAS, mas em função da posição no quadrante, é de esperar que as misturas de resíduo asfáltico com óleos vegetais de soja e de linhaça que se situam na linha de ângulo de fase 55º conduzam a resultados favoráveis de FFL-PSE. A Figura 4 apresenta a trajetória do envelhecimento RTFO nas amostras comerciais e de duas AMB – bioligante e asfalto modificado por biodiesel. Os asfaltos comerciais apresentam a trajetória (azul para CAP e

vermelha para AMP) já apresentada por pesquisadores de Braunschweig quando envelhecidos em curto prazo, apresentando redução de ângulo de fase e aumento de temperatura (rigidez) (Koyun et al, 2020). CAP naftênico envelhece mais intensamente que os demais CAP, devido sua alta perda em massa e susceptibilidade ao envelhecimento, já conhecida na literatura (Lesueur et al, 2012). No caso dos AMB, verifica-se que a trajetória é pequena (verde) do bioligante (100% vegetal) envelhecendo pouco, no sentido de baixar o ângulo de fase e aumentar a temperatura, enquanto o asfalto modificado por biodiesel, também apresenta menor trajetória (verde), reduzindo o ângulo de fase e a rigidez, diferentemente dos demais ligantes comerciais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Gráfico BTSV de temperatura alta e intermediária foram empregados para comparar desempenho de ligantes comerciais – CAP e AMP com ligantes AMB quanto ao envelhecimento de curto prazo, resistência a deformação permanente e a trincas por fadiga, empregando CAP oriundo de petróleo naftênico como referência, por ser um ligante que apresenta bom desempenho tanto a fadiga quanto a deformação permanente:

- No gráfico de alta temperatura, verificou-se que os AMB se localizam no quadrante superior esquerdo que é uma localização oposta ao bom desempenho quanto a deformação permanente (alta rigidez e baixo ângulo de fase);
- No gráfico de temperatura intermediária, observou-se que os ligantes comerciais com alto FFL-PSE, ou seja, boa resistência a trincamento por fadiga se situam no quadrante inferior esquerdo, sendo o CAP naftênico, mais uma vez divisor de áreas entre os CAP e AMP. Esta região de fronteira foi a posição de dois asfaltos modificados por óleo vegetal (soja e linhaça), indicando boa resistência à fadiga. O bioligante (100% vegetal) se apresentou mais uma vez fora do quadrante favorável, não devendo se comportar satisfatoriamente quanto a fadiga;
- No gráfico de alta temperatura, verificou-se que os AMB não apresentam o mesmo comportamento quanto ao envelhecimento que os ligantes comerciais – o bioligante praticamente se mantem na mesma posição após o envelhecimento RTFOT, alta resistência ao envelhecimento, enquanto o asfalto modificado por biodiesel, também envelhece pouco, reduzindo o ângulo de fase e a temperatura, enquanto os ligantes comerciais aumentam a temperatura ou seja enrijecem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alisov, A., Riccardi, C., Schrader, J., Cannone Falchetto, A., & Wistuba, M. P. (2018). A novel method to characterize asphalt binder at high temperature. *Road Materials and Pavement Design*, *21*(1), 143–155. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1483258A

Al-Khateeb, G.G.; Alattieh,S.A.; Zeiada, W.; Castorena, C. (2024) State-of-the-Art Review on the Behavior of Bio-Asphalt Binders and Mixtures - Molecules 29, 3835.https://doi.org/10.3390/molecules 29163835

Alkuime, H.; Kassem, E;Alshraiedeh, K.A.; Bustanji, M.; Aleih, A.; Abukhamseh, F. (2024) Performance Assessment of Waste Cooking Oil-Modified Asphalt Mixtures. Appl.Sci., 14, 1228. https://doi.org/10.3390/app14031228

Koyun A., Büchner J., Wistuba M.P., Grothe H. (2020) Rheological, spectroscopic and microscopic assessment of asphalt binder ageing, Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2020.1820891

Becker Y., Méndez M., Rodriguez Y., (2001) Polymer modified asphalt Vision Tecnologica / vol. 9 Nº 1

Büchner, J., Ryś, D., Trifunovic, S. & Wistuba, M. P. (2022). Development and Application of Asphalt Binder Relaxation Test in Different Dynamic Shear Rheometers. Construction and Building Materials, Vol. 364, Article 129929. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129929.

Chen C., Lu J., Ma T., Zhang Y., Gu L., Chen X. (2023) Applications of vegetable oils and their derivatives as Bio-Additives for use in asphalt binders: A review, Construction and Building Materials, Volume 383, 2023, 131312, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131312

Koyun A., Büchner J., Wistuba M. P., Grothe H. (2020) Rheological spectroscopic and microscopic assessment of asphalt Binder ageing – Road and Materials and Pavement design DOI: 10.1080/14680629.2020.1820891

Leite, L., Osmari P., Sacramento, F.T.A. (2022) Rheological indexes for asphalt binders considering different aging conditions: Evaluation and correlations with performance Construction and Building Materials 338(3):127549 DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127549

Lesueur, D., Petit, J., & Ritter, H. J. (2012). The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review. *Road Materials and Pavement Design*, *14*(1), 1–16. https://doi.org/10.1080/14680629.2012.743669

Sigwarth T. BTSV –Binder Fast Characterization Test (2024) Webex-Meeting, 16. Mai 2024 Braunschweig University e Federal University of Rio de Janeiro

Van den Kerkhof L., Herrington P. Bitumen Alternatives (2021) Project Number: 5-21295.00 ©WSP New Zealand Ltd

ANÁLISE COMPARATIVA DE ENSAIOS DE DESEMPENHO PARA FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA

Marcos Lamha Rocha[1], **Alexis Jair Enríquez-León**[1], **Bruno Cavalcante Mota**[1], **Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza**[1], **Francisco Thiago Sacramento Aragão**[1], **Luis Alberto Herrmann do Nascimento**[2]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Cenpes/Petrobras

RESUMO
A durabilidade das rodovias depende diretamente da qualidade de suas misturas asfálticas, onde a resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga são fatores críticos. Para superar as limitações dos critérios volumétricos e garantir um desempenho adequado em serviço, busca-se aprimorar os métodos de avaliação laboratorial, desenvolvendo ensaios de desempenho que fornecem parâmetros para caracterizar a resistência do material. Sendo assim, este trabalho investigou uma mistura asfáltica dosada de forma balanceada, caracterizada em três condições volumétricas distintas. O objetivo foi explorar as relações entre ensaios complementares: resistência ao trincamento pelo IDEAL-CT e Fator de Fadiga da Mistura (FFm) do ensaio de fadiga por tração direta; e deformação permanente pelo Flow Number (FN) e Stress Sweep Rutting (SSR). As análises revelaram altas correlações entre o IDEAL-CT e o FFm, e entre o FN e o Rutting Strain Index (RSI), consolidando a validade desses índices para a avaliação do comportamento das misturas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga são fatores críticos que ditam a longevidade do pavimento asfáltico. Historicamente, os métodos de dosagem focaram em critérios volumétricos, como o sistema Superpave, que, apesar de eficaz contra a deformação permanente, frequentemente resultam em misturas com teor de ligante insuficiente, comprometendo a durabilidade e aumentando a suscetibilidade ao trincamento por fadiga. Além disso, a crescente incorporação de materiais inovadores e reciclados expôs outra limitação, pois as propriedades volumétricas por si só são incapazes de prever adequadamente o comportamento mecânico final dessas misturas complexas (West *et al.,* 2018).

A efetividade da Dosagem Balanceada (BMD) reside na avaliação do desempenho da mistura sob diferentes combinações de parâmetros mecânicos. Considerando a necessidade de superar as deficiências dos métodos puramente volumétricos, a comunidade de pavimentação tem buscado abordagens que integrem ensaios de desempenho mecânico. A seleção desses ensaios é crucial, com opções como o Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT), Stress Sweep Rutting (SSR) e Flow Number (FN) para resistência à deformação permanente, e Fadiga por Tensão Direta (TD), IDEAL-CT e Semicircular Bend Test (SCB) para resistência ao trincamento. Esses ensaios fornecem parâmetros que permitem caracterizar a resistência da mistura aos principais mecanismos de deterioração, buscando um equilíbrio efetivo entre estabilidade e durabilidade que os critérios volumétricos isoladamente não podem assegurar (Chowdhury *et al*., 2022; Barros *et al*., 2022).

A utilização de ensaios rápidos na dosagem de misturas asfálticas, que geram esses índices de desempenho, oferece vantagens significativas, especialmente ao otimizar o tempo necessário para projetos. Esses ensaios permitem uma avaliação ágil da resistência da mistura, facilitando a tomada de decisões em projetos com prazos apertados. A simplicidade e a rapidez na obtenção dos índices de desempenho tornam as relações índice-volumetria particularmente útil para controle de qualidade e para situações onde simulações mecanísticas completas não são viáveis. Além disso, a aplicação de índices simplificados na dosagem auxilia na compreensão do comportamento da mistura em relação aos principais modos de falha, permitindo que os projetistas ajustem a composição para atender a requisitos de desempenho específicos de forma mais eficiente e econômica.

Neste contexto, o presente trabalho explora as relações entre diferentes índices obtidos em ensaios mecânicos para misturas asfálticas. Para este fim, foram utilizados dados de uma mistura que foi projetada através de um procedimento de dosagem BMD. O foco principal reside na correlação entre o Índice-CT, obtido pelo ensaio IDEAL-CT, com o FFm, proveniente do ensaio de Fadiga por Tração Direta (TD). Paralelamente, será analisada a relação entre o FN, que avalia a resistência à deformação permanente, e o SSR. Esta análise comparativa visa contribuir para a validação e o aprimoramento das ferramentas de avaliação de desempenho.

2. METODOLOGIA

Para o estudo, foi analisada uma mistura convencional composta por um ligante asfáltico CAP 50/70 e agregados de origem granítica do Rio de Janeiro. A metodologia adotada para o planejamento da mistura seguiu um procedimento de dosagem balanceada baseado em pontos, com o objetivo de otimizar o desempenho da mistura em serviço. Inicialmente, quatro curvas granulométricas foram avaliadas, e a partir dessa análise, três granulometrias distintas (denominadas "a", "b" e "c") foram selecionadas. A seleção dessas granulometrias visou maximizar a variação no Vazios no Agregado Mineral (VAM), garantindo uma exploração abrangente do espaço volumétrico. Para cada granulometria, diferentes teores de ligante foram investigados, permitindo mapear a relação entre o teor de ligante e o volume de vazios. As três condições volumétricas finais foram definidas pela seleção das combinações de teor de ligante e vazios que proporcionassem a maior cobertura do espaço volumétrico em função do VAM e da Relação Betume-Vazios (RBV). Essa abordagem empregou pontos extremos para calibrar modelos de previsão de desempenho, garantindo que cada ponto representasse uma condição única de projeto, combinando estrutura de agregados, teores de ligantes e grau de compactação. A Tabela 1 resume os parâmetros volumétricos de dosagem para os três pontos estudados.

Para a realização dos ensaios de desempenho, os corpos de prova foram compactados em níveis de energia distintos da dosagem para simular as diferentes fases de vida do pavimento. Para os ensaios de deformação permanente (FN e SSR) e IDEAL-CT, adotou-se um grau de compactação de 97,0%, representando a condição da mistura logo após a construção, quando a suscetibilidade à deformação e à umidade é mais crítica. Já para o ensaio de fadiga por tração direta (TD), a compactação foi realizada com 98,5% do grau de compactação, seguindo a norma DNIT 178/2018-PRO.

Tabela 1: Condições volumétricas para os três pontos

Ponto	Granulometria	Vv (%)	Teor (%)	Giros	Parâmetros volumétricos de dosagem	
					VAM	RBV
1	a	3,90	5,20	100	15,2	74,3
2	b	4,00	4,80	100	14,2	71,9
3	c	5,30	4,75	122	15,4	65,7

2.1. Ensaios de desempenho

A resistência da mistura à deformação permanente foi quantificada por meio do ensaio de FN, conduzido a 60°C, conforme a Norma DNIT 184/2018. Neste ensaio, um corpo de prova cilíndrico é submetido a um carregamento uniaxial cíclico com pressão de confinamento. O FN é determinado como o número de ciclos no qual a taxa de deformação axial se torna mínima, antes de entrar na fase de escoamento terciário (acelerado). Portanto, um valor de FN mais elevado indica uma estrutura de agregados mais estável e uma maior capacidade da mistura em resistir à formação de afundamentos de trilha de roda. Adicionalmente, foi empregado o ensaio de Stress Sweep Rutting (SSR), padronizado pela AASHTO TP 134-19. O SSR submete corpos de prova cilíndricos a ciclos repetidos de compressão axial em diferentes níveis de tensão e temperaturas (20°C e 54°C). A partir dos resultados do SSR, pode-se determinar o parâmetro Rutting Strain Index (RSI). O RSI é um índice que quantifica a resistência à deformação permanente da mistura, sendo derivado de um modelo de *shift factor*. Um valor de RSI mais baixo indica maior resistência ao afundamento.

A suscetibilidade ao trincamento por fratura em temperaturas intermediárias foi avaliada pelo Ensaio IDEAL-CT, padronizado pela ASTM D8225 (2019). O ensaio consiste em aplicar uma carga diametral com taxa de deslocamento constante em um corpo de prova cilíndrico, até a sua fratura completa em uma temperatura de 25°C. A partir da curva de carga por deslocamento, calcula-se o Índice-CT, que reflete a capacidade da mistura de dissipar energia e resistir à propagação de fissuras. Um valor de Índice-CT mais alto representa uma mistura com maior tenacidade e, consequentemente, melhor desempenho frente ao trincamento. Além disso, o ensaio de Fadiga por TD também foi utilizado para avaliar a resistência à fadiga utilizando a norma. Neste ensaio, o corpo de prova é submetido a carregamentos cíclicos de tração-compressão na temperatura de 20°C. A partir dos dados obtidos, é possível determinar o parâmetro FFm. O FFm é uma formulação matemática que permite quantificar a resistência da mistura ao dano por fadiga. Um valor maior de FFm indica melhor resistência à fadiga da mistura.

3. RESULTADOS

A Figura 1 exibe os valores obtidos dos ensaios de deformação permanente, correlacionando o RSI com o FN. A análise da figura indica uma tendência decrescente do RSI conforme o FN aumenta, o que é esperado, pois ambos os parâmetros estão relacionados à resistência à deformação permanente da mistura. Um número de FN mais alto sugere maior estabilidade da mistura, e um valor de RSI mais baixo também aponta para uma melhor resistência ao afundamento. A equação de regressão linear com um coeficiente de determinação $R^2 = 0{,}961$ demonstra uma forte correlação linear inversa entre o FN e o RSI. Isso significa que, para as misturas avaliadas, à medida que a resistência ao Flow Number aumenta, a suscetibilidade ao Rutting Strain Index diminui de forma previsível e significativa. No entanto, é importante notar que os valores de Flow Number apresentados na Figura 1 (variando aproximadamente de 90 a 140) podem ser considerados baixos para misturas destinadas a tráfego elevado, considerando critérios como o mínimo de 100 para rodovias de alto volume de tráfego de acordo com Faccin *et al*. (2022).

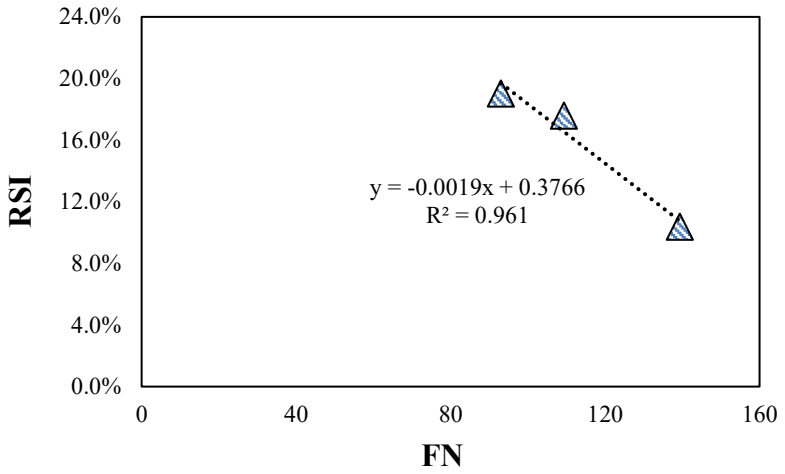


Figura 1: Relação entre o RSI e o FN para as misturas asfálticas avaliadas

A Figura 2 ilustra a correlação entre os resultados dos ensaios de trincamento, relacionando o FFm da fadiga por tração direta com o Índice-CT do ensaio IDEAL-CT. Observa-se uma tendência crescente, onde um aumento no Índice-CT corresponde a um aumento no FFm. Isso é consistente com o esperado, pois ambos os índices são indicadores da resistência da mistura ao trincamento: um Índice-CT mais alto representa uma mistura com maior tenacidade e capacidade de resistir à propagação de fissuras por fratura, e um FFm maior indica melhor resistência à fadiga.

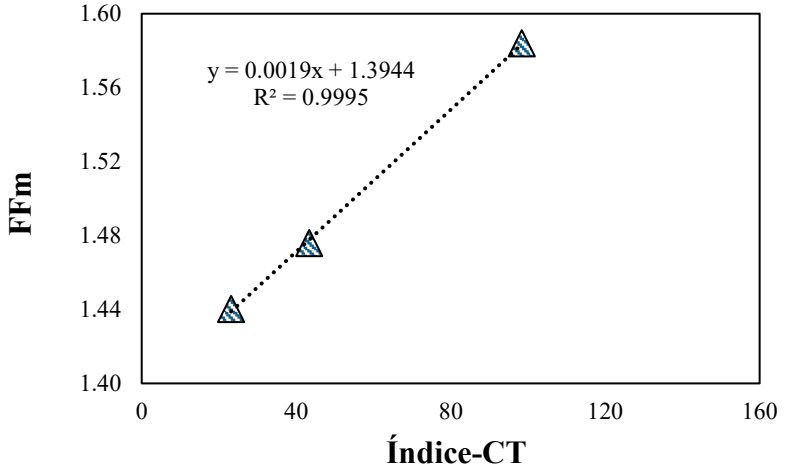


Figura 2: Relação entre o FFm e o Índice-CT para as misturas asfálticas avaliadas

O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9995$ demonstra uma correlação linear direta e extremamente forte entre o Índice-CT e o FFm. Esse valor de R^2 muito próximo de 1 indica que o Índice-CT é um excelente preditor do FFm para as misturas avaliadas, sugerindo que ambos os ensaios capturam de forma consistente a capacidade da mistura de resistir ao trincamento por fadiga.

Para aprofundar a análise de desempenho das misturas asfálticas, incluiu-se uma classificação detalhada dos resultados dos ensaios, correlacionando as classes de desempenho dos ensaios de deformação permanente e de trincamento. A Tabela 2 apresenta essa classificação para os três pontos analisados (1, 2 e 3). Essa categorização foi realizada considerando a adequação de cada mistura para diferentes níveis de tráfego, de acordo com Faccin *et al*. (2021) para Flow Number, Ghanbari *et al*. (2020) para o RSI, Rocha *et al*. (2023) para FFm e Li *et al*. (2023) para o Índice-CT, onde a Classe 1 representa o pior desempenho e a Classe 3, o melhor.

Tabela 2: Classificação de desempenho de acordo com os parâmetros para os três pontos

Ponto	SSR	FN	TD	Ideal-CT
1	1	1	2	2
2	1	2	1	1
3	1	2	1	1

Analisando os resultados de deformação permanente, observa-se que, para o ensaio SSR, todos os três pontos foram classificados como Classe 1. Isso indica que, em termos de resistência à deformação permanente avaliada por este método, as misturas não apresentaram um desempenho considerado ideal para suportar tráfego mais elevado, situando-se na faixa de pior desempenho. Em contrapartida, para o Flow Number (FN), o Ponto 1 foi classificado como Classe 1, enquanto os Pontos 2 e 3 obtiveram a classificação Classe 2. Percebe-se que para os ensaios de deformação permanente, apenas um ponto apresentou classificação diferente (Ponto 1 no FN), enquanto os demais se mantiveram consistentes na Classe 1 para SSR ou Classe 2 para FN.

No que tange aos ensaios de trincamento, para a Fadiga por Tração Direta, os Pontos 2 e 3 foram classificados como Classe 1, e o Ponto 1 como Classe 2. É importante ressaltar que para a classificação do FFm, parâmetro derivado da Fadiga por Tração Direta, a rigidez da mistura também foi considerada em sua avaliação. Finalmente, para o ensaio IDEAL-CT, o Ponto 1 foi classificado como Classe 2, enquanto os Pontos 2 e 3 foram classificados como Classe 1. Percebe-se que ambos os ensaios de trincamento (TD e IDEAL-CT) classificaram as misturas de forma igual, ou seja, para cada ponto, a classificação foi a mesma em ambos os ensaios de trincamento

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo explorar as relações entre diferentes índices obtidos em ensaios mecânicos para misturas asfálticas, utilizando dados de uma mistura projetada via Dosagem Balanceada (BMD). A análise dos resultados de deformação permanente, especificamente a correlação entre Flow Number (FN) e Stress Sweep Rutting (SSR), demonstrou uma forte correlação linear inversa, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9610$. Esses resultados sugerem a consistência entre esses dois métodos na avaliação da resistência ao afundamento. Contudo, é fundamental destacar que os valores de FN e RSI podem ser considerados não adequados para pavimentos de alto tráfego. Essa indicação de desempenho inadequado para tráfego pesado ressalta a importância de critérios rigorosos na dosagem.

Em relação ao trincamento, a correlação entre o Índice-CT proveniente do Ensaio IDEAL-CT e o Fator de Fadiga de Mistura (FFm) da Fadiga por Tração Direta (TD) revelou uma forte e direta relação, com um $R^2 = 0,9995$. Esse resultado indica uma tendência de consistência entre os dois ensaios na caracterização da tenacidade e da resistência da mistura à propagação de fissuras, o que pode respaldar a utilização de um como preditor do outro para as condições experimentais avaliadas. A elevada concordância entre os resultados para a mistura analisada contribui para a percepção de confiabilidade desses índices na avaliação do desempenho ao trincamento.

A classificação de desempenho das misturas permitiu uma visão comparativa dos comportamentos. Observou-

se que, para os ensaios de deformação permanente (SSR e FN), houve uma consistência notável: o SSR classificou todos os pontos como Classe 1 (pior desempenho), enquanto no FN, apenas um ponto (Ponto 1) divergiu, sendo Classe 1, e os demais (Pontos 2 e 3), Classe 2. Quanto aos Ensaios TD e IDEAL-CT, a classificação foi idêntica para cada ponto, evidenciando a concordância entre eles na avaliação da resistência ao trincamento. Essa uniformidade na classificação entre os ensaios de tipos semelhantes de falha é um achado importante para a prática da dosagem.

Em suma, os resultados deste estudo reforçam a relevância de se utilizar um conjunto diversificado de ensaios de desempenho para uma avaliação completa das misturas asfálticas. As fortes correlações estabelecidas entre os pares de ensaios (FN e RSI para deformação permanente; IDEAL-CT e FFm para trincamento) validam a complementaridade dessas ferramentas e a capacidade de um índice ser indicativo do outro. É fundamental, no entanto, interpretar estes altos coeficientes de determinação com cautela, pois as correlações foram estabelecidas com um número limitado de três pontos, o que pode superestimar as relações observadas. As conclusões deste estudo restringem-se à mistura e às condições analisadas, e os resultados obtidos não devem ser generalizados como referência para outras condições. Estudos futuros, com um número maior de misturas e variações volumétricas, estão em andamento como parte de um trabalho mais amplo, buscando confirmar a robustez dessas tendências e ampliar a aplicabilidade dos resultados apresentados.

Agradecimentos
Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), do Cenpes/Petrobras e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2019) Designation: TP 134-19. Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

AASHTO TP (2018) 107 Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test

ASTM (2019) D8225-19. Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature

Barros, L.M., do Nascimento, L.A.H., Aragão, F.T.S., Underwood, B.S. and do Canto Pivetta, F. (2022) Characterization of the permanent deformation of asphalt mixtures based on indexes and on pavement structural performance. Construction and Building Materials, 326, p.126555.

Chowdhury, P.S., Noojilla, S.L.A. and Reddy, M.A. (2022) Evaluation of fatigue characteristics of asphalt mixtures using Cracking Tolerance index (CTIndex). Construction and Building Materials, 342, p.128030.

DNIT (2018) Norma DNIT 178/2018 - PRO. Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall - Procedimento. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018) Norma DNIT 184/2018 - Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente - Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Faccin, C., Specht, L.P., Schuster, S.L., Boeira, F.D., Bueno, L.D., Brondani, C., Pereira, D.D.S. and Nascimento, L.A.H.D (2021) Flow number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes applied in brazil southern region, Inter. J. Pavement Eng. 22, 1-13.

Li, N., Hao, P., Yao, Y. and Zhang, C. (2023) The implementation of balanced mix design in asphalt materials: A review. Construction and Building Materials, 402, p.132919.

Rocha, M.L., Aragão, F.T.S., Nascimento, L.A.H.D. and Underwood, B.S. (2023) Balanced mixture design framework for asphalt mixtures based on index-and performance-volumetrics relationships. Transportation Research Record, 2677(10), pp.233-245.

West, R., Rodezno, C., Leiva, F. and Yin, F. (2018) Development of a framework for balanced mix design. Project NCHRP, pp.20-07.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FUNCIONAIS DA CAMADA POROSA DE ATRITO SOB DIFERENTES CONCEPÇÕES DE PROJETO

Thiago Lucena Dias[1], Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena[1], Maria Eloísa Barbosa da Silva[1], Mariana Silva Nascimento[1], Alcidney Batista Celeste[1], Osires de Medeiros Melo Neto[2]
[1]Universidade Federal de Campina Grande, [2]Universidade Federal de Lavras

RESUMO
Para a implementação de um melhor sistema de gestão das águas pluviais e um meio de transporte sustentável, uma das técnicas que vem conquistando o interesse da comunidade internacional são os pavimentos permeáveis. Estes atuam como superfície pavimentada para o tráfego e como um sistema de manejo pluvial. No Brasil, destaca-se a Camada Porosa de Atrito (CPA) como revestimento permeável, cuja elevada porosidade potencializa a infiltração hídrica. Todavia, os normativos técnicos exigem o atendimento de propriedades mecânicas, considerando a durabilidade. O objetivo deste artigo foi avaliar, mediante ensaios mecânicos e funcionais, propriedades estruturais e funcionais de misturas CPA sob distintas concepções de projeto, combinando uma faixa granulométrica pré-estabelecida com diferentes teores de ligante. Os resultados mecânicos e funcionais indicaram a mistura com 4,5% de ligante asfáltico e 19,9% de volume de vazios, segundo a Faixa Granulométrica II do DNIT como a mais econômica e com melhor desempenho mecânico e funcional.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos deletérios da ação antrópica relativa ao meio ambiente, associados à desordenada ocupação de áreas em risco e à intensa impermeabilização do solo urbano, facilitam o surgimento de muitos problemas referentes à drenagem urbana e a alterações nas fases do ciclo hidrológico (McGrane, 2016; Sun; Lotz; Chang, 2017; Talib; Randhir, 2017; Nuernberg, 2021). A redução da permeabilidade do solo, bem como o acréscimo do volume de escoamento superficial, com a consequente redução do tempo de pico dos hidrogramas e o maior risco de inundações são alguns dos eventos decorrentes (Butler et al., 2018; Nuernberg, 2021).

Estes incidentes se intensificam, sobremaneira, no Brasil, cuja ocorrência de chuvas intensas e de curta duração é frequente, dada a sua majoritária localização em zona tropical. Estes fenômenos, associados às ações antrópicas supracitadas, são responsáveis pelas constantes inundações e demais calamidades que têm assolado a população nos últimos anos, ocasionando perdas humanas e prejuízos sociais, econômicos e ambientais, o que denota, entre outros, a falta de planejamento urbano por parte dos poderes públicos e órgãos competentes. Casos emblemáticos ocorreram recentemente (2022) nas cidades de Petrópolis/RJ, Recife/PE, Jaboatão dos Guararapes/PE, bem como em Porto Alegre/RS (2024). Nesse sentido, uma das maneiras de mitigar os efeitos elencados é projetar cidades cujos pavimentos viabilizem a infiltração de água em vez de escoá-la.

Os pavimentos permeáveis são dispositivos de dupla função, atuando como superfície pavimentada para o tráfego de veículos e como um sistema funcional de manejo de águas pluviais. Dentre as tipologias de revestimento do pavimento permeável destacam-se as porosas, as quais permitem a infiltração de água por entre seus poros. No Brasil, um dos seus exemplos são as misturas asfálticas porosas ou asfalto drenante, conhecidas como Camadas Porosas de Atrito (CPA). Normalmente, ao projetar um pavimento, atenta-se à sua função estrutural, negligenciando, no entanto, os aspectos funcionais relativos às propriedades hidráulicas, como a permeabilidade, capacidade de infiltração, bem como o potencial de retenção hídrica. Embora alguns desses atributos sejam conflitantes entre si, a busca por otimizá-los se torna premente (Piarc, 2013; Kolodziej, 2016). Alber et al. (2020) afirmam que as vantagens da drenagem da CPA baseiam-se na infiltração da água na estrutura porosa e sua percolação pelos vazios da mistura, reduzindo os riscos de aquaplanagem e pulverização e aumentando a segurança do tráfego pelo usuário. Assim, a probabilidade de ocorrência dos inconvenientes supracitados é minimizada mediante um maior tempo de encharcamento, intervalo contido entre o início da chuva e o começo da formação da lâmina d'água na superfície do pavimento.

Ademais, até certo ponto, a água pode permanecer retida dentro da estrutura porosa dos pavimentos, reduzindo a descarga destes, bem como aliviando as instalações de drenagem urbana, fato que minimiza os riscos de inundações (Pagotto et al., 2000). Esse atributo funcional é denominado de capacidade de retenção de água, menos difundido em relação aos parâmetros de infiltração e permeabilidade (Alber et al, 2020). Logo, a busca pela maximização desse atributo do pavimento, sem, no entanto, negligenciar os demais aspectos funcionais, além de garantir o atendimento aos requisitos estruturais preconizados, é um desafio atual que pode reduzir os riscos associados a inundações em áreas vulneráveis. Os normativos vigentes exigem que se construam vias e

rodovias que satisfaçam aos critérios tanto estruturais quanto funcionais, ou seja, projetos que assegurem as condições de segurança e conforto aos usuários, com a redução dos ruídos e o adequado manejo das águas. Dado o exposto, objetivou-se neste artigo a avaliação de distintas concepções de projeto de misturas CPA, determinando a proposição mais assertiva, associada ao teor ótimo de ligante e faixa granulométrica que atendam aos requisitos mecânicos e funcionais supracitados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico descreve os materiais e procedimentos realizados durante a fase experimental da pesquisa. Os materiais utilizados para confecção das misturas CPA foram o Asfalto Modificado por Polímero (AMP 55/75), agregados graúdos (19mm e 12,5 mm) e miúdos (pó de pedra). A cal hidratada foi utilizada como fíller. Realizaram-se os ensaios de caracterização (Tabela 1) com o intuito de avaliar a conformidade dos materiais em relação às normativas vigentes. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios.

Tabela 1: Resultados da caracterização física e reológica do ligante asfáltico e dos agregados

RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO AMP 55/75				
ENSAIO		**NORMA**	**LIMITES**	**RESULTADO**
Penetração (0,1 mm)		(ABNT NBR 6576,2007)	50 a 70	61,75
Viscosidade rotacional (cp):	135°C	(ABNT NBR 15184, 2021)	> 274	821,3
	150°C		> 112	407,1
	177°C		57 a 285	153,7
Ponto de amolecimento (°C)		(ABNT NBR 6560, 2016)	> 46	56,5
Recuperação elástica, 20cm, 25°C (%)		(ABNT NBR 15086, 2006)	75	85
Performance Grade (PG) (KPa)		(ASTM D6373, 2016)	> 1,0	70
MSCR (%)	$R_{0,1}$(%)	(ASTM D7405, 2015)	< 75	75
	$R_{3,2}$(%)			62,03
	R_{diff}(%)			17,30
	$Jnr_{0,1}$(KPa^{-1})		-	0,468
	$Jnr_{3,2}$(KPa^{-1})		-	0,752
	Jnr_{diff}(%)		< 75	60,56

RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRANÍTICOS					
ENSAIO	**NORMA**	**LIMITE**	**Brita 19”**	**Brita 12,5’’**	**Pó de pedra**
Abrasão Los Angeles (%)	(DNIT ME 035, 1998)	Máx, 50	18,5	20,4	-
Absorção (%)	(DNIT ME 081, 1998)	-	0,13%	0,29%	0,73%
Índice de Forma	(DNIT ME 086, 1994)	Mín, 0,5	0,653	0,649	-
Massa específica aparente (g/cm^3)	(DNIT ME 413, 2019)	-	2,76	2,75	2,65
Massa específica real (g/cm^3)	(DNIT ME 413, 2019)	-	2,77	2,77	2,71

A distribuição granulométrica dos agregados apresentou-se como graduação aberta, se enquadrando na Faixa II (DNER 386/1999) que estabelece um intervalo de volume de vazios entre 18 e 25%. O projeto da mistura asfáltica foi desenvolvido para os teores de ligante de 4.0, 4.5 e 5.0% correspondendo, respectivamente, a 21.9, 19.9 e 19.6% de vazios. As amostras foram moldadas utilizando o compactador giratório SUPERPAVE com 100 giros, pressão vertical de 600 KPa, ângulo de giro 1,25±0,02° e velocidade de giro de 30 rpm.

A análise de desempenho mecânico teve como finalidade analisar os atributos estruturais das misturas porosas. Foram analisadas as seguintes propriedades: Resistência à Tração Indireta (RTI), Módulo de Resiliência (MR), Dano por Umidade Induzida e Perda de Massa pelo Ensaio de Cântabro, conforme estabelecido nas normas DNIT 136/2018, DNIT 135/2018, DNIT 180/2018 e DNIT 383/1999, respectivamente. Os resultados apresentados correspondem à média dos valores obtidos em três corpos de prova.

Os atributos funcionais foram analisados com ensaios hidrológicos/hidráulicos para identificar o projeto de

mistura ideal. Os ensaios realizados foram condutividade hidráulica (Souza, 2008), capacidade de infiltração (ASTM D3385, 2003), capacidade de retenção (Alber *et al*., 2020) e tempo de encharcamento.

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados referentes ao programa experimental adotado.

3.1. Análise mecânica

Os resultados relativos aos ensaios mecânicos propostos constam apresentados na Figura 1.

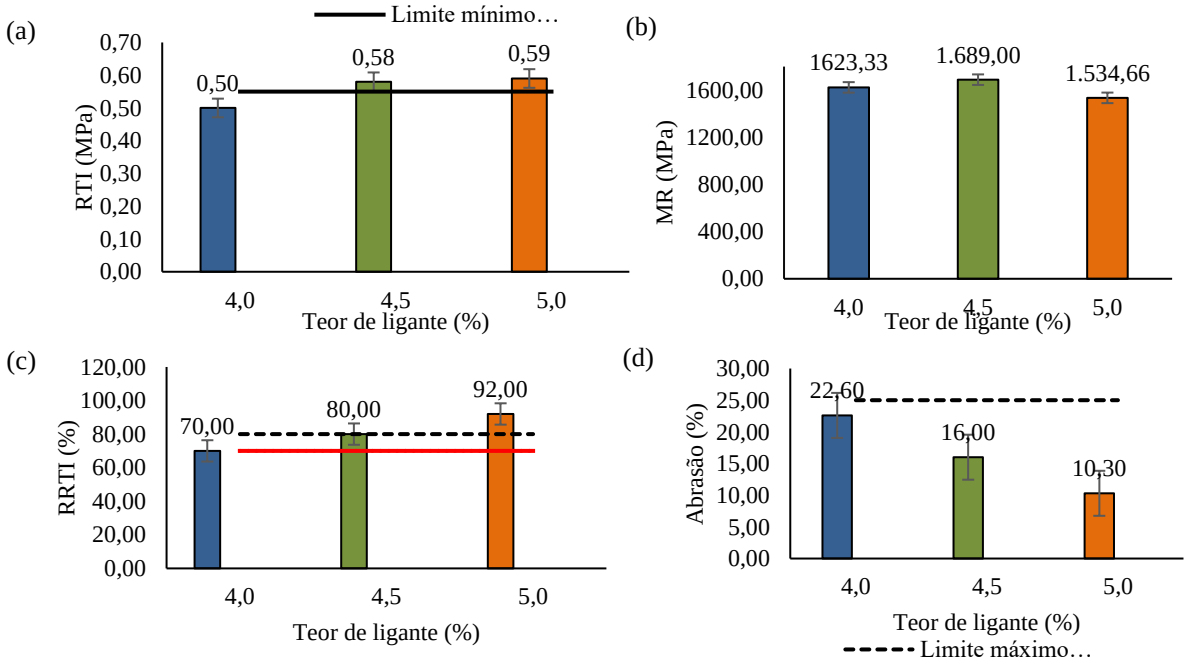


Figura 1: Resultados dos ensaios mecânicos: a) resistência à tração indireta, b) módulo de resiliência, c) dano por umidade induzida e d) perda de massa por Cântabro

Os teores de ligante atenderam à norma DNER 386/1999, no tocante à RTI, à exceção do teor de 4,0%, cujo resultado foi inferior ao mínimo estipulado (0,55 MPa). Verificou-se um crescimento da RTI à medida que mais ligante asfáltico foi incorporado às misturas (Figura 1a), tornando-as menos secas, menos vulneráveis à tração indireta. O teor de 4,5% apresentou o maior valor de MR (Figura 1b), conferindo maior capacidade resiliente, em oposição ao teor de 5,0%, que dispôs do menor valor de módulo, como resposta à maior lubrificação das partículas da mistura. Todavia, a norma supracitada não estabelece limites de rigidez para misturas CPA. Acerca do resultado de RRTI (Figura 1c), os teores atenderam aos limites preconizados pela NBR 15617 (2015) e pela ASTM 7064 (2013), aumentando a resistência à água à medida que houve acréscimo no teor de ligante, em virtude de uma maior homogeneidade e menor porosidade das misturas. O ensaio de abrasão permitiu desempenhos satisfatórios de desgaste, cujo limite máximo segundo a DNER (1999) é de 25%. Os teores de 4,0% e 5,0% apresentaram o maior e menor desgaste, respectivamente (Figura 1d). Uma maior quantidade relativa de ligante asfáltico impediu a desagregação de partículas perante a abrasão.

3.2. Análise hidráulico/hidrológica

Os resultados referentes aos ensaios hidráulicos/hidrológicos são apresentados na Figura 2. A mistura com teor de ligante de 4,0% apresentou o maior coeficiente de condutividade hidráulica (Figura 2a), ao passo que o menor resultado correspondeu ao teor de 5,0%, corroborando os resultados mecânicos, uma vez que uma maior porosidade em misturas CPA (baixos teores de ligante) otimiza a capacidade de percolação. Logo, tanto maior a função drenante do pavimento, quanto maior for o coeficiente de permeabilidade associado.

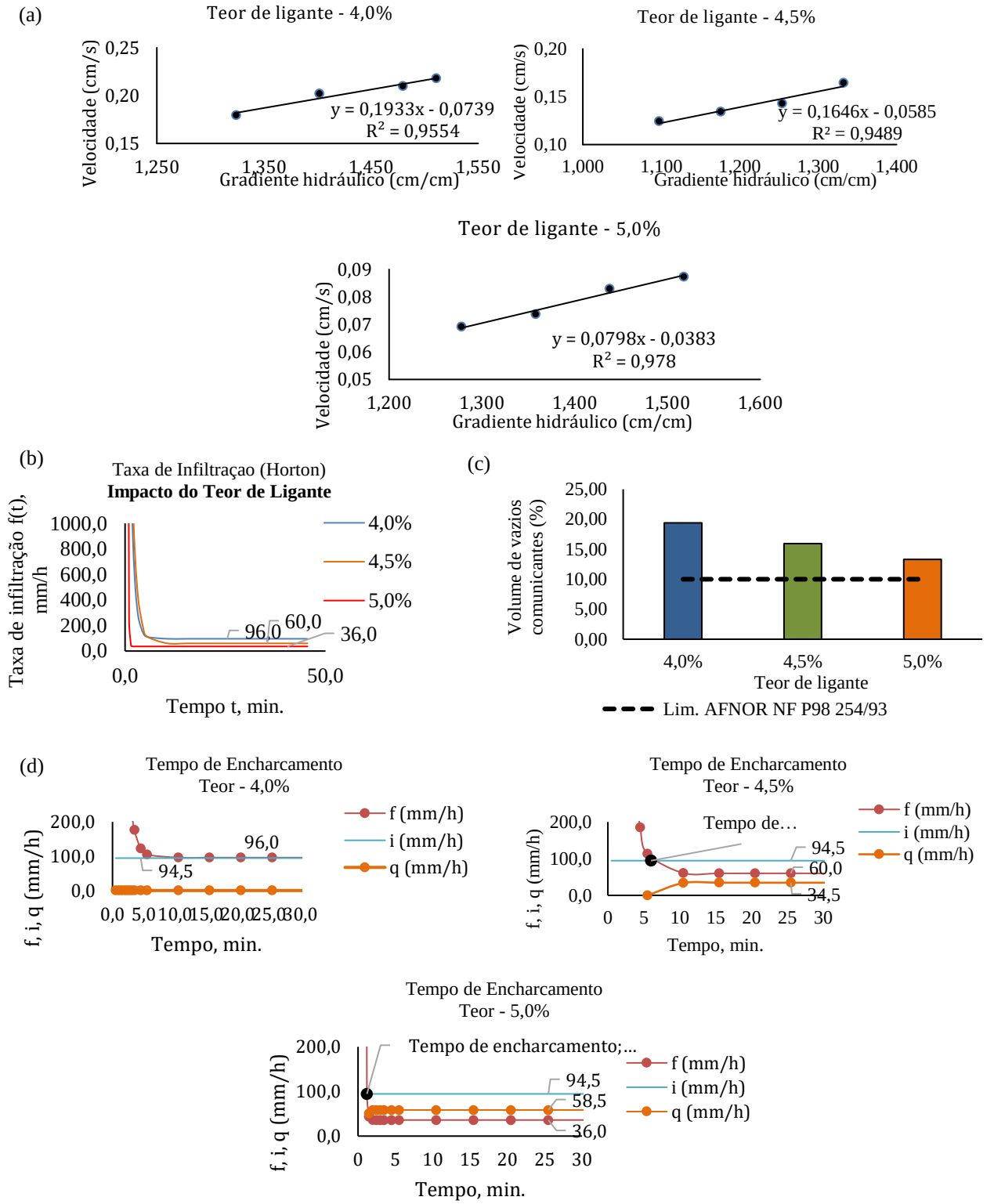


Figura 2: Resultados dos ensaios hidráulicos/hidrológicos: a) condutividade hidráulica, b) capacidade de infiltração, c) capacidade de retenção e d) tempo de encharcamento

Mediante a realização do ajuste da curva de infiltração, denominada Curva Horton (Figura 2b), conforme Bazzo e Horn (2017), depreende-se a alta magnitude da Taxa de Infiltração (TI) no início do processo, atingindo valores aproximadamente constantes (VIB). A TI é intrinsecamente relacionada à textura e estrutura do meio poroso, de modo o teor de 4,0% proporcionou maior TI, bem como maior valor de VIB (96,0 mm/h), em detrimento da mistura menos porosa (teor de 5,0%). Um valor intermediário foi alcançado pelo teor de

4,5%. Evidenciou-se o atendimento de todas as misturas ao limite mínimo de volume de vazios comunicantes (10%) (AFNOR NF P 98 254-2, 1993), bem como o maior resultado para a mistura relativa ao teor de 4,0% (Figura 2c), cujo coeficiente de permeabilidade também é máximo, corroborando a inferência de maior capacidade de retenção hídrica dessa mistura, sendo este um aspecto funcional relevante. Observou-se, ainda, os menores resultados referentes à mistura porosa com teor de 5,0%. No tocante ao ensaio de tempo de encharcamento, admitiu-se uma chuva na cidade de Campina Grande (parâmetros locais da curva IDF: a=334; b=0,227; c=5; n=0,596) com tempo de retorno de 10 anos e duração de 15 minutos. A mistura com teor de 4,0% não obteve indícios de tempo de encharcamento, por possuir maior porosidade. Um resultado satisfatório (6,01min) foi obtido pela mistura com teor de 4,5%, em detrimento do teor 5,0%, cujo tempo de encharcamento foi inferior (1,19min), potencializando, possivelmente, a ocorrência de processos de alagamentos e inundações.

4. CONCLUSÕES

As misturas porosas estudadas seguiram a tendência apresentada por outros estudos, dispondo de desempenhos mecânicos aceitáveis e atributos funcionais coerentes com as respectivas concepções de projeto. A mistura porosa confeccionada com o teor de 4,5% de ligante asfáltico e 19,9% de volume de vazios, segundo a Faixa Granulométrica II do DNIT, consistiu na concepção de projeto mais econômica, por conferir redução da quantidade de ligante em relação ao máximo teor estudado, ao passo que dispôs de desempenhos mecânicos e funcionais efetivos, validando o seu emprego como camada de revestimento em pavimentos permeáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFNOR NF-P98-254-2, A. F. D. N. (AFNOR). ***Essais relatifs aux chaussées - Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés - Partie 2: détermination du pourcentage de vides communicants des matériaux liés***. [S.l.]: [s.n.], 1993.

ALBER, S.; RESSEL, W.; SCHUCK, B. *Explaining drainage of porous asphalt with hydrological modelling*. **International Journal of Pavement Engineering**, 2020. v. 0, n. 0, p. 1–11.

BAZZO, J. A.; HORN, P. L. (2017) **Calibração do Modelo Matemático de Infiltração de Horton em Pavimento de Concreto Tipo Blocos Intertravados**. [S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BUTLER, D.; C. DIGMAN; C. MAKROPOULOS e J. W. DAVIES (2018) *Urban Drainage* (4ª. ed.). Boca Raton: CRC Press.

KOLODZIEJ, V. M. (2016). ***Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos***. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

MCGRANE, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. **Hydrological Sciences Journal**. v. 61, n. 13, p. 2295–2311.

NUERNBERG, J. K. (2021). ***Proposta de Modelagem de Pavimentos Permeáveis do Tipo C como Sub-Bacias Regulares Equivalentes***. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; CLOIREC, P. LE. (2000). *Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement*. **Water Research**. v. 34, n. 18, p. 4446–4454.

PIARC (WORLD ROAD ASSOCIATION) (2013). Quiet Pavement Technologies. **Technical Committee D.2 Road Pavements**. p. 3.

SUN, Z.; LOTZ, T.; CHANG, N. Bin. (2017). *Assessing the long-term effects of land use changes on runoff patterns and food production in a large lake watershed with policy implications*. **Journal of Environmental Management**. v. 204.

TALIB, A.; RANDHIR, T. O. (2017). Climate change and land use impacts on hydrologic processes of watershed systems. **Journal of Water and Climate Change**. v. 8, n. 3, p. 363–374.

Thiago Lucena Dias (thiago.lucena.dias@gmail.com)
Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena (ledach@uol.com.br)
Maria Eloísa Barbosa da Silva (mmariaeloisabs@gmail.com)
Mariana Silva Nascimento (mariana.s.nascimento@estudante.ufcg.edu.br)
Alcidney Batista Celeste (alcidney@yahoo.com.br)
Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), Campus Sede – CEP 58429-900 – Campina Grande, PB, Brasil
Osires de Medeiros Melo Neto (osiresdemedeiros@gmail.com)
Universidade Federal de Lavras, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia, Aquenta Sol - Campus Universitário - CEP 37200-000 - Lavras, MG, Brasil

REPRODUTIBILIDADE DA METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DE AMOSTRAS DO TIPO ARGAMASSA AREIA ASFALTO (AAA)

Pamella Parreira de Miranda, Karolayne Peres de Melo, Êmine Luara Neres Santos, Lilian Ribeiro de Rezende
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Esta pesquisa consolidou um método para confeccionar corpos de prova (CP) constituídos por uma combinação de ligante asfáltico e areia de Ottawa, resultando amostras do tipo Argamassa Areia Asfalto (AAA) e analisar a espessura do filme de ligante (FT). Para isso foram utilizados CPs do tipo AAA compostos por diferentes tipos de ligantes asfálticos: CAP 30-45, CAP 50-70, AMP 60-85 e AB-08, em três teores de ligante (6%, 8% e 10%). Foram obtidas imagens com um Microscópio Óptico Digital para a obtenção dos valores de FT e, posteriormente, analisadas no software ImageJ-Fiji. Os resultados foram avaliados em termos de mediana dos valores medidos de FT, apresentando valores inferiores a 100µm, validando a representação mais realista de FT nesse tipo de amostra.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho e a durabilidade dos pavimentos rodoviários no Brasil, país cujo transporte é prioritariamente rodoviário, são fatores determinantes para a infraestrutura e a economia nacional (CNT, 2024). A deterioração dos pavimentos, frequentemente manifestada por deformações permanentes e fissuração por fadiga, demanda uma compreensão aprofundada das propriedades dos materiais asfálticos em múltiplas escalas, uma abordagem que é essencial para garantir a qualidade construtiva e a longevidade estrutural das rodovias.

Nesse contexto, a investigação do comportamento do ligante asfáltico em microescala tem se revelado particularmente relevante, considerando que o uso de *Sand Asphalt Mortar* (SAM), ou Argamassa Areia-Asfalto (AAA), surge como uma ferramenta metodológica promissora para tal finalidade (Kim *et al*., 2004; Kommidi *et al*., 2020; Rezende *et al*., 2021). Constituída exclusivamente por ligante asfáltico e areia padronizada de Ottawa, de granulometria uniforme, a AAA apresenta vantagens significativas, como a reprodutibilidade dos ensaios e a possibilidade de isolar os efeitos do ligante asfáltico, eliminando variáveis associadas às características granulométricas e mineralógicas dos agregados. Adicionalmente, a confecção de amostras de dimensões reduzidas confere ao método um caráter prático e econômico para simulação de condições representativas das misturas asfálticas convencionais.

Dentre os parâmetros microestruturais relevantes, destaca-se a espessura do filme de ligante (FT), inicialmente definido como a relação de volume de asfalto não absorvido pelas partículas de agregado e sua área equivalente (Radovskiy, 2003). Em contraste com os ensaios reológicos convencionais realizados em Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), que operam com amostras de ligante puro de aproximadamente 2 mm, a FT observada em misturas asfálticas completas varia, em geral, entre 2 e 100 µm (Karim and Hussain, 2021; Vieira *et al*., 2021). Radovskiy (2003) considera o efeito da compactação e definiu a FT como a menor distância entre o ar e a superfície da partícula, assumindo espessura uniforme. A determinação da FT pode ser realizada por métodos teóricos ou, com maior precisão, por meio de técnicas experimentais baseadas em microscopia e processamento digital de imagens (Jiang *et al*., 2020).A microscopia ótica digital (MD), tem se consolidado como alternativa viável e de baixo custo para a mensuração de FT, proporcionando adequada repetibilidade e a possibilidade de menor interferência do operador (Enríquez-León *et al*., 2021). Embora a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) proporcione maior resolução, estudos indicam que os valores obtidos por MD em amostras de AAA podem ser ajustados para correlação com resultados de MEV em misturas asfálticas convencionais, ainda que a obtenção de imagens por MD possa ser dificultada por artefatos como fibras do tecido de apoio ou variações de luminosidade, que são mitigadas com o uso de suportes tridimensionais para estabilização do microscópio (Miranda *et al.*, 2024; Curado *et al.*, 2025).

Outro parâmetro microestrutural relevante é o volume de vazios (Vv), normalmente determinado por meio de pesagem hidrostática. Amostras de AAA compactadas manualmente tendem a apresentar Vv relativamente elevados (entre 17,7% e 25,8%), em comparação aos valores típicos de misturas asfálticas completas (3% a 5%) (Vieira *et al.*, 2021). Apesar dos avanços metodológicos recentes, ainda não há consenso consolidado quanto à padronização da confecção de amostras de AAA que assegure homogeneidade e representatividade quanto às propriedades microestruturais. Tal padronização é essencial para ampliar o uso da AAA em estudos

reológicos, permitindo a obtenção de parâmetros mais realistas e reprodutíveis para a caracterização de misturas asfálticas. Pesquisas recentes têm contribuído nesse sentido, incluindo a proposição de um equipamento e processo de compactação manual, com patente registrada, em que resultados preliminares indicam que o teor de ligante de 6% promove maior homogeneidade da FT nas amostras (Rezende *et al*., 2023; Miranda *et al*., 2024).

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo principal reproduzir e validar uma metodologia para a confecção de corpos de prova de Argamassa Areia-Asfalto (AAA), utilizando ligante asfáltico e areia padronizada de Ottawa, e analisar a espessura do filme de ligante nessas amostras. Para tanto, o estudo contempla a descrição dos materiais e a replicação do protocolo de compactação utilizados os estudos de Rezende *et al*., (2023), Miranda *et al*. (2024); Curado *et al*. (2025), a avaliação do volume de vazios e da espessura do filme de ligante por meio de técnicas de microscopia digital e processamento de imagens, bem como a análise estatística dos resultados de FT, visando aferir a homogeneidade, a confiabilidade e a reprodutibilidade do método baseado na análise do FT e os efeitos dos teores de ligante. Espera-se que este trabalho contribua de forma significativa para a padronização e o avanço das pesquisas voltadas à caracterização microestrutural de materiais asfálticos.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

Nesta pesquisa, foram exploradas doze misturas AAA que empregam areia de Ottawa (ASTM, 2015), combinada com quatro tipos de ligantes asfálticos (Tabela 1), sendo dois tipos de cimento asfáltico de petróleo (CAP 30-45 e CAP 50-70), um ligante modificado por polímeros elastoméricos (AMP 60-85) e outro com asfalto borracha (AB-08). Os teores de ligante variaram em 6%, 8% e 10% visando verificar a interferência do teor no FT. As amostras analisadas foram compactadas seguindo a metodologia utilizada em estudos anteriores (Miranda *et al*., 2024; Curado *et al*., 2025;), com volume de vazios variando entre 17,7% e 25,8%, empregando os equipamentos e método descritos na patente BR 10 2023 025702-0 (Rezende *et al*., 2023).

Tabela 1: Caracterização dos ligantes asfálticos

Ensaio	CAP 30/45	CAP 50/70	AMP 60/85-E	AB-08
Massa específica (g/cm³)	1,006	1,002	1,002	1,020
Ponto de amolecimento (°C)	49	52	68	57,5
Penetração (mm)	57	31	55	4,4
Viscosidade Brookfiel a 135°C (cP)	330	450	767	-
Viscosidade Brookfiel a 150°C (cP)	159	217	386	-
Viscosidade Brookfiel a 170°C (cP)	60	77	150	-
Viscosidade Brookfiel a 175°C (cP)	-	-	87	1655
Ponto de fulgor (°C)	278	332	305	280

Foram produzidos quatro CPs por teor de ligante e tipo de mistura, exceto para a mistura CAP 50-70 com 10% de asfalto, com três CPs. As amostras foram cortadas com a utilização de uma serra de baixa rotação (máximo 400 rpm) com disco diamantado de 0,7 mm de espessura. O processo de corte realizado em duas alturas, resultou em amostras para o topo, meio e base, e analisadas em duas faces, totalizando 282 análises.

2.2. Métodos

2.2.1. Obtenção da Espessura do Filme de Ligante

A FT nos CPs do tipo AAA foi analisada por imagens obtidas com o Microscópio Óptico Digital (ampliação de até 1600 vezes), com seis capturas por CP em escala milimétrica precisa. Para determinar FT, as imagens foram tratadas no software ImageJ-Fiji, seguindo a metodologia proposta por Vieira *et al*. (2021). As etapas consistem em identificação de vazios, segmentação do ligante e dos agregados e aplicação de uma máscara com linhas horizontais espaçadas por 1 pixel para a realização da medição automatizada da FT. Alguns parâmetros são obtidos, como “Feret” e “θ”, fornecidos pelo programa como o “Ângulo de Feret”. A espessura do filme de ligante que envolve cada agregado foi calculada utilizando a Equação 1 e tomando-se metade de cada distância medida (Rezende *et al*., 2021).

$$FT = \frac{Feret * cos\ (180 - \theta)}{2} \quad (1)$$

Onde: FT: espessura do filme paralelo ao eixo de leitura das linhas; θ: ângulo formado entre o segmento de reta e o eixo de leitura da imagem; Feret: parâmetro do software.

Com os dados obtidos no software ImageJ, foram calculados os valores de FT médios, das medianas, máximos, mínimos e o desvio padrão de cada região da amostra. Miranda *et al*. (2024) observou que a utilização dos valores das medianas de FT melhor representam a distribuição de dados, devido a existência de variações dos resultados (Morettin and Bussab, 2010).

2.2.2. Análises Estatísticas

Após a obtenção dos dados laboratoriais foram realizadas análises estatísticas para as devidas comparações dos valores obtidos de FT, para os diferentes tipos e teores de ligante nas localizações das seções transversais (topo, topo-meio, meio-topo, meio-base, base-meio e base).

Foi utilizado o software gratuito Jamovi, considerando um nível de significância (α) de 5%, comum em estudos experimentais. Os dados foram avaliados com o Teste de Análise de Variância (ANOVA) para verificar a existência ou não de diferenças significativas, semelhante a metodologia utilizada por Miranda *et al*. (2024). Testes de Levene e Shapiro-Wilk foram aplicados para verificar normalidade e homogeneidade de variâncias. Testes paramétricos (Tukey) e não paramétricos (Dwass-Steel-Critchlow-Flinger) foram aplicados conforme a necessidade.

3. RESULTADOS

3.1 Espessura do filme de ligante

A análise dos dados se concentrou nos valores das medianas de FT, que melhor representam a distribuição dos dados devido as variações observadas, Tabela 2.

Tabela 2: Valores das medianas de FT (µm) em cada seção analisada

Teor (%)	Posição	Medianas de FT (µm) CAP 30-45				CAP 50-70				AMP 60-85				AB 08			
		CP 3	CP 7	CP 8	CP 10	CP 10	CP 11	CP 18	CP 19	CP 1	CP 2	CP 4	CP 5	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7
		3	7	8	10												
6	TMD	3,00	3,00	3,50	3,50	3,45	5,47	3,85	2,94	4,47	4,38	3,36	2,76	2,49	1,43	1,68	2,49
	TME	4,50	3,50	2,50	3,00	1,34	0,71	0,89	1,11	2,94	2,32	2,90	1,64	17,08	2,60	2,49	8,00
	MET	2,50	3,00	3,50	2,50	1,34	2,43	1,80	1,34	1,34	8,23	2,30	1,13	2,49	1,16	37,6	2,49
	MEB	2,49	1,79	1,04	2,50	2,43	1,90	1,90	-	2,43	2,33	2,85	1,68	2,49	1,16	2,60	2,07
	BME	1,73	1,04	1,43	1,43	5,47	1,34	1,90	-	2,43	1,72	3,42	2,92	2,49	2,49	2,49	8,50
	BMD	4,20	2,49	1,43	2,49	2,43	2,43	6,47	2,43	2,94	2,18	3,42	2,28	2,33	1,16	2,00	1,50
		CP 1	CP 7	CP 8	CP 10	CP 8	CP 9	CP 11	CP 15	CP 4	CP 6	CP 7	CP 9	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
8	TMD	3,00	2,91	2,94	3,40	2,00	1,00	1,00	1,00	4,05	1,04	1,73	1,46	1,00	2,33	1,42	1,50
	TME	2,43	3,40	5,92	1,34	7,46	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,46	1,00	2,07	2,49	1,73	26,0
	MET	2,43	3,92	3,45	2,37	1,00	1,16	1,00	1,00	3,49	1,42	1,00	1,00	1,73	35,9	2,49	2,44
	MEB	3,45	8,68	2,79	2,80	1,68	5,39	1,00	3,94	1,16	1,16	1,00	1,50	4,70	2,49	2,60	2,49
	BME	2,94	4,93	2,12	1,79	1,00	1,00	1,42	1,00	1,00	1,42	1,58	1,00	2,49	2,49	1,62	23,4
	BMD	3,45	2,91	2,45	3,92	1,04	1,43	1,16	1,00	1,73	1,00	1,16	1,73	2,49	1,55	1,46	1,73
		CP 4	CP 6	CP 9	CP 10	CP 2	CP 3	CP 6	-	CP 3	CP 4	CP 6	CP 11	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
10	TMD	2,49	3,46	1,00	3,46	1,55	1,16	2,49	-	1,16	1,04	1,16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,43
	TME	4,53	2,49	1,43	1,16	1,00	6,76	1,73	-	1,50	2,14	1,43	1,42	35,5	36,7	37,1	2,49
	MET	1,16	3,46	1,00	2,49	1,04	1,43	2,49	-	1,16	2,08	1,00	1,29	2,49	2,49	36,1	2,49
	MEB	1,00	1,16	2,49	1,43	2,49	1,16	2,60	-	1,73	1,73	4,21	1,16	25,5	4,05	1,73	2,49
	BME	1,05	7,16	1,16	1,52	1,04	2,16	1,73	-	2,60	2,49	1,52	1,73	2,49	2,49	2,49	24,4
	BMD	1,00	2,49	1,00	2,49	1,52	1,73	1,63	-	1,16	3,83	2,49	1,73	3,61	2,49	1,50	1,73

Onde: TMD = Topo molde; TME = Topo-meio; MET = Meio-topo; MEB = Meio-base; BME = Base-meio; BMD = Base molde.

Os valores de FT variaram entre 1,00 e 8,68 µm para o CAP 30-45, entre 0,71 e 7,46 µm para o CAP 50-70, entre 1,00 e 8,23 µm para o AMP 60-85 e entre 1,00 e 37,10 µm para o AB-08, sendo este último o que apresentou maior dispersão. Considerando o teor de ligante, os valores de FT variaram de 0,71 a 37,6 µm para 6%, de 1,00 a 35,9 µm para 8% e de 1,00 a 37,1 µm para 10%. Estes valores de FT atendem os valores indicados

na literatura (Elseifi *et al*., 2008), pois estão abaixo de 100 µm. Esses dados apontam para a representação mais realista do filme de ligante obtida com amostras AAA em comparação com testes reológicos que utilizam 2 mm de ligante entre placas paralelas.

Não foi possível identificar tendência de comportamento que relacione o teor de ligante ao valor de FT, semelhante ao observado em pesquisas anteriores (Miranda *et al*., 2024). Amostras com CAP 30-45, CAP 50-70 e AMP 60-85 tendem a apresentar um comportamento mais uniforme entre as seções (topo, meio e base) nos três teores, enquanto as com AB-08 mostraram maior variação, especialmente no meio. Isso pode estar relacionado à maior elasticidade e menor rigidez do ligante com borracha, que torna o material mais suscetível a deformações localizadas, como o amolgamento, durante o corte ou manuseio, impactando nas medições de FT (Poovaneshvaran *et al*., 2020; Yan *et al*., 2024).

3.2 Análises estatísticas

As análises estatísticas indicaram diferenças significativas ao comparar os valores de FT em diferentes seções de amostras, com diferentes tipos e teores de ligante. Essa diferença significativa sugere a influência de fatores externos, como o corte das seções, no amolgamento das amostras, o que afeta as medições de FT.

Para o CAP 30-45 a análise paramétrica mostrou que não há diferenças significativas entre os teores de 6-10% e 8-10%. A análise entre as seções (paramétrica para 8% e não paramétrica para 6 e 10%) indicou que todas as seções avaliadas apresentaram diferenças significativas. Houve diferenças significativas para o CAP 50-70 entre os teores de 6 e 10%. A análise paramétrica entre as seções mostrou diferenças significativas entre todas as seções avaliadas. Para o AMP 60-85, as comparações envolvendo o teor de 6% apresentaram normalidade e homogeneidade, mas a comparação entre os teores de 8% e 10% apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$). A análise entre as seções (paramétrica) indica que há diferenças significativas ao longo do CP. Para o AB-08, os valores apresentaram distribuição normal e igualdade de variâncias para análise paramétrica dos teores, que indicou diferenças significativas entre eles ($p > 0,05$). A análise entre as seções (paramétrica para 6% e 8%, não paramétrica para 10%) mostrou que todas as seções analisadas apresentaram diferenças significativas.

4. CONCLUSÕES

Este estudo buscou reproduzir e validar uma metodologia para a confecção de corpos de prova do tipo Argamassa Areia Asfalto (AAA). Com base nos resultados obtidos, observou-se que os valores das medianas da espessura do filme de ligante (FT) para as amostras compostas por diferentes ligantes asfálticos foram inferiores a 100 µm. Essa constatação é crucial, pois indica a existência de uma espessura mais realista do filme de ligante nesse tipo de amostra em comparação com a de 2 mm utilizada nos testes reológicos com placas paralelas, validando a representatividade da metodologia AAA para estudos de propriedades do ligante.

No entanto, um ponto importante observado foi que não foi possível estabelecer uma tendência linear clara entre os valores de FT e o teor de asfalto. Além disso, ao avaliar diferentes seções das amostras, notou-se que, embora as amostras constituídas com os ligantes CAP 30-45, CAP 50-70 e AMP 60-85 apresentassem um comportamento mais uniforme, enquanto aquelas com AB-08 mostraram maior variabilidade nos valores de FT conforme a seção e o teor utilizado para as seções que foram cortadas. Isso sugere que o asfalto modificado com borracha é mais suscetível ao processo de corte. As análises estatísticas realizadas corroboram essas observações, permitindo notar que, ao comparar diferentes seções e diferentes tipos e teores de ligante, há diferenças significativas em termos de homogeneidade e normalidade de variâncias ao longo das amostras. Isso confirma a possível interferência do processo de corte nos corpos de prova e, consequentemente, nas medições de FT.

Dessa forma, conclui-se que a verificação de valores de FT abaixo de 100 µm seja fundamental para confirmar a validade da metodologia AAA em representar a espessura do filme de ligante de forma realista para fins de estudo. Entretanto, FT não deve ser utilizado como um parâmetro de controle direto para a confecção dos corpos de prova. A determinação do Vv é uma opção mais simples, rápida, econômica e confiável para o controle de qualidade na produção de amostras SAM. Essa recomendação se baseia na ausência de uma relação linear consistente com o teor de ligante e na significativa influência de fatores externos, como o amolgamento causado pelo processo de corte, nas medições de FT. Sendo assim, para futuros estudos com amostras do tipo

AAA, recomenda-se que os valores de FT sejam obtidos preferencialmente nas seções do topo e da base do molde, a fim de mitigar a influência do amolgamento das amostras nos resultados obtidos.

Agradecimentos
Este estudo foi financiado por Agências de Pesquisas Brasileiras (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES), apoiado pelo Grupo Disbral e laboratórios da Universidade Federal de Goiás (LABGEO, LABASFALTO e LABITECC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM, 2015, n.d. Specification for Standard Sand. https://doi.org/10.1520/C0778-21

CNT, 2024. Pesquisa CNT de rodovias 2024. Cnt, Brasília, DF.

Curado, T. da S., de Rezende, L.R., Teixeira, J.E.S.L., Kim, Y.-R., 2025. Microstructural Characteristics of Sand Asphalt Mortar. Journal of Testing and Evaluation 53. https://doi.org/10.1520/JTE20240470

Elseifi, M.A., Al-Qadi, I.L., Yang, S.-H., Carpenter, S.H., 2008. Validity of Asphalt Binder Film Thickness Concept in Hot-Mix Asphalt. Transportation Research Record 2057, 37–45. https://doi.org/10.3141/2057-05

Enríquez-León, A.J., Souza, T.D.D., Aragão, F.T.S., Pereira, A.M.B., Nogueira, L.P., 2021. Characterization of the air void content of fine aggregate matrices within asphalt concrete mixtures. Construction and Building Materials 300, 124214. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124214

Gong, M., Xiong, Z., Chen, H., Deng, C., Chen, X., Yang, J., Zhu, H., Hong, J., 2019. Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation. Construction and Building Materials 207, 387–395. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.064

Jiang, J., Zhao, Y., Lu, G., Dai, Y., Ni, F., Dong, Q., 2020. Effect of binder film distribution on the fatigue characteristics of asphalt Binder/Filler composite based on image analysis method. Construction and Building Materials 260, 119876. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119876

Karim, F., Hussain, J., 2021. Assessing the Asphalt Binder Film Thickness in Recycled Asphalt Mixtures Using Micro-Level Techniques. Materials 14, 7891. https://doi.org/10.3390/ma14247891

Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L., 2004. Effect of Moisture Damage on Material Properties and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1891, 48–54. https://doi.org/10.3141/1891-07

Kommidi, S.R., Kim, Y.-R., Rezende, L.R., 2020. Fatigue characterization of binder with aging in two length scales: sand asphalt mortar and parallel plate binder film. Construction and Building Materials 237, 117588. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117588

Miranda, P.P.D., Curado, T.D.S., Rezende, L.R.D., 2024. Laboratory and statistical evaluation of the microstructural characteristics of Sand Asphalt Mortar. TRANSPORTES 32, e3014. https://doi.org/10.58922/transportes.v32i3.3014

Morettin, P.A., Bussab, W. de O., 2010. Estatística Básica. Editora Saraiva.

Poovaneshvaran, S., Mohd Hasan, M.R., Putra Jaya, R., 2020. Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear. Construction and Building Materials 234, 117357. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117357

Radovskiy, B., 2003. Analytical Formulas for Film Thickness in Compacted Asphalt Mixture. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1829, 26–32. https://doi.org/10.3141/1829-04

Rezende, L.R., Kommidi, S.R., Kim, Y.-R., Khedmati, M., 2021. Strain Sweep Fatigue Testing of Sand Asphalt Mortar to Investigate the Effects of Sample Geometry, Binder Film Thickness, and Testing Temperature. Transportation Research Record 2675, 516–529. https://doi.org/10.1177/03611981211011646

Rezende, L.R.D., Curado, T.D.S., Melo, K.P.D., Barella, R.M., 2023. Equipamento e método para a produção de amostra cilíndrica do tipo Argamassa Areia-Asfalto. BR 10 2023 025702 0.

Vieira, L.H., De Souza, T.D., Enríquez-León, A.J., Aragão, F.T.S., Gomes, O.D.F.M., Leite, L.F.M., Rezende, L.R.D., 2021. Experimental Testing and Analysis Procedure to Determine the Apparent Film Thickness of Asphalt Binder in Fine Aggregate Matrix Mixtures. Transportation Research Record 2675, 166–179. https://doi.org/10.1177/0361198121994856

Yan, Y., Huan, H., Guo, R., He, Y., Tang, K., 2024. Effect of vulcanisation on the properties of natural rubber-modified asphalt. Industrial Crops and Products 214, 118588. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118588

Pamella Parreira de Miranda (pamellaparreira@discente.ufg.br)
Karolayne Peres de Melo (karolaynepm@ufg.br)
Êmine Luara Neres Santos (emineneres@discente.ufg.br)
Lilian Ribeiro de Rezende (lrezende@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPGGecon), Avenida Universitária, Quadra 86, Lote Área 1488, Setor Leste Universitário, Goiânia – GO, Brasil.

DESAFIOS TÉCNICOS NA EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS DO RAP PARA MAXIMIZAR SEU REAPROVEITAMENTO EM MISTURAS NOVAS

Telma Keppler,
1 infraTest prüftechnik GmbH

RESUMO
A incorporação de asfalto reciclado (RAP) em misturas asfálticas reduz o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos. Apesar de avanços na preparação do RAP, assegurar qualidade e homogeneidade em misturas com altos percentuais reciclados ainda é um desafio. O principal obstáculo é caracterizar o ligante envelhecido: os métodos de extração e recuperação devem separar eficientemente o ligante dos agregados e viabilizar análises reológicas confiáveis. Práticas convencionais de extração com solventes tóxicos ou ignição a altas temperaturas, apresentam riscos ocupacionais e ambientais, alto consumo de insumos, degradação do ligante e custos elevados. O estudo analisa falhas como amostragem inadequada e falta de padronização, e propõe sistemas automatizados fechados que reduzem solventes, emissões e tempo de processamento, além de melhorar a precisão na recuperação do ligante. Essas inovações permitem percentuais maiores de reaproveitamento do RAP em novas misturas sem comprometer desempenho, alinhando-se às demandas de sustentabilidade ambiental.

1. INTRODUÇÃO

A economia circular aplicada à infraestrutura viária busca reduzir a exploração de recursos naturais e minimizar a geração de resíduos. O uso de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) como matéria-prima secundária é um elemento essencial dessa abordagem, permitindo que pavimentos antigos retornem ao ciclo produtivo como insumo para novas misturas asfálticas. No entanto, para garantir desempenho mecânico e durabilidade comparáveis aos materiais convencionais, é fundamental caracterizar adequadamente o ligante envelhecido presente nesse material. Para isso, processos de extração e recuperação de ligantes são indispensáveis, mas ainda enfrentam desafios técnicos significativos.

2. O RAP COMO MATERIAL DESCONHECIDO

O RAP é um material heterogêneo e complexo, composto por ligante envelhecido com propriedades distintas do ligante virgem, agregados, finos e possíveis contaminantes. Frequentemente, pode incluir materiais não asfálticos, como fibras, plásticos, celulose ou resíduos industriais, o que amplia sua variabilidade e dificulta o controle de qualidade.

Historicamente, o RAP foi considerado um insumo de segunda categoria ou até mesmo um resíduo sem valor econômico. Contudo, a perspectiva atual busca valorizá-lo como componente em misturas asfálticas de alto desempenho. Para viabilizar essa aplicação de forma segura e eficiente, é essencial realizar uma caracterização detalhada e precisa de suas propriedades, garantindo a previsibilidade do comportamento e a qualidade das novas misturas.

3. DESAFIOS E FONTES DE ERROS NOS ENSAIOS

Tem-se adotado métodos de porcentagem de RAP na nova mistura, sem levar em consideração suas caracteristicas qualitativas, todavia, a caracterização do RAP é uma etapa crítica para garantir o sucesso na incorporação desse material em novas misturas asfálticas. Diversos desafios técnicos e operacionais ainda limitam a confiabilidade dos resultados de laboratório e dificultam o aumento seguro do percentual de RAP nas formulações. A seguir, discutem-se os principais fatores que contribuem para erros nos ensaios e na avaliação do material reciclado.

3.1. Falta de planejamento e preparação

A ausência de um planejamento adequado compromete todas as etapas do processo de caracterização. Ensaios mal estruturados, sem protocolos claros e validados, aumentam o risco de procedimentos inconsistentes e resultados não reproduzíveis. A falta de preparação prévia também dificulta o gerenciamento do tempo e dos recursos de laboratório, levando a atrasos e falhas na obtenção de dados confiáveis. Para superar esse desafio, é essencial definir previamente o escopo dos ensaios, treinar operadores e adotar normas técnicas consolidadas.

3.2. Amostragem inadequada

A amostragem é um dos fatores mais sensíveis na caracterização do RAP, pois o material é heterogêneo por

natureza. Coletas não representativas podem esconder variações internas significativas, levando a resultados enganosos sobre composição granulométrica ou conteúdo de ligante. Isso compromete o cálculo da dosagem ótima e a previsão do desempenho da nova mistura. Um plano de amostragem bem definido, com número adequado de pontos e lotes homogêneos, é indispensável para reduzir incertezas. Na Alemanha, adota-se a amostragem 10/500 que significa 10 amostras para cada 500 T de material reciclado.

3.3. Métodos e medição incorretos

A confiabilidade dos dados depende diretamente da escolha de métodos de medição precisos e exatos. Utilizar técnicas inadequadas ou equipamentos não calibrados resulta em erros sistemáticos e aleatórios, afetando parâmetros críticos como conteúdo de ligante, composição granulométrica e propriedades reológicas. Garantir a qualidade dos ensaios exige a seleção de métodos normalizados, manutenção regular dos equipamentos e capacitação técnica contínua dos operadores.

3.4. Estimativa das Propriedades do Ligante Envelhecido

Um dos maiores desafios técnicos é estimar com precisão as propriedades do ligante envelhecido presente no RAP. Este ligante sofreu oxidação, endurecimento e envelhecimento durante sua vida útil, alterando características fundamentais como ponto de amolecimento, penetração, viscosidade e grau PG. Sem uma caracterização detalhada, é impossível prever com segurança o comportamento da mistura final. Métodos de extração e recuperação adequados são essenciais para obter amostras representativas do ligante e permitir análises reológicas confiáveis, garantindo o desempenho esperado das misturas asfálticas com material reciclado incorporado.

4. TECNOLOGIAS DE EXTRAÇÃO DE LIGANTES

A extração do ligante do RAP é a etapa crítica mas necessária para permitir sua análise. Trata-se de separar o ligante asfáltico dos agregados e finos (e os materias desconhecidos). Há muitos anos procedimentos de extração são estudados e desenvolvidos para que essa etapa crítica seja realizada com sucesso.

4.1.Métodos de extração por solventes clorados

Historicamente, métodos de extração utilizam solventes clorados (tricloroetileno, tetracloroetileno e diclorometano) para separar o ligante dos agregados e dos finos. Esses métodos apresentam grandes problemas como alto consumo de solvente e exposição perigosa para operadores visto que solventes clorados são cancerígenos e neurotóxicos; além dos riscos ambientais por emissão de compostos voláteis e custos elevados com compra e descarte de solventes.

Os resultados obtidos por estes métodos podem ser afetados pela idade do material testado, com amostras mais antigas tendendo a produzir um teor de ligante asfáltico ligeiramente inferior. Os melhores resultados quantitativos são obtidos quando o ensaio é realizado em misturas asfálticas a quente, logo após sua preparação, mas em materiais como o RAP, há dificuldade de se conseguir resultados consistentes. Também constatou-se dificil a remoção de todo o ligante asfáltico, dependendo do tipo de agregados. Ademais, algum solvente pode permanecer na matéria mineral, o que afeta o teor de ligante asfáltico medido (Peter Mikhailenkoa *at al.*, 2019).

4.2 Extração por Ignição

Este método (AASHTO T308) utiliza fornos de ignição para queimar o ligante, restando os agregados limpos. Embora elimine todo o solvente, esse processo opera a temperaturas muito altas (427–1000 °C), gerando riscos para o operador, como queimaduras e inalação de gases tóxicos formados pela decomposição do ligante, além de alterar as propriedades dos agregados, provocando perda de massa diferencial e modificando sua granulometria e resistência mecânica, o que pode comprometer a compactação e a durabilidade da mistura final.

Este método queima, ou seja, destrói o ligante, inviabilizando sua recuperação para análises reológicas e sem ele, não é possível avaliar o grau de envelhecimento nem ajustar a dosagem de ligante virgem de forma precisa. Além disso, o método é altamente consumidor de energia e produz emissões significativas de CO_2 e outros poluentes atmosféricos, elevando o custo ambiental do processo. O tempo de processamento é relativamente longo, já que exige ciclos de aquecimento e resfriamento controlados, reduzindo o rendimento em laboratório

e em escalas industriais. Por fim, a ausência de um ligante recuperável impede a realização de ensaios complementares (como ensaios de viscosidade), limitando a capacidade de validar a compatibilidade do RAP em novas formulações asfálticas.

5. TECNOLOGIAS AUTOMATIZADAS DE EXTRAÇÃO E RECUPERAÇÃO

A incorporação de sistemas automatizados de extração e recuperação do ligante tem chamado muito a atenção de especialistas para a caracterização adequada do RAP, proporcionando elevados níveis de reprodutibilidade e segurança operacional (Mikhailenkoa *at al.*, 2019). Em particular, os analisadores de asfalto modernos, conforme padronizado na ASTM D8159 e EN 12697-1, combinam câmera fechada de extração por solvente com unidade de recuperação em evaporador rotativo a vácuo (EN 12697-3), resultando em um processo integrado que assegura conhecer verdadeiramente o conteúdo de ligante, além de recuperá-lo para também estudar suas qualidades reológicas e assim, conseguir uma maior incorporação do RAP na nova mistura.

Estudos (Rodezno and Julian, 2018) observaram maior eficiência química e ambiental pois o sistema opera em circuito fechado, evitando perdas por evaporação e minimizando a geração de efluentes líquidos contaminados. A quantidade de solvente empregada chega a ser até 90 % inferior à requerida em métodos manuais, reduzindo custos e riscos ambientais. Toda a etapa de extração ocorre dentro de uma câmara fechada, eliminando a exposição direta do operador a vapores tóxicos e inflamáveis e sensores de pressão e temperatura monitoram continuamente o processo, disparando alarmes em caso de desvios ou falhas.

Todo o processo (ciclos de lavagem, centrifugação e secagem) é controlado automaticamente e com precisão no controle de tempo e temperatura pois são pré-programados via software. Isso permite a execução de perfis de extração customizados para diferentes tipologias de RAP (variações de granulometria e teor de ligante) e garante resultados mais homogêneos (Jones *at al.*, 2017).

A recuperação do ligante é feita através do evaporador rotativo a temperaturas inferiores a 80 °C, preservando as estruturas moleculares e evitando a oxidação térmica.

Ensaios subsequentes como ponto de amolecimento (Ring-and-Ball), penetração, Dynamic Shear Rheometer (DSR) e Bending Beam Rheometer (BBR) podem ser realizados com o ligante recuperado do RAP, assegurando correlações confiáveis.

O tempo total de ensaio é reduzido para aproximadamente 50 minutos por amostra, em comparação com várias horas ou dias em métodos convencionais, o que aumenta significativamente a capacidade laboratorial.

6. ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL

A determinação do teor de ligante em misturas asfálticas é crítica para o controle de qualidade e para o reaproveitamento do RAP. O método centrífugo amplamente adotado, requer grandes volumes de solvente clorado e intenso manuseio, gerando riscos ocupacionais, custos de descarte e impacto ambiental. Um estudo publicado recentemente pelo Wisconsin Highway Research Program (Rodezno and Julian, 2018) sobre métodos de extração de ligante asfáltico constatou que o método automatizado de extração por solvente apresenta os menores desvios-padrão, entre todos os procedimentos avaliados, tanto para ensaios realizados dentro de um mesmo laboratório quanto entre diferentes laboratórios. Os demais procedimentos avaliados incluíram o forno de ignição, a centrífuga e o método de refluxo. O estudo concluiu que equipamentos automatizados em ciclo fechado recuperam mais que 90 % do solvente, reduzem a intervenção e aumentam a segurança do operador.

7. CONCLUSÃO

A caracterização confiável do ligante envelhecido é indispensável para elevar a porcentagem de RAP em misturas asfálticas de alto desempenho.

A comparação entre o método centrífugo convencional (ASTM D2172/AASHTO T164) e um sistema automatizado de circuito fechado (ASTM D8159) evidenciou:

- Eficiência de recursos: o analisador automatizado reduziu o consumo de solvente em mais de 90 % e a demanda de mão de obra em 80 %, mantendo ou superando a precisão analítica.

- Viabilidade econômica: a economia direta é obtida com menor uso de solvente e de energia.
- Segurança e meio ambiente: o circuito fechado praticamente elimina emissões de CO_2 e resíduos perigosos, além de reduzir a exposição dos operadores a solventes clorados cancerígenos.

Por fim, a migração para automatização dos ensaios de extração têm sido altamente considerada tanto na Europa quanto nos Estados Unidos tanto nas universidades quanto nos departamentos governamentais com o objetivo de reduzir o tempo de trabalho e a exposição dos operadores a solventes tóxicos, trazendo ganhos em segurança e ergonomia e conciliando desempenho técnico, sustentabilidade e competitividade econômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mikhailenkoa, P.; P. Ataeianb e H. Baajb (2019) *Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review*.
Jones, K. B.; J. Arjes e M. Barger (2017) *Evaluation of the InfraTest Asphalt Analyzer for Performing Extractions on Recycled Asphalt Materials.* Iowa DOT.
Rodezno, C. e G. Julian (2018) *Asphalt Binder Extraction Protocol for Determining Amount & PG Characteristics of Binders Recovered from Asphalt Mixtures*.
ASTM Norma ASTM D2172/D2172M-17, *Standard Test Methods for Asphalt Content of Bituminous Mixtures by Centrifuge Extraction. ASTM International.*
EN Norma EN 12697-3: *Recovery of binder: Rotary evaporator*.
AASHTO Norma AASHTO T164: *Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder*.
AASHTO Norma AASHTO T308: *Standard Method of Test for Determining the Asphalt Binder Content by the Ignition Method.*
ASTM Norma ASTM D8159 *Standard Test Method for Automated Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures*.
InfraTest Prüftechnik GmbH, *Product Specification.*

Telma Keppler (t.keppler@infratest.net)
infraTest Prüftechnik GmbH, Wiesenbachstr. 15 74336 Brackenheim Germany

DOSAGEM E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO GRAVE-BITUME

Lilian Rodrigues, Breno Salgado Barra, Estéfani Clara, Alexandre Mikowski, Rafael Cristyan Fronza, Jessé Valente de Liz
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO
O objetivo deste trabalho é realizar a dosagem de misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB) com matriz betuminosa base 50/70 modificado com 4,0 % de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) e avaliar o desempenho à deformação permanente. As misturas asfálticas foram avaliadas com base na metodologia francesa de formulação, abrangendo os níveis de habilidade de compactação através do uso da prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 ºC e à deformação permanente a 60 ºC. Os resultados obtidos indicaram que as dosagens atenderam aos requisitos normativos para enquadramento em misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* de classe 4 (GB 4), considerada a de melhor característica técnica pela metodologia francesa.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento de metodologias de dosagem de misturas asfálticas exige extensos estudos conceptivos prévios com forte base científica, a fim de que se possa determinar com assertividade as propriedades dos materiais constituintes, bem como compreender o comportamento das dosagens propostas, sobretudo reológico e mecânico. Para tanto, deve-se dispor de técnicas que possuam a capacidade de testar os materiais conforme as condições mais próximas possíveis dos fenômenos observados no campo, ou seja, com estreita relação campo/laboratório, garantindo assim credibilidade aos resultados obtidos (Barra *et al*., 2016; Mikowski *et al*., 2021).

No que diz respeito à deformação permanente das misturas asfálticas, tem-se que é um dos defeitos com maior incidência nestes materiais. Ainda, pode se desenvolver pela combinação entre a fluência e a deformação por cisalhamento da mistura asfáltica, motivadas principalmente pela característica viscoelástica linear do ligante betuminoso e por deficiência do intertravamento entre as partículas, devido à má distribuição proporcional das composições granulométricas, respectivamente, ambos os fenômenos ocorrentes no domínio dinâmico de solicitação (Zhang *et al*., 2022). Assim, demonstrou a importância do estudo da dosagem e avaliação do desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas que se tornou foco de diversos trabalhos (Ferreira *et al*., 2020; Yao *et al*., 2021; Xu *et al*., 2021).

Desenvolvida na década de 1970, a mistura asfáltica *Grave-Bitume* (GB) foi a primeira técnica criada para melhorar o desempenho mecânico das camadas de apoio (base e sub-base) das redes rodoviárias destinadas a elevado nível tráfego na França, em substituição às graduações do tipo macadame (Brosseaud e Jacques, 2015). Existem atualmente quatro classes que distinguem as dosagens de GB, dependendo da granulometria, do teor de ligante da dosagem e, principalmente, do desempenho mecânico esperado em cada caso quanto à habilidade de compactação, resistência à ação da água, deformação permanente, módulo de rigidez complexo e fadiga (Diakité, 2014).

Dado o exposto, a motivação principal desta pesquisa consiste propor a concepção de dosagens, bem como verificar a viabilidade técnica do uso de misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB), destinadas à composição de camadas estruturais de base e sub-base em pavimentos de concreto asfáltico, com enfoque nos parâmetros de habilidade de compactação, resistência à ação deletéria da água, e sobretudo, à deformação permanente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

As frações granulares utilizadas foram obtidas de jazida localizada na região metropolitana de Joinville/SC, situada na zona de transição do Complexo Granulítico de Santa Catarina e Granito Piraí, caracterizada por maciço rochoso de origem gnáissica. Os agregados pétreos enquadram-se nos limites estabelecidos pelas normativas: Desgaste por abrasão Los Angeles (DNIT-ME 451/2024) (17,50 %); Índice de forma (ABNT NBR 7809/2019) (0,60); Resistência ao ataque químico (Durabilidade) (DNIT-ME 446/2024 e DNER-ME

037/1997) (5,30 %); Equivalência de areia (DNIT-ME 450/2024) (78,0 %); Teor de material pulverulento (DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997) (0,40 %) e Absorção (0,50 %). Dessa forma, os materiais apresentam características que os tornam adequados para utilização em misturas asfálticas.

Foram utilizados 2,0 % de cal hidratada CH-1 como parte das frações granulares passantes na peneira de abertura 0,075 mm na composição das misturas asfálticas. Essa adição justifica à natureza fortemente eletropositiva da cal pela presença de Óxido de Cálcio (CaO) ≥ 90 % em sua composição objetivando compensar a má adesividade dos granulares, de origem gnáissica, ao ligante betuminoso.

No que diz respeito ao ligante betuminoso, as amostras utilizadas foram fornecidas por distribuidora localizada na cidade de Curitiba/PR, a partir de uma matriz base com penetração 50/70 modificada com 4,0 % de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), denominado Poliflex 60/85 E. Com base nos resultados do ensaio de viscosidade rotacional Brookfield, as temperaturas de trabalho foram definidas em 165 ºC para usinagem e 145 ºC para compactação das misturas asfálticas. Foi também considerada a temperatura de 178 ºC para aquecimento dos granulares, ou seja, 13 ºC acima da condição prevista para usinagem do ligante.

2.2. Métodos

A curva granulométrica (Figura 1A) proposta para esta pesquisa utilizou como referência uma mistura asfáltica do tipo *Grave-Bitume* (GB), de graduação 0/20 mm, aplicada em obra pública na cidade de Dakar, Senegal (IFSTTAR, 2012). O desenvolvimento das curvas granulométricas foi realizado com base nas equações de Füller-Talbot.

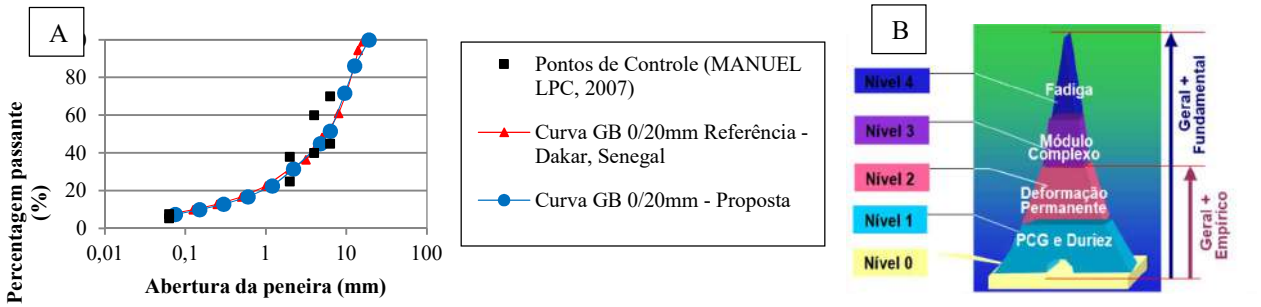


Figura 1: (A) Curvas granulométricas (B) Níveis de ensaios para a formulação francesa

Observando a Figura 1A, verifica-se que a dosagem proposta se encontra muito próxima à curva granulométrica de referência da mistura asfáltica *Grave-Bitume* (GB) de graduação 0/20 mm. Além disso, o expoente de graduação 'n' para a dosagem proposta foi determinado em 0,47, confirmando a característica densa, estando entre $0,35 < n \leq 0,55$.

As misturas de classes 3 e 4 são as mais utilizadas para execução de estruturas de pavimento na França, enquanto as de classe 1, por serem produzidas com teores de ligante betuminoso muito baixos, atualmente não são mais recomendadas. Quanto ao desempenho mecânico das misturas GB, por comporem camadas com função estrutural no dimensionamento de pavimentos, devem ser testadas até o último nível 4 (Figura 1B). Contudo, em razão da indisponibilidade de um período maior para a realização da pesquisa, a campanha experimental realizada se estendeu até o nível 2.

3. ENSAIOS LABORATORIAIS

Aplicaram-se os níveis avaliativos sequenciais e eliminatórios 1 e 2 da metodologia francesa de formulação, compreendendo os parâmetros correspondentes à: (nível 1) habilidade de compactação através do uso da Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), correlacionando o percentual de vazios (%V) a uma sequência de revoluções (giros) axiais do equipamento, e; resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 ºC (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), para aferir por compressão simples a resistência das dosagens, comparando conjuntos de corpos de prova a seco (R) e condicionados na água por 7 dias consecutivos (r) e; (nível 2) deformação permanente a 60 ºC (AFNOR NF EN 12697-22, 2020), a partir do teste de placas compactadas em mesa pneumática. Foram consideradas para cada teor de ligante e ordem dos ensaios descritos, as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova.

Os teores de ligante definidos para as dosagens das misturas asfálticas foram: 3,90 %, 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %. A escolha desta faixa de valores se deve ao fato de que o projeto de referência (IFSTTAR, 2012) apresentou uma dosagem de serviço final com 4,20 %. Além disso, considerando-se adaptações realizadas na curva granulométrica de referência e o tipo de ligante betuminoso utilizado, tornou-se necessário avaliar variações de dosagens próximas, a fim de determinar a melhor condição de trabalho mais adequada para as misturas propostas nesta pesquisa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos durante a campanha experimental realizada nesta pesquisa, bem como as discussões técnicas correspondentes.

4.1. Habilidade de Compactação na PCG

No que se refere à habilidade de compactação das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB), observa-se que, a partir dos limites normativos para a graduação 0/20 mm, houve enquadramento integral na classe 4 (GB 4) correspondente $\%V_{máx} \leq 9{,}0$ % a 120 giros, sendo os valores de volume de vazios aferidos em: 8,4 %, 7,3 %, 6,1 % e 5,4 % para os teores de 3,90 %, 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %, respectivamente (Figura 2).

A partir da análise dos resultados, verifica-se a existência de boa compatibilização entre o arranjo granulométrico formulado pela metodologia de Füller-Talbot e as dosagens de ligante betuminoso selecionadas. Além disso, observa-se que a forma e a textura dos granulares são propriedades relevantes para a habilidade de compactação das misturas, uma vez que a macrotextura predominantemente subangular e a superfície rugosa das partículas contribuem para um eficiente intertravamento estrutural interno, resultando em arranjos granulométricos mais estáveis e, portanto, menos suscetíveis às tensões cisalhantes geradas durante o processo de compactação.

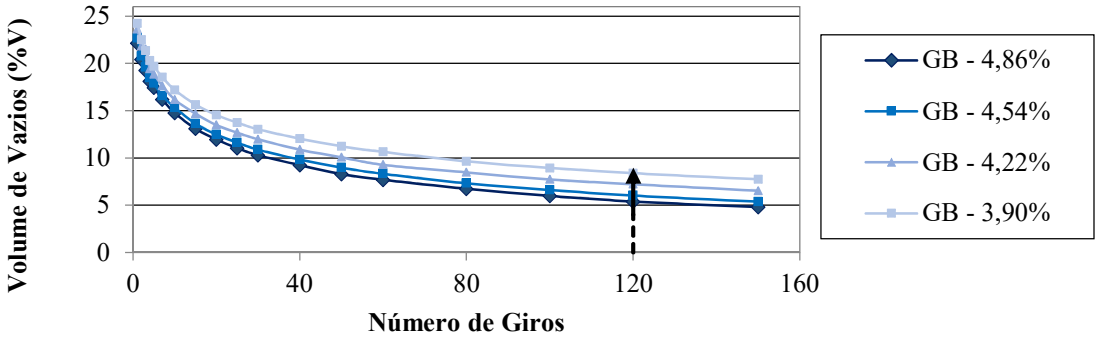


Figura 2: Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas GB 0/20 mm

4.2. Resistência à Ação Deletéria da Água

Os valores médios obtidos nas relações r/R (Figura 3) indicam que todas as dosagens propostas apresentam forte resistência à ação deletéria da água, uma vez que os resultados foram significativamente superiores ao limite mínimo exigido de 0,70. Cabe ressaltar que a adição de 2,0 % de cal hidratada CH-1 na composição da curva granulométrica contribui para a obtenção de boa adesividade passiva do conjunto granular e o ligante betuminoso.

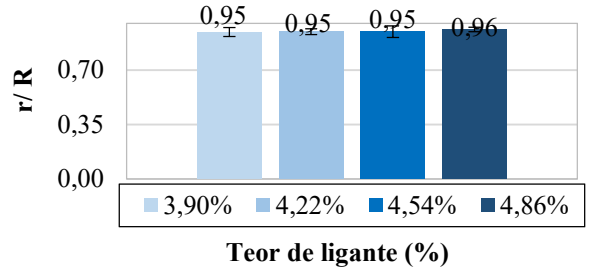


Figura 3: Resistência à ação da água das misturas asfálticas GB 0/20 mm

4.3. Resistência à Deformação Permanente

Em análise aos resultados obtidos (Figura 4), observa-se que todas as dosagens propostas nesta pesquisa se enquadram na classe 4 das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB 4), uma vez que apresentaram valores inferiores ao limite máximo de 10,0 %, correspondentes ao afundamento na trilha de roda após 30.000 ciclos à 60 ºC.

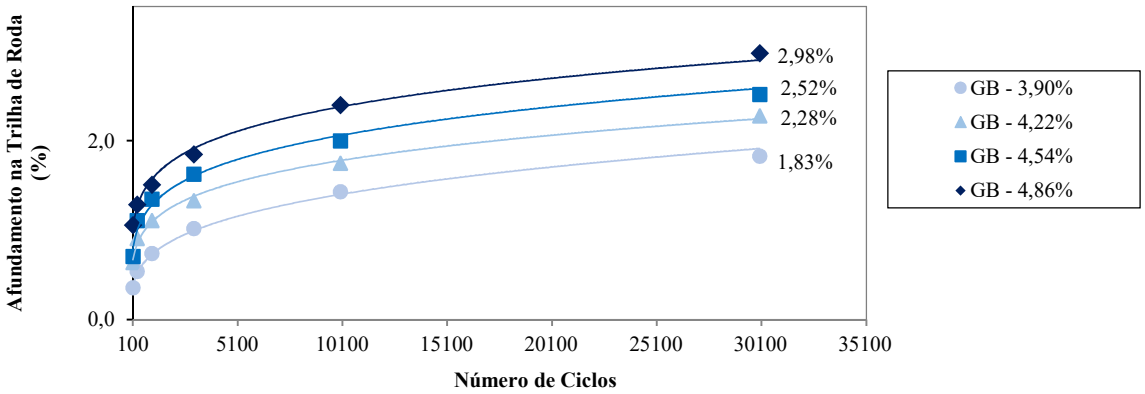


Figura 4: Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas GB 0/20 mm

Assim como observado nos resultados referentes à habilidade de compactação com o uso da PCG, o aumento gradual do percentual de dosagem diminui a efetividade do intertravamento entre as partículas, ocasionando a perda progressiva do atrito interno, a diminuindo a resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e, consequentemente, o aumento dos afundamentos na trilha de roda.

Ressalta-se que o ensaio é realizado sob condições mais rigorosa do que as condições observadas em campo, ou seja, com frequência contínua muito lenta (1 Hz) e temperatura elevada de aplicação do carregamento (60 ºC). Mesmo assim, todas as dosagens apresentaram um excelente desempenho no que diz respeito à resistência à deformação permanente.

Para tanto, além de um arranjo granulométrico bem distribuído e intertravado, com boa habilidade de compactação, a qualidade do ligante betuminoso Poliflex 60/85 E contribuiu de forma decisiva aos bons resultados obtidos, uma vez que a incorporação de 4,0 % do polímero SBS na matriz base 50/70 conferiu elevada consistência no ponto de amolecimento anel e bola (65,4 ºC) e forte recuperação elástica (90,0 %) ao material, tornando a mistura asfáltica pouco suscetível a variações térmicas.

No caso das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB), a classe 4 é a que melhor se adequa à realidade brasileira, pois as estruturas de pavimento, notadamente as camadas betuminosas, estão constantemente submetidas a severos níveis de carga por eixo e a climas com temperaturas predominantemente elevadas, requerendo maior rigor em seus procedimentos conceptivos e avaliativos.

Além disso, como todas as dosagens propostas de *Grave-Bitume* (GB) foram aprovadas na classe 4 em todos os requisitos de avaliação previstos na metodologia francesa até o nível 2, conclui-se que as misturas asfálticas estão aptas a prosseguirem para os níveis 3 (módulo de rigidez complexo) e 4 (resistência à fadiga), que correspondem aos parâmetros fundamentais de dosagens, necessários ao dimensionamento das estruturas de pavimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos durante a campanha experimental, conclui-se que a metodologia de Füller-Talbot demonstrou ser bastante efetiva na formação de arranjos granulométricos com graduação densa, conferindo boa estabilidade por atrito interno estrutural. Consequentemente, verificou-se forte compatibilidade entre os arranjos granulométricos e as dosagens de ligante betuminoso, resultando em habilidade de compactação compatível com a classe 4, a mais nobre entre as classes de *Grave-Bitume* previstas na

metodologia francesa. No que se refere à ação deletéria da água, todas as dosagens apresentaram resultados significativamente acima do limite mínimo estabelecido. Quanto à deformação permanente, os resultados indicam que as misturas estão aptas a suportar condições severas de carga e clima. Ressalta-se que o uso do ligante betuminoso Poliflex 60/85 E tornou as misturas asfálticas pouco susceptíveis a variações térmicas, devido à elevada consistência no ponto de amolecimento e recuperação elástica, conferindo baixa fluência e, consequentemente, reeduzidos níveis de afundamento na trilha de roda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barra, B.; Momm, L.; Guerrero, Y.; Al-Qureshi, H. A.; Mikowski, A.; Michels, R. (2016). Temperature implications on rheological-mechanical behavior and design of high modulus dense asphalt mix. Construction and Building Materials, Vol. 125, pp. 135-144, ISSN 0950-0618.

Brosseaud, Y.; ST-Jacques, M. (2015), Les Enrobés à Module Élevé: bilan de près de 30 ans d'expérience française (partie 1 de 2). Revue Via Bitume, Vol. 10, Nº 2, pp. 8-15.

Diakité, I. S. (2014), Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance et évaluation de son utilisation en couche de base en remplacement d'une grave bitume. Mémoire de maîtrise. École de Technologie Supérieure. Université du Québec, 290 p. Canadá.

Ferreira, J. L. S.; Babadopulos, L. F. A. L.; Bastos, J. B. S.; Soares, J. B. (2020). A tool to design rutting resistant asphalt mixes through aggregate gradation selection. Construction and Building Materials, Vol. 236, 117531, ISSN 0950-0618.

IFSTTAR (2012). Projèt d'une courbe granulométrique de l'enrobé Grave-Bitume (GB). Expertise Senegal Prestation 559. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). Dakar, Sénégal.

Mikowski, A.; Casali, R. M.; Soares, P.; Silva, W. B. DA; Barra, B. S. (2021). Methodology for error propagation analysis of the complex stiffness modulus of asphalt mixes. Construction and Building Materials, Vol. 290, 123156, ISSN 0950-0618.

Xu, S.; Ruan, P.; Lu, Z.; Liang, L.; Han, B.; Hong, B. (2021). Effects of the high temperature and heavy load on the rutting resistance of cold-mix emulsified asphalt mixture. Construction and Building Materials, Vol. 298, 123831, ISSN 0950-0618.

Yao, L; Leng, Z.; Jiang, J.; Ni, F.; Zhao, Z. (2021). Nondestructive prediction of rutting resistance of in-service middle asphalt layer based on gene expression programing. Construction and Building Materials, Vol. 293, 123481, ISSN 0950-0618.

Zhang, X.; Chen, E.; Li, N.; Wang, L.; Si, C.; Wang, C. (2022). Micromechanical analysis of the rutting evolution of asphalt pavement under temperature–stress coupling based on the discrete element method. Construction and Building Materials, Vol. 325, 126800, ISSN 0950-0618.

Lilian Rodrigues (lilian_kethelyn@hotmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dona Francisca, 8300 - Zona Industrial Norte - Joinville/SC – Brasil.
Breno Salgado Barra (breno.barra@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Estéfani Clara (estefani.clara@hotmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Alexandre Mikowski (alexandre.mikowski@ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.
Rafael Cristyan Fronza (rafael.c.fronza@gmail.com)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM), Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dona Francisca, 8300 - Zona Industrial Norte - Joinville/SC – Brasil.
Jessé Valente de Liz (jesse.v@posgrad.ufsc.br)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Rua João Pio Duarte Silva, 205 - Sala 201C, Bairro Córrego Grande, Florianópolis/SC – Brasil.

INFLUÊNCIA DO MOMENTO DE ADIÇÃO DO AGENTE REJUVENESCEDOR EM MISTURAS RECICLADAS

Maria Vitoria Araujo Sousa[1], Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena[2], Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena[2], Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz[1], Carla Caroline Alves de Carvalho[1], Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida[1], George Fernandes Azevedo[1], Daniel Beserra Costa[1]

[1]Universidade Federal do Maranhão; [2] Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

A pavimentação asfáltica sofre deformações que reduzem sua vida útil, exigindo restaurações frequentes. Uma alternativa sustentável é a reciclagem do material fresado (RAP), que reduz a demanda por novos materiais. Para recuperar o ligante envelhecido do RAP, utilizam-se Agentes de Reciclagem (AR), mas a falta de padronização na aplicação e a variedade de ARs dificultam definir o momento ideal de adição. Este estudo analisou misturas asfálticas com 25% de RAP e diferentes ARs (ADCAP WM e óleo residual de motor) em diferentes momentos de produção: com o fresado, o agregado e o ligante. Os resultados indicaram que ambos os ARs são viáveis em misturas recicladas, com destaque para o óleo residual de motor, que apresentou melhor desempenho geral, independentemente do momento de adição, mostrando ser uma alternativa sustentável e eficiente para o uso em pavimentação asfáltica.

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário representa 64,85% do transporte de cargas no Brasil (CNT, 2024), sendo essencial para a economia. Contudo, a pavimentação asfáltica apresenta defeitos como trincas, afundamentos e desgaste superficial, reduzindo sua vida útil e exigindo manutenções constantes. Essas manutenções, por meio de fresagem e nova camada de asfalto, geram resíduos de fresado (RAP), cujo descarte ou reciclagem enfrentam desafios ambientais e financeiros (Raul, 2019). A utilização do RAP surge como alternativa sustentável, reduzindo o uso de novos materiais e reaproveitando pavimentos deteriorados (FHWA, 2016). Entretanto, há desafios devido à heterogeneidade do RAP, falta de informações sobre a construção original, variação na granulometria e no grau de envelhecimento do ligante, além das adaptações necessárias na usina (Unger Filho, 2019).

A restauração do ligante oxidado no RAP pode ocorrer com uso de Agentes de Reciclagem (AR), produtos capazes de restaurar as propriedades do ligante asfáltico envelhecido, aumentando sua penetração e reduzindo a consistência (Silva, 2018). Contudo, a diversidade de ARs e o impacto do grau de envelhecimento do ligante dificultam a padronização, sendo incertas a quantidade ideal de AR e o momento de adição (Moghaddam, 2016). O excesso de AR pode gerar deformações permanentes, enquanto a falta pode aumentar a rigidez e provocar fissuras (Raul, 2019). Além disso, o momento de adição impacta a configuração da usina, custos e desempenho das misturas, sendo crucial para o sucesso do processo (Suzuki, 2019). Neste contexto, o presente trabalho analisa a influência do momento de adição de AR em misturas asfálticas recicladas, utilizando um agente de reciclagem orgânico (Óleo residual de motor) e um surfactante (ADCAP WM), visando avaliar o impacto no desempenho e na durabilidade, promovendo sustentabilidade e eficiência nos pavimentos (Costa, 2022)

2. METODOLOGIA

O programa experimental desta pesquisa investigou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com 25% de RAP e diferentes agentes de reciclagem (AR), ADCAP WM e óleo residual de motor, aplicados em diferentes momentos da produção. A metodologia foi descritiva quantitativa, e os ensaios ocorreram no LEP/UFCG sob supervisão do Dr. Daniel Beserra Costa, utilizando ligante CAP 50/70, agregados graníticos e RAP da BR-230/PB (Costa, 2022). As curvas granulométricas e teores de adição seguiram a metodologia de Costa (2022), com teor de 25% de RAP e adições de 2,5% de ADCAP WM e 15% de óleo residual, para analisar perdas ou volatilização. Foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) conforme ABNT NBR 15087 (2012) e DNIT (2018), módulo de resiliência (MR) seguindo a NBR 16018 (2011) e DNIT 031 (2006), e ensaio de Lottman modificado para avaliar a resistência à umidade DNIT 180 (2018) e AASHTO M 320 (2021). Este estudo busca identificar o melhor momento de adição dos agentes de reciclagem, considerando o desempenho e a integridade das misturas asfálticas recicladas, visando eficiência, durabilidade e sustentabilidade em pavimentação.

3. RESULTADOS

3.1. Resistencia a tração por compressão diametral

A Figura 1 apresenta os resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral.

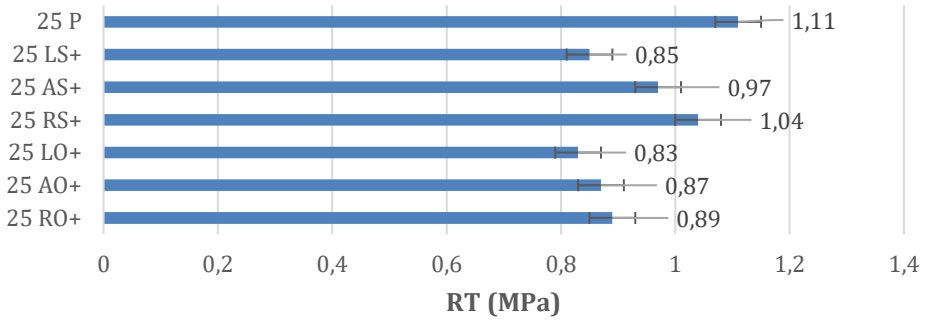


Figura 1: RT (amostras de 25% + ADCAP WM) e (amostras de 25% + Óleo de motor)

O ensaio de resistência à tração (RT) indicou que o uso de óleo residual de motor como agente de reciclagem reduziu a resistência mecânica das misturas asfálticas, evidenciado pela diminuição dos valores de RT em relação à amostra de referência (25P). As reduções foram de 19,82% adição no RAP (25 RO+), 21,62% adição no agregado (25 AO+) e 25,23% adição no ligante (25 LO+). A menor variação entre adições no RAP e no agregado (cerca de 2%) sugere pouca influência do momento de adição nesse aspecto, enquanto a adição no ligante apresentou maior impacto. Apesar das reduções, todos os valores de RT ficaram acima dos limites exigidos pelas normas DNIT 031/06 – ES e DNIT 033/21 – ES, confirmando a viabilidade do uso do óleo residual de motor. Resultados semelhantes foram observados por Mamun e Al-Abdul Wahhab (2018), bem como por outros estudos (Nabizadeh et al., 2017; Leng et al., 2018), reforçando a aplicabilidade do óleo residual como AR em misturas recicladas com até 50% de RAP.

Os valores de resistência à tração (RT) das amostras com 25% de RAP com o ADCAP WM variaram entre 0,85 e 1,04 MPa, com amplitude de 0,19 MPa. Diferente das amostras com óleo residual de motor, as amostras modificadas com ADCAP WM apresentaram maior sensibilidade ao momento de adição do AR. A adição junto ao ligante (25 LS+) resultou na maior redução de RT, cerca de 23,42% em relação à amostra de referência (25P) e 22% em relação à adição no RAP (25 RS+). A adição junto ao agregado (25 AS+) também reduziu a RT em 12,61%, enquanto a adição junto ao RAP teve menor impacto, com redução de 6,30%, possivelmente devido à menor interação com o CAP envelhecido ou volatilização do AR a 165°C.

A pesquisa identificou uma redução média de 35% na resistência à tração (RT) das misturas modificadas com óleo residual de motor em comparação ao ADCAP WM. Essa diferença se deve às características distintas dos agentes de reciclagem: o óleo residual (orgânico) tende a reduzir a RT, enquanto o ADCAP WM (surfactante) apresentou melhor desempenho (da Ferreira, 2023; Torres et al., 2022). Apesar das reduções, todas as amostras apresentaram RT acima do valor mínimo exigido pelas normas DNIT, DER/SP e DER/MA, que é de 0,65 MPa para camadas de binder e entre 0,65 MPa e 0,80 MPa para camadas de rolamento. Assim, confirma-se a viabilidade do uso dos ARs avaliados em misturas recicladas.

3.2. Módulo de resiliência

A Figura 2 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência.

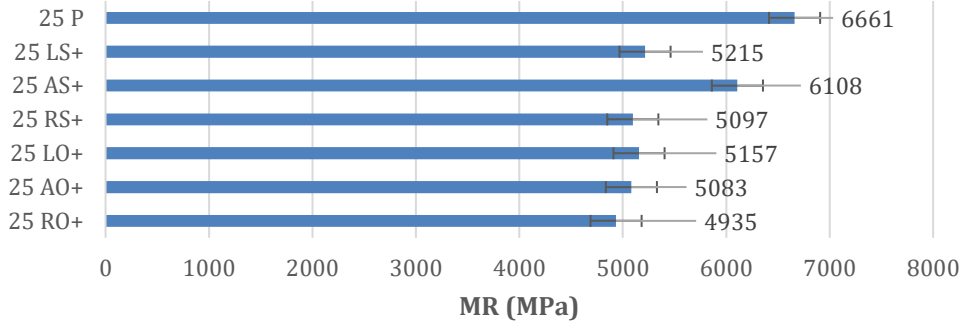


Figura 2: MR (amostras de 25% + ADCAP WM) e (amostras de 25% + óleo residual de motor)

As amostras com adição de óleo residual de motor apresentaram reduções no módulo de resiliência (MR) em comparação à amostra de referência (25P), com diminuições de 25,91% (RAP), 23,69% (agregado) e 22,58% (ligante). Os valores de MR variaram entre 4935 e 5157 MPa. A adição ao RAP resultou na maior queda de rigidez. Assim como observado nos resultados de resistência à tração (RT), o momento de adição do AR não influenciou significativamente o desempenho, indicando flexibilidade na sua aplicação. A diminuição da rigidez é consistente com estudos anteriores (Mamun e Al-Abdul Wahhab, 2018; Nabizadeh et al., 2017; Leng et al., 2018), que também relataram comportamento semelhante com ARs orgânicos, embora com reduções menos acentuadas.

As amostras com adição de ADCAP WM apresentaram redução no módulo de resiliência (MR) em relação à amostra de referência (25P), com diminuições de 23,48% (RAP), 8,30% (agregado) e 21,71% (ligante). A menor redução ocorreu na adição junto ao agregado, sugerindo baixa interação entre o AR e o CAP envelhecido, alinhado ao comportamento observado na resistência à tração (RT). Os valores de MR variaram entre 5097 e 6108 MPa, mostrando diferença significativa conforme o momento de adição. Não está claro se essa redução excessiva é benéfica para o desempenho da mistura, requerendo análise completa do quadro experimental. Estudos indicam que o RAP tende a aumentar o MR, enquanto ARs surfactantes, como o ADCAP WM, podem reduzi-lo (Lu et al., 2019; Yousefi et al., 2021). Os resultados sugerem que misturas com 25% de RAP e ADCAP WM são viáveis para pavimentos asfálticos, embora se recomende validação por meio de simulações de compatibilidade entre camadas.

Os resultados indicam que os valores de módulo de resiliência (MR) para misturas com agentes de reciclagem (AR) orgânicos e surfactantes foram, em sua maioria, semelhantes, exceto para o ADCAP WM adicionado diretamente ao agregado, que se destacou. As tendências observadas no ensaio de resistência à tração (RT) refletiram-se no MR, mostrando relação entre esses parâmetros. De modo geral, houve diminuição do MR nas misturas recicladas, porém as variações conforme os momentos de adição do AR não foram significativos, indicando pouca influência desse fator no desempenho. Embora a rigidez excessiva possa aumentar custos e complexidade do projeto, a resistência à fadiga depende também de outros fatores como viscoelasticidade, vazios, adesão e coesão da mistura (Costa, 2023). Estudos anteriores demonstram que o uso de RAP pode melhorar o MR das misturas (Behbahani et al., 2017; Rondón et al., 2015).

3.3. LOTTMAN modificado

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de LOTTMAN modificado.

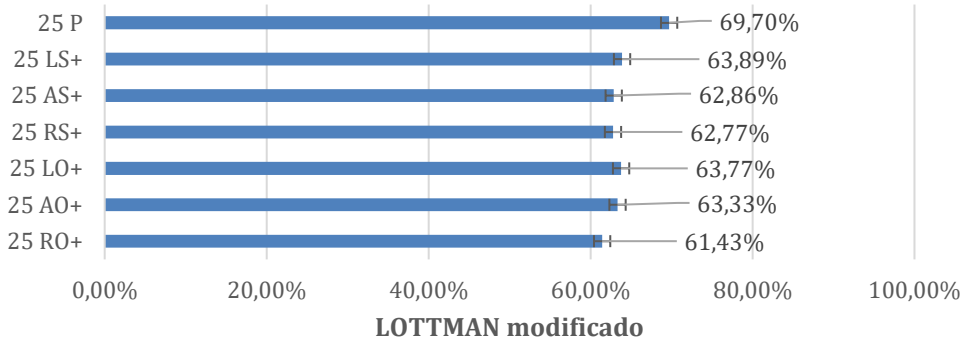


Figura 3: LOTTMAN modificado (amostras de 25% + ADCAP WM) e (amostras de 25% + óleo residual de motor)

As amostras com 25% de RAP e adição de óleo residual de motor apresentaram redução no ensaio de LOTTMAN modificado, indicando perda de resistência ao dano por umidade induzida, com diminuições entre 8,51% e 11,87% em relação à amostra de referência (25P). O momento de adição do óleo não influenciou significativamente os resultados, que foram semelhantes entre as diferentes formas de aplicação. Esses resultados indicam que o óleo residual de motor pode fragilizar a mistura reciclada frente à umidade, contrastando com estudos anteriores (Zaumanis et al., 2014), que mostraram desempenho superior de produtos orgânicos comparados a aditivos à base de petróleo. No entanto, para avaliar com precisão o impacto e a interação do óleo residual, são necessárias análises químicas adicionais.

As amostras com 25% de RAP e adição de ADCAP WM apresentaram redução na resistência ao dano por umidade induzida entre 8% e 10% em relação à amostra de referência (25P), com pouca variação (cerca de 1%) devido ao momento de adição do agente. Esses resultados são semelhantes aos obtidos com óleo residual

de motor, sugerindo um possível comprometimento da composição. Estudos anteriores, como o de Arruda (2021), com até 50% de RAP, apresentaram resultados próximos. Ainda não há consenso na literatura sobre os efeitos desse ensaio em misturas recicladas, com alguns autores reportando ganhos significativos de resistência, enquanto outros, como Costa (2022), apontam perdas, porém as variações geralmente são pequenas, entre 1% e 8%.

Dessa forma, os resultados mostraram que não houve diferença significativa nos valores entre o uso de óleo residual de motor e ADCAP WM no ensaio de Lottman modificado, com variações inferiores a 5%, indicando nenhuma influência do momento de adição neste ensaio. O ensaio avalia a resistência ao dano por umidade, e embora Costa (2024) tenha identificado impacto relevante do tipo, teor e momento de adição do AR, nesta pesquisa isso não foi observado. A literatura (Suzuki, 2019; Zubaran, 2014) indica que a RRT tende a aumentar com o teor de RAP, devido ao ligante envelhecido no RAP melhorar a adesividade, justificando os valores mais elevados de RRT em misturas com altos teores de RAP ou sem ARs.

4. CONCLUSÃO

A pesquisa avaliou o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com dois agentes de reciclagem (AR): óleo residual de motor (orgânico) e ADCAP WM (surfactante). Os ARs foram adicionados em três diferentes momentos: junto ao RAP, ao ligante e ao agregado. Os ensaios realizados foram: resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR) e Lottman modificado.

Observou-se que não houve variações expressivas entre o momento de adição, com diferenças inferiores a 5% em todos os casos, indicando que o momento de adição não teve influência estatística relevante. No entanto, a adição junto ao ligante apresentou desempenho superior em termos de interação entre o AR e o ligante envelhecido, tanto para o óleo residual quanto para o ADCAP WM.

O óleo residual de motor demonstrou ser eficaz em reduzir a rigidez da mistura, atendendo a proposta da reciclagem asfáltica com RAP. Apesar da redução nas propriedades mecânicas, todas as amostras ficaram acima dos limites normativos (DNIT, DER/SP), com exceção das análises de umidade (Lottman), devido ao tipo de agregado, sendo recomendada a adoção de aditivos de adesividade. O ADCAP WM também demonstrou bom desempenho quando adicionado ao ligante, mas teve desempenho inferior nas adições junto ao RAP e ao agregado, possivelmente por menor interação ou volatilização do AR.

Portanto, os resultados indicam que ambos os agentes são viáveis para aplicação em misturas recicladas, sendo que o óleo residual de motor apresentou leve vantagem, especialmente por manter desempenho adequado independente do momento de adição, o que favorece sua aplicação prática, econômica e ambiental, visto que fornece uma alternativa de reutilização de matérias que seriam descartadas. A adição junto ao ligante é a estratégia mais recomendada, por apresentar melhores níveis de interação com o CAP envelhecido.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABDO, A. M. A. Utilizing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials in New Pavements – A Review. **Int. J. of Thermal & Environmental Engineering** Volume 12, No. 1 61-66.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. M 320. **Standard specification for performance-graded asphalt Binder**. Washington, D.C.: AASHTO, 2021.

ARRUDA, S. M.; **Avaliação do comportamento mecânico e autorregenerativo de misturas asfálticas recicladas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087**: Misturas Asfálticas: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BEHBAHANI, H.; AYAZI, M. J.; MONIRI, A. Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement. **Petroleum Science and Technology**, v. 35(15), p. 1556–1561. 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Boletins técnicos CNT. Brasília, 2024.

COSTA, D. *et al*. Effects of recycling agents and methods on the fracture and moisture resistance of asphalt mixtures with high RAP contents. **Construction and Building Materials**, v. 367, p. 130312, 2023.

COSTA, D. B. *et al*. Efeitos do momento de adição e do agente de reciclagem no desempenho à rigidez e umidade de misturas recicladas. **38° ANPET,** v.3, nov. 2024.

COSTA, D. B. *et al*. **Análise do envelhecimento, rigidez e suscetibilidade a presença de água em misturas recicladas com adição de agentes de reciclagem**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de

Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2022.

DA FERREIRA, L. *et al.* Determinação da ativação relativa do ligante RAP e avaliação da interferência de aditivos de reciclagem em misturas asfálticas produzidas com 100% RAP. **TRANSPORTES**, v. 31, n. 3, p. e2805-e2805, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT-ME 180/18**: Pavimentação: Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT – ME 136/18**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION RESEARCH AND TECHNOLOGY -FHWA. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. **Federal Highway Administration**, USA. 2016.

FRITZEN, M. A *et al*. Comportamento de misturas mornas por processo de espumação em diferentes temperaturas de usinagem e compactação. **Revista Estradas**, v. 11, p. 32-41, 2012.

LENG. Z., SREERAM, A., PADHAN, R. K., TAN, Z.; Value-added application of waste pet based aditives in bituminous mixtures containing high percentagem of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 615-625, 2018.

LU, D. X.; SALEH, M.; NGUYEN, N. H. T. Evaluatin of fracture and fatigue cracking chaacterization ability of nonstandardized semicircular-beding test for asphalt concrete. **American Society of Civil Engineers**.

MAMUN, A. A.; AL-ABDUL WAHHAB, H. I. Evaluation of waste engine oil-rejuvenated asphalt concrete mixtures with high RAP contente**. Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, p. 8, 2018.

MOGHADDAM, T. B.; BAAJ, H. The use of Rejuvenating Agents in production of Recycled hot mix Asphalt: A Systematic Review. **Construction and Building Materials**. v. 114, p. 805–816, 2016.

NABIZADEH, H. Effects of rejuvnators on high-rap mixtures based on laboratoy tests of Asphalt Concrete (AC) mixtures and Fine Aggregate Matrix (FAM) mixtures. **Contruction and Building Material.** v. 152, p. 65 – 73. 2017.

RAUL, C. M. **Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019.

RONDÓN, H. A.; HERNÁNDEZ, J. A.; REYES, F. A. A Review of Warm Mix Asphalt Technology: Technical, Economical and Enviromental Aspects**. Ingeniería e Investigación**, 58 v. 35(3), p. 5–18. 2015.

SILVA, J.P.S.; FARIAS, M.M. Avaliação química e ambiental de misturas asfálticas rejuvenescidas. **Revista Matéria**, v.23, n.3, Rio de janeiro, 2018.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019.

TORRES, P.R.B. *et al*. Análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual. **Transportes**, v. 30, n. 1, p. 2585. 2022.

UNGER FILHO, W. **Estudo de misturas asfálticas recicladas a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsificado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Eng. De Transportes. São Paulo, SP. 2019.

YOUSEFI, A. *et al*. Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) aditives and reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, Vol. 268, p. 0950-0618, 2021.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% Recycled Asphalt. **Materials and Structures**, v.48, p. 2475-2488. 2015.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** (2014) Dissertação (Mestrado em ciências em Engenharia Civil) - Instituto Adalberto Luiz Coimbra de pós-graduação e pesquisa de engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Maria Vitoria Araujo Sousa – Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / CCBL / Curso de Engenharia Civil - maria.vas@discente.ufma.br .

Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) / CCT / Departamento de Engenharia Civil – adriano.elisio@professor.ufcg.edu.br .

Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) / CCT / Departamento de Engenharia Civil – ledach@uol.com.br .

Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz – Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / CCET / Curso de Engenharia Civil – priscila.luz@ufma.br .

Carla Caroline Alves de Carvalho – Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / CCBL / Curso de Engenharia Civil – cca.carvalho@ufma.br .

Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida – Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / CCET / Curso de Engenharia Civil – alice.almeida@ufma.br .

George Fernandes Azevedo – Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / CCET / Curso de Engenharia Civil – gf.azevedo@ufma.br.

Daniel Beserra Costa – Universidade Federal do Maranhão (UFMA) / CCBL / Curso de Engenharia Civil – daniel.beserra@ufma.br .

INVESTIGAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGANTE CONVENCIONAL AO LONGO DO ENVELHECIMENTO

Francielly de Almeida Zanchi, Estefani Schutz Cheiram, Lorenzo Chavez Pacheco, Victoria Nunes-Ramos, Luciano Pivoto Specht, Deividi da Silva Pereira, Silvio Lisboa Schuster
Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
O trincamento por fadiga é considerado um dos principais defeitos em pavimentos asfálticos, sendo ocasionado pelo carregamento repetitivo do tráfego incidente na estrutura. O fenômeno de envelhecimento também é um dos principais meios de deterioração das misturas asfálticas, que herdam o comportamento dos ligantes que envelhecem ao longo da exposição em campo. O envelhecimento afeta a resistência à fadiga dos ligantes, entretanto ainda sobram dúvidas sobre a existência de ganho/perda de performance e como os principais testes de fadiga em ligantes respondem a diferentes níveis de envelhecimento. Neste estudo, utilizou-se um ligante convencional e testes de varredura de tempo em deformação controlada (Time Sweep - DC) e tensão controlada (Time Sweep - TC); e de varredura de amplitude (Linear Amplitude Sweep). Em geral, os ensaios realizados mostram que o envelhecimento pode aumentar a resistência à fadiga em níveis de envelhecimento iniciais, mas tendem a reduzi-las em níveis altamente envelhecidos.
Palavras-chave: Ligante, Fadiga, Envelhecimento, LAS, Time Sweep

1. INTRODUÇÃO

O envelhecimento do ligante, que ocorre devido aos efeitos oxidativos, leva ao aumento de rigidez e a perda de flexibilidade, levando a um comportamento mais frágil de ruptura, prejudicando a capacidade de suportar solicitações constantes do tráfego. Aponta-se na literatura que este comportamento aumenta a suscetibilidade de formação de trincamento por fadiga, sendo este um dos principais defeitos dos pavimentos asfálticos (Saleh et al., 2020; Schuster, 2023). Sabendo que as misturas asfálticas herdam grande parte do comportamento dos ligantes e que estes envelhecem ao longo do tempo de exposição em campo, torna-se necessário compreender o desempenho a fadiga do ligante asfáltico à medida que este envelhece. Esta tarefa permanece desafiadora, visto que nenhum dos métodos existentes de avaliação despontou como ferramenta concretizada na literatura, muito embora no cenário brasileiro o DNIT tenha proposto o método LAS preconizado na norma (DNIT 439/2022- ME, 2022). O envelhecimento do ligante ocorre de duas formas: a curto prazo, que representa as atividades de mistura, transporte e pavimentação que o ligante asfáltico sofre, e o envelhecimento a longo prazo, que se refere a vida útil do pavimento. A tolerância à fadiga dos ligantes asfálticos pode ser observada em laboratório por meio de ensaios que aplicam cargas cíclicas ao ligante, de modo ligeiramente semelhante ao tipo de carregamento que ocorre em campo.

Entre os principais testes utilizados para a avaliação de fadiga de ligantes asfálticos estão os testes de Time Sweep (TS) (Bonnetti et al., 2002; Martono et al., 2007) e o Linear Amplitude Sweep Test (LAS) (Hintz et al., 2011). A principal diferença entre os testes TS e LAS é o esquema de carregamento. O Time Sweep é um teste de fadiga factual que aplica milhares de cargas repetitivas à amostra ao longo do tempo, enquanto o LAS é um protocolo de teste acelerado que usa uma grande faixa de amplitude de deformação para simular a fadiga durante um curto período. Embora a varredura temporal (TS) consuma muito tempo, é considerada uma abordagem que melhor representa o real processo de fadiga, uma vez que é o método que aplica carregamento repetitivo contínuo às amostras até que ocorra dano (Hintz et al., 2011; Hintz & Bahia, 2013; Wang et al., 2015). Nesta pesquisa, três testes foram realizados para um ligante convencional, sendo eles: Time Sweep Controlled Strain, no qual as amostras recebem carregamentos cíclicos com diferentes deformações constantes, Time Sweep Controlled Stress, em que, da mesma forma que o teste anterior, o ligante também sofre carregamentos cíclicos, porém com a tensão controlada e por fim o teste de LAS (Linear Amplitude Sweep Test).A partir disso, o objetivo deste estudo foi de investigar a resistência à fadiga ao longo do processo de envelhecimento laboratorial oxidativo em um ligante convencional, comparando os resultados de diferentes ensaios de varredura de tempo (TS) e de amplitude linear (LAS).

2. MATERIAS E MÉTODOS

Neste estudo, um ligante convencional (penetração 50/70) foi analisado em vários níveis de envelhecimento. Os testes de fadiga incluem LAS e TS, foram executados em um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) Anton Paar SmartPave 102, utilizando placas de 8 mm de diâmetro com um espaçamento (gap) de 2 mm, em

temperatura fixa de 19°C para todos os testes. A média de duas amostras válidas foi utilizada como resultado final de cada condição de teste.

2.1. Protocolos de Envelhecimento

O fenômeno de envelhecimento foi induzido por meio de dois processos: a curto prazo, simulado no laboratório pelo Rolling Thin-film Over Test (RTFOT) e a longo prazo, caracterizado no laboratório pelo Pressure Aging Vessel (PAV). O ligante foi primeiramente envelhecido usando o teste padrão RTFOT a 163 C° por 85 minutos, de acordo com a norma (AASHTO T 240, 2021). Em seguida, o ligante remanescente do RTFOT foi submetido ao PAV, de acordo com a norma (AASHTO R28-22, 2022) por 20, 40, 60, 80 e 100 horas a 2,1MPa e 100°C. O fluxograma dos níveis de envelhecimento e dos testes realizados pode ser visualizado na Figura 1.

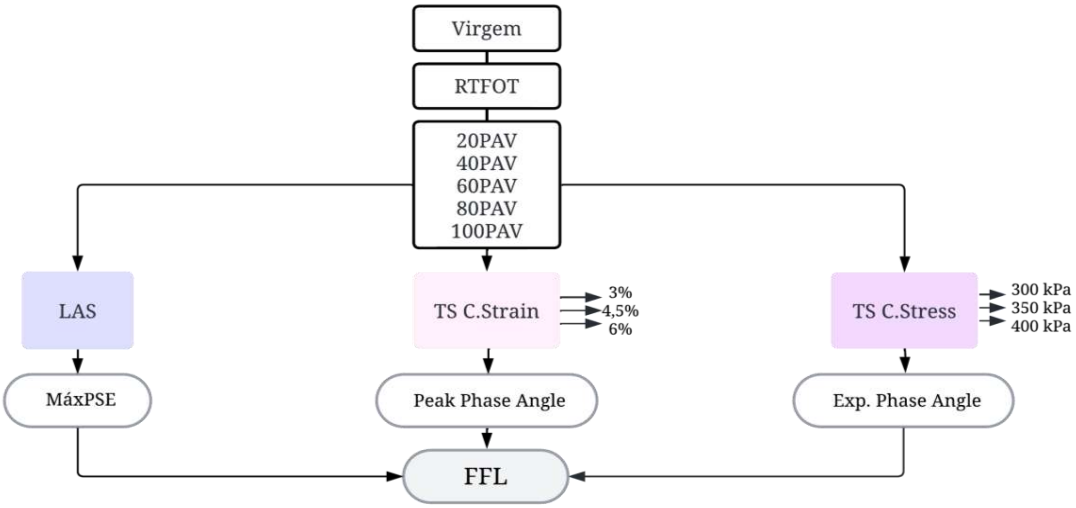


Figura 1: Fluxograma de ensaios.

2.3. Linear Amplitude Sweep Test - LAS

O teste de LAS foi realizado seguindo o procedimento (AASTHO T 391, 2020), com amplitude de deformação que vai de 0,1% a 30% em uma frequência de 10 Hz. Durante o ensaio, as amplitudes de deformação aumentam de 0,1% a 30% linearmente. O teste é conduzido utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). Para a avaliação do critério de falha, foi utilizado a máxima energia pseudo-deformação armazenada (MaxPSE) (Wang et al., 2015). O modelo VECD descrito na AASHTO T 391-20 foi utilizado para se obter as curvas de fadiga.

2.4. Time Sweep Controlled Strain

O Time Sweep com deformação controlada também foi realizado a 10Hz. Três diferentes níveis de deformação (3%, 4,5% e 6%) são testados, com duas amostras para cada. O falha da amostra por fadiga foi definida como o valor de pico do ângulo de fase (amplamente utilizado como critério de falha de misturas asfálticas (Resse, 1997)). Este critério não pode ser utilizado no ensaio de LAS pois este não apresenta formação de pico de ângulo de fase ao longo do teste em ligantes de menor rigidez em temperaturas intermediarias, como ligante poliméricos e modificados por borracha. No teste de TS com deformação controlada as curvas de fadiga são obtidas diretamente pela observação do ciclo de falha e o nível de deformação imposta.

2.5. Time Sweep Controlled Stress

No ensaio de tensão controlada, Time Sweep com tensão controlada, as amostras receberam carregamentos cíclicos com diferentes tensões constantes de 300kPa, 350kPa e 400kPa (adotados a com base no estudo de (Wang et al., 2016) e a falha por fadiga na amostra foi definida no ciclo onde o valor de ângulo de fase apresenta a maior taxa de incremento de valor, visto que neste teste a ruptura ocorre de maneira brusca, com o valor de ângulo de fase aumentando e o valor de rigidez caindo repentinamente. Visto que este é um teste de tensão controlada, as curvas de fadiga (deformação vs ciclo de falha) são construídas obtendo-se o valor de

deformação como a média de deformação dos 100 primeiros ciclos, causadas pelo nível de tensão selecionado em cada teste.

2.6. Obtenção do parâmetro FFL

A partir das curvas de fadiga (curvas de Wöhler, o parâmetro Fator de Fadiga do Ligante (FFL) representado pela área abaixo da curva de fadiga entre as deformações de 1,25% e 2,5% foi calculado (Martins, 2014; Underwood, 2011). Quanto maior o valor de FFL, mais a direita está posicionada a curva de fadiga, demonstrando que para uma mesma deformação aplicada, mais ciclos o ligante é capaz de tolerar sem falhar por fadiga, sendo assim, maior a resistência à fadiga do material (Figura 2). Ressalta-se que os valores de FFL não são comparáveis entre os diferentes tipos de teste.

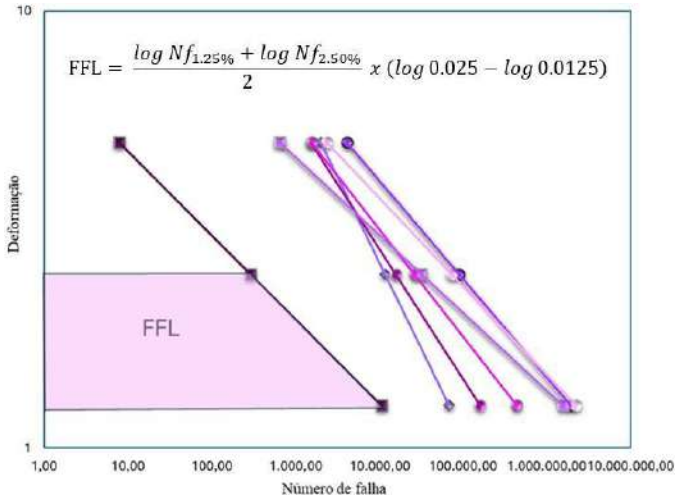


Figura 2: Processo de obtenção do parâmetro FFL.

3. RESULTADOS

3.1. LAS

A partir do ensaio de LAS, verificou-se ganho de FFL e consequente de resistência a fadiga nos estágios de envelhecimento até 40PAV, com os valores de RTFOT próximos aos valores apresentados pelo ligante virgem (Figura 3). As porcentagens apresentadas na Figura 3 são sempre referentes ao valor inicial de FFL obtido no ligante virgem. Desta forma, verifica-se que para nível de envelhecimento de 60PAV, o ligante passou a apresentara perda de resistência a fadiga de 6,14% em relação ao ligante virgem. Os estágios 80PAV e 100PAV também demonstram perda de desempenho a fadiga em relação ao material original.

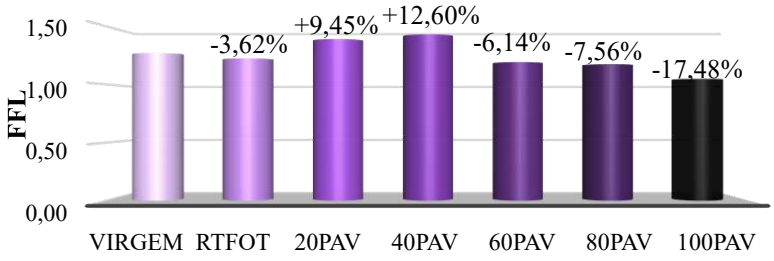


Figura 3: Fator de Fadiga do Ligante ao longo do envelhecimento a partir do teste de LAS.

Tais achados podem não ir diretamente de encontro ao senso comum, sugerindo que ligante envelhecidos possam performar melhor que ligante menos oxidados. Entretanto, o ganho de rigidez ao longo do envelhecimento parece impactar positivamente na resposta a fadiga até certos níveis. É importante lembrar também que uma análise solo do ligante não necessariamente representa uma análise de ligante+agregados

(mistura asfáltica) onde questões como adesividade podem passar ser comprometidas com ligantes mais envelhecidos.

3.2. Time Sweep – Deformação Controlada

A fim de verificar se o teste acelerado de LAS não fosse o responsável por tais achados, o teste de time Sweep com deformação controlada foi realizado, e os valores de FFL obtidos (Figura 4). Também neste teste, o ligante apresentou ganho de desempenho inicial, até o nível de 20PAV. Diferente do teste de LAS, o nível 40PAV já apresentou valor similar de FFL ao ligante virgem, passando a apresentar queda de desempenho a partir do nível 60PAV. Conclui-se assim que a tendencia de comportamento ao longo do envelhecimento foi muito semelhante a partir dos resultados de LAS e TS com deformação controlada.

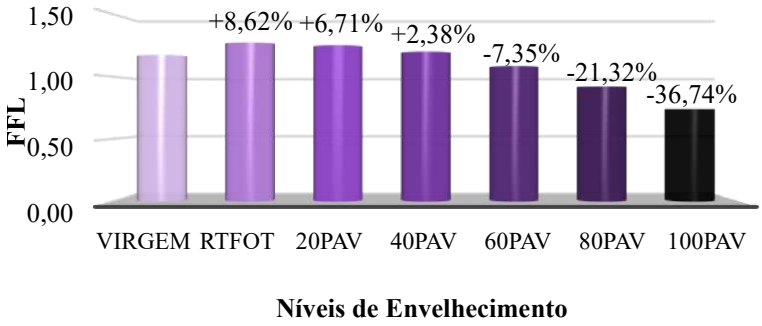


Figura 4: Fator de Fadiga do Ligante ao longo do envelhecimento a partir do TS com deformação controlada.

3.3. Time Sweep Tensão Controlada

Os testes de TS com tensão controlada apresentaram eleva dispersão e ensaios considerados muito longos (amostras em níveis mais baixos de tensões chegaram até 40 horas com aplicação de carregamentos). Níveis mais elevados de envelhecimento, que induzirem maiores rigidezes, levaram muitas das amostras a apresentarem descolamento do sistema de placas do reômetro visto que aplicações elevadas de tensão nos primeiros carregamentos, em amostras ainda integras e com elevada rigidez favoreciam ser mais fácil a amostra descolar do que propriamente deformar como se esperava.

Desta forma, os resultados encontrados foram apenas até o nível de envelhecimento de 20PAV (Figura 5). Os resultados indicaram leve ganho de resistência a fadiga para o ligante após RTFOT em relação ao ligante virgem, e posteriormente, leve perda de desempenho para o ligante no estado 20PAV.

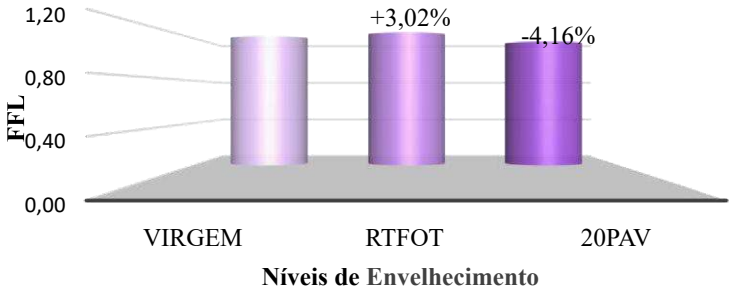


Figura 5: Fator de Fadiga do Ligante ao longo do envelhecimento a partir do TS com tensão controlada.

4. CONCLUSÕES

Após aplicar os protocolos de envelhecimento e realizar os três distintos testes de fadiga: *linear amplitude sweep test*, *time sweep* com deformação controlada e *time sweep* com tensão controlada; foi possível estabelecer com maior confiança o comportamento de resistência a fadiga do ligante ao longo do envelhecimento de curto e longo prazo. Ressalta-se que as conclusões se restringem a um ligante convencional CAP 50/70 e as definições de falha utilizadas, podendo os resultados se alterar para outras condições investigadas. As principais conclusões foram:

a) O teste de LAS indica que o ligante ganhou desempenho a fadiga até níveis de envelhecimento de 40PAV, demonstrando queda de performance em relação ao ligante virgem a partir do estado 60PAV.

b) O teste de TS com deformação controlada apresentou perfil de comportamento de FFL muito similar ao obtido no LAS, com o ligante apresentando melhor comportamento que o virgem até o estado 40PAV e depois demonstrando queda de desempenho.

c) O teste TS com tensão controlada demonstrou dificuldades experimentais, como alta variabilidade no ciclo de falha para mesmos valores de tensão testados, descolamento de amostras das placas do reômetro, e longa duração dos testes. Foi possível obter resultados confiáveis até o estado 20PAV, com aumento performance para o nível RTFOT e queda para 20PAV quando comparados ao ligante virgem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASTHO T 391. (2020). *Estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep* (p. 11).

AASHTO R28-22. (2022). *AASHTO R 28-22 - Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*.

AASHTO T 240. (2021)*: Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder.*

AASTHO T 391. (2020). *Estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep* (p. 11).

Bonnetti, K. S., Nam, K., & Bahia, H. U. (2002). Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders. *Transportation Research Record*, *1810*, 33–43. https://doi.org/10.3141/1810-05

Bueno, L. D., Schuster, S. L., Specht, L. P., Pereira, D. da S., Nascimento, L. A. H. do, Kim, Y. R., & Brenner, M. G. B. (2020). Asphalt pavement design optimisation: a case study using viscoelastic continuum damage theory. *IJPE*, *23*(4), 1070–1082. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1788030

DNIT 439/2022- ME. (2022). *Pavimentação – Ligante asfáltico –Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – Linear Amplitude Sweep) – Método de ensaio*. 1–18.

Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., & Bahia, H. (2011). Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record*, *2207*, 99–106. https://doi.org/10.3141/2207-13

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136698

Hintz, C., & Bahia, H. (2013). Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter. *Transportation Research Record*, *2370*, 10–16. https://doi.org/10.3141/2370-02

Hu, Y., Sreeram, A., Airey, G. D., Li, B., Si, W., & Wang, H. (2024). Comparative analysis of time sweep testing evaluation methods for the fatigue characterisation of aged bitumen. *Construction and Building Materials*, *432*.

Martins, A. T. (2014). *Contribuição Para a Validação Do Ensaio De Resistência Ao Dano Por Fadiga Para Ligantes Asfálticos*. 98.

Martono, W., Bahia, H. U., & D'Angelo, J. (2007). Effect of Testing Geometry on Measuring Fatigue of Asphalt Binders and Mastics W. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*. https://doi.org/DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(746)

Resse, R. E. (1997). Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life. *Association of Asphalt Paving Technologists*, *66*, 604–632.

Saleh, N. F., Keshavarzi, B., Yousefi Rad, F., Mocelin, D., Elwardany, M., Castorena, C., Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2020). Effects of aging on asphalt mixture and pavement performance. *Construction and Building Materials*, *258*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120309

Schuster, S. L. (2023). Investigation of the aging phenomenon in asphalt binders and asphalt mixtures: linear viscoelastic behavior and performance properties. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. 500pgs.

Underwood, B. S. (2011). Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete. Dissertação de Mestrado. North Carolina State University. http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/7217

Wang, C., Castorena, C., Zhang, J., & Kim, Y. R. (2015). Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, *84*(September), 269–300. https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077010

Wang, C., Zhang, H., Castorena, C., Zhang, J., & Kim, Y. R. (2016). Identifying fatigue failure in asphalt binder time sweep tests. *CBM*, *121*, 535–546. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.020

Yang, K., Li, R., Castorena, C., Shane Underwood, B., & Cui, H. (2024). A framework to identify fatigue failure of asphalt binders under multiple aging levels using linear amplitude and time sweep testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1). https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2328132

Silvio Lisboa Schuster (silviolschuster@ufsm.br)
Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Transportes, Av. Roraima, 1000 – Camobi, Santa Maria, RS, Brasil.

Misturas Asfálticas ou com Ligantes Alternativos

Relatórios de pesquisa de iniciação científica



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

O USO DO ASFALTO-BORRACHA NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Deilson da Silva Costa Júnior, Tallyta da Silva Curado
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG, Câmpus Jataí

RESUMO
Este trabalho aborda o uso do asfalto-borracha no Brasil por meio de uma revisão sistemática da literatura. O objetivo foi identificar a viabilidade técnica e os desafios de sua aplicação, considerando produção, estocagem, durabilidade e desempenho em pavimentação. O método envolveu a seleção e análise de estudos científicos relevantes. O asfalto-borracha, que incorpora borracha reciclada de pneus, apresenta propriedades superiores como maior durabilidade, resistência ao envelhecimento e redução de ruído. Apesar dos desafios de implementação, como a necessidade de adaptação das técnicas de pavimentação, o estudo conclui que este material oferece uma solução viável e benéfica para a infraestrutura viária no Brasil, promovendo a sustentabilidade pela reciclagem de pneus inservíveis. No entanto, há poucos trabalhos que relatam análises da aplicação em vias brasileiras, dificultando a abrangência da pesquisa.

1. OBJETIVO

O presente trabalho objetiva realizar uma revisão sistemática da literatura a fim de identificar a viabilidade técnica e os desafios da utilização do asfalto-borracha no Brasil, considerando suas formas de produção, aplicação, armazenamento, durabilidade e desempenho em pavimentação.

2. MÉTODO

A metodologia utilizada foi a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) que seguiu protocolos específicos para entender um conjunto de documentos referentes ao tema estudado. Adotando critérios bem estabelecidos, a RSL busca reduzir a subjetividade e promover a objetividade do processo (Galvão; Ricarte, 2019). O levantamento bibliográfico consistiu na busca e análise de documentos disponíveis por meio das bases de dados Scielo, Scopus, Web of Science. Para isso, foi utilizada a combinação de palavras-chave com operadores booleanos definindo a expressão (“rubber asphalt” OR “rubber binder” OR (“modified binder” AND rubber) OR “asfalto-borracha” OR “asfalto borracha” OR (“ligante modificado” AND borracha)) AND (“Brazil” OR Brasil) para a pesquisa nas bases de dados no dia 13 de setembro de 2024.

Para seleção dos trabalhos para extração das informações, foram considerados critérios de inclusão e exclusão, de modo que fossem considerados apenas artigos de periódicos ou de congresso em língua inglesa ou portuguesa que apresentassem, pelo menos, um dos seguintes tópicos: i) resultados de análises de comportamento em campo e/ou laboratorial do asfalto-borracha ou de misturas com o asfalto-borracha; ii) aspectos relacionados ao processo produtivo e/ou executivo envolvendo o asfalto-borracha. Para essa verificação, foram realizadas etapas de avaliação dos documentos por meio de leitura de títulos, dos resumos e completa dos textos. Em cada uma das etapas, foram excluídos trabalhos

3. RESULTADOS

3.1. Seleção dos trabalhos

Foram encontrados 33 arquivos pela busca nas bases de dados pela análise de títulos, resumos e palavras-chave dos trabalhos, exceto na Web of Science em que a pesquisa foi realizada analisando todos os campos dos arquivos. Isso foi definido para que fosse viável a realização da RSL para o escopo da pesquisa a nível de graduação. Em cada etapa, houve a exclusão da quantidade de artigos indicados entre parênteses: idioma (1), duplicados (8), tipo de trabalho (0), leitura de títulos (1), leitura de resumos (0), textos completos não disponíveis (7) e leitura completa (3). Dessa forma, foram selecionados 13 arquivos para extração das informações sobre o uso do asfalto-borracha no Brasil que foram publicados após 2005, inferindo que os arquivos são referentes aos últimos 20 anos. Apenas três trabalhos estão em língua portuguesa, enquanto os demais em língua inglesa tiveram colaboração de, pelo menos, um pesquisador brasileiro e/ou instituição de ensino brasileira.

3.2. Asfalto-borracha no Brasil

O asfalto-borracha destaca-se por suas propriedades superiores, como maior durabilidade, resistência ao envelhecimento e redução de ruído, resultantes da mistura de asfalto com borracha reciclada. Sua produção predominante no Brasil é via úmida (Klinsky; Bardini; Faria, 2020) com *terminal blending*. Estudos mostram que a adição de borracha reduz a penetração do ligante asfáltico e aumenta a temperatura de amolecimento, indicando maior rigidez e resistência a deformações (Dantas Neto *et al.*, 2006).

Pereira e Brasil (2022) e Yshiba, Soares e Simões (2005) ressaltam alguns benefícios técnicos do asfalto-borracha que, em termos de desempenho e durabilidade, proporciona maior resistência às deformações permanentes e maior longevidade comparado aos asfaltos convencionais, com menor custo total ao longo do tempo. Além disso, possui maior resistência a trincas e deformações, melhora a aderência do pneu ao solo, reduz o risco de aquaplanagem e diminui os níveis de ruído do tráfego.

No entanto, foram identificados desafios significativos, como a necessidade de mais pesquisas para compreender melhor os efeitos da borracha e dos agregados reciclados, e as lacunas na literatura sobre ensaios em condições reais de tráfego e clima. O custo inicial do asfalto-borracha é cerca de 15% maior que o convencional (Soares *et al.*, 2021), e há obstáculos legais e institucionais (Pereira; Brasil, 2022). A pesquisa também revelou que a maioria dos estudos analisados não aborda detalhadamente os cuidados necessários para estocagem e transporte do material, permanecendo como questões abertas para futuras análises.

4. CONCLUSÕES

A RSL permitiu compreender as formas de produção e aplicação, desafios, desempenho e durabilidade do asfalto-borracha, apesar de se restringir apenas aos trabalhos das referidas bases de dados, o que limitou o alcance da pesquisa, principalmente em relação aos trabalhos publicados em congressos nacionais. Embora existam lacunas de conhecimento, principalmente sobre estocagem e transporte, e desafios de custo e regulamentação, o asfalto-borracha demonstrou ser uma solução viável e benéfica para a pavimentação no Brasil. Ele melhora significativamente a qualidade do asfalto, proporcionando maior resistência, durabilidade, segurança e redução de ruído, além de contribuir para um desenvolvimento mais sustentável da infraestrutura viária ao promover a reciclagem de pneus inservíveis. A expansão de estudos de caso em diferentes regiões do Brasil é crucial para validar seu comportamento em diversas condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dantas Neto, S.; M. M. Farias; J. C. Pais e P. Pereira (2006) Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders. *Road Materials and Pavement Design*, v. 7, n. 1, p. 19-20. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690030

Galvão, M. e I. Ricarte (2019) Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *LOGEION*: Filosofia da informação, Rio de Janeiro, v. 6 n. 1, p.57-73. DOI: 10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73

Klinsky, L. M. G; V. C. Faria (2017) *Asfalto-borracha: Revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas.* Relatório de Pesquisa. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra do Grupo CCR. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/nova-dutra/relatorios-de-pesquisa-rdt-1/asfalto-borracha-revisao-bibliografica-avaliacao-reologica-do-ligante-asfaltico-e-determinacao-dos-parametros-mecanicos-das-misturas-asfalticas-1.pdf/view. Acesso em: 10 jun. 2024.

Pereira, C. G. e D. R. Brasil (2022) A tutela judicial do princípio da vedação do retrocesso ambiental: o caso do uso de pneumáticos na massa asfáltica no estado de Minas Gerais. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, v. 12, n. 3. DOI: 10.18226/22370021.v12.n3.20

Soares, M. P. S. P.; N. A. Cerqueira; F. F. Almeida; A. R. G. Azevedo e M. T. Marvila (2021) Technical, Environmental, and Economic Advantages in the Use of Asphalt-Rubber. Characterization of Minerals, Metals, and Materials. *The Minerals, Metals & Materials Series.* DOI: 10.1007/978-3-030-65493-1_59.

Yshiba, J. K.; Soares, P. F. e F. A. Simões (2005) Comparative study of noise traffic measurement in different asphalt pavement. In: *Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. Rio de Janeiro. Rio Inter Noise 2005. Rio de Janeiro. p. 01-10.

Deilson da Silva Costa Júnior (costa.d@estudantes.ifg.edu.br)
Tallyta da Silva Curado (tallyta.curado@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Goiás, Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, Jataí - GO, Brasil.

Misturas Asfálticas ou com Ligantes Alternativos

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

IMPACTO NA UTILIZAÇÃO DO CONCEITO DE *BALANCED MIX DESIGN* (BMD) A PARTIR DE ANÁLISES ECONÔMICAS E DE DESEMPENHO

Lucas Aragão Lira, Iuri Sidney Bessa
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
Como uma alternativa aos métodos tradicionais de dosagem de misturas asfálticas, cuja escolha do teor ótimo é baseada puramente em critérios volumétricos, o conceito de *Balanced Mixture Design* (BMD) foi pensado para que o critério de escolha do teor de ligante fosse baseado em propriedades mecânicas da mistura asfáltica. Tal método, embora incialmente mais oneroso devido à realização de ensaios mecânicos mais complexos, é apontado como mais racional pela literatura, podendo ser utilizado para determinar a viabilidade da mistura como revestimento em estruturas reais, através de ferramentas de dimensionamento. Nesta pesquisa, espera-se verificar adequação do BMD para o cenário nacional, seguindo a normativa vigente, e comparando os resultados de dosagem volumétrica e por desempenho, considerando diversas configurações de misturas asfáltico, incluindo o uso de aditivos e o uso de técnicas de escolha granulométrica presentes na literatura. Também, espera-se verificar o custo equivalente das metodologias adotadas, buscando determinar o impacto econômico na escolha de materiais através de novas metodologias.
Palavras chave: projeto de mistura balanceada, desempenho mecânico, dimensionamento de pavimentos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No cenário global, a busca por racionalizar os processos construtivos em obras de infraestrutura é uma tendência crescente. Essa abordagem visa atender não apenas a requisitos mecânicos, mas também a parâmetros ambientais, econômicos e sociais, alinhado com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável N° 9 (ODS 9) da ONU. No Brasil, o transporte rodoviário possui grande relevância na formulação de políticas públicas, sendo o principal modal para a movimentação de pessoas e mercadorias. Apesar dos significativos investimentos públicos e privados, a infraestrutura rodoviária do país enfrenta desafios crônicos de durabilidade e altos custos de manutenção, conforme aponta a pesquisa CNT (2024).

Ao considerar pavimentos asfálticos, grande parte desses desafios se originam na própria escolha do tipo e proporção dos materiais a serem utilizados, ou dosagem. O estado da prática no Brasil ainda se apoia em metodologias empíricas e volumétricas incapazes de prever adequadamente o desempenho do pavimento sob as severas condições de tráfego e clima do país, com destaque para a dosagem Marshall, ainda o método mais utilizado em âmbito nacional, com origens na década de 1940, e possuindo críticas relacionadas a não consideração do envelhecimento do ligante na fabricação/transporte, e do processo de compactação diferente do que ocorre em campo (Bernucci *et al.*, 2022). Como uma evolução da dosagem Marshall, na década de 1980, através do estudo denominado *Strategic Highway Research Program* (Kennedy *et al.*, 1994), foi proposta a dosagem Superpave, que embora tenha apresentado avanços em relação à Marshall, ainda se baseou em parâmetros volumétricos para a dosagem.

Como alternativa a esses métodos de dosagem mais antigos, estudos sobre o uso de dosagem baseada no desempenho, ou do inglês, *Balanced Mix Design* (BMD), se destaca como uma evolução no uso racional dos recursos naturais e a consideração de critérios como clima para uma melhor escolha de materiais ainda no processo de dosagem, sendo uma metodologia também superior quando se trata do uso de materiais alternativos como revestimento fresado (RAP) ou aditivos rejuvenescedores (Li *et al*., 2023). Embora o conceito de BMD seja baseado na obtenção de critérios mecânico para determinação do teor de ligante, os critérios volumétricos podem ser utilizados como auxiliares, onde funcionam como uma transição entre a dosagem puramente volumétrica e a dosagem realizada somente através do desempenho (Yu *et al.*, 2025), processo de adaptação necessário, principalmente considerando a realidade brasileira baseada na metodologia empírica volumétrica do método Marshall.

A partir da dosagem de BMD, a forma de obtenção das características mecânicas, e consequentemente os resultados obtidos e critérios utilizados, ainda não são consenso na literatura (Li *et al*., 2023). Além disso, não há estudos suficientes correlacionando os resultados obtidos com analises de dimensionamento mecanístico-empíricos, de forma a utilizar as ferramentas de previsão de desempenho como critério de escolha do teor adequado de ligante e reduzir a distância do que é feito em laboratório para as características observadas em

campo, semelhante ao realizado no estado americano de Louisiana (Pant *et al.*, 2024). Segundo Diefenderfer *et al.* (2021), as metodologias de diferentes estados norte-americanos para aplicação do BMD pouco variam para deformação permanente, onde realizam-se majoritariamente ensaios com simuladores de tráfego. Para fadiga, no entanto, são utilizadas diversas metodologias, não havendo consenso sobre o melhor tipo de ensaio. Alternativamente, também são introduzidos ensaios alternativos como o de resistência à umidade.

No Brasil, pesquisa como a de Rocha *et al.* (2023), compararam os parâmetros resultantes de dosagem BMD com os obtidos através de teor ótimo da metodologia Superpave, embora não tenha considerado o desempenho em diferentes faixas de temperatura no dimensionamento, além da utilizado função transferência para determinação de área trincada.

2. METODOLOGIA

A pesquisa tem como proposição se basear primeiramente em uma mistura asfáltica de referência, com agregados e ligantes asfálticos previamente caracterizados e com granulometria seguindo a Faixa C (12,5 mm) da norma DNIT 136/2024, dosando conforme metodologia baseada em volumetria (Superpave) e também dosada com base no conceito de BMD. Os parâmetros necessários para a dosagem BMD serão obtidos através de ensaios de rigidez (Módulo Complexo – AASHTO T342), fadiga (Tração direta – AASHTO TP107) e deformação permanente (Stress Sweep Rutting – AASHTO TP134), proporcionando dados que servirão de entrada para programas computacionais de dimensionamento mecanístico-empírico (CAP3D-D ou FlexPave). Busca-se determinar a faixa ótima de ligante, baseado em critérios climáticos de diferentes regiões brasileiras, ou a as condições em que os teores de ligante ensaiados tenha resultados aceitáveis baseado em diferentes temperaturas ambientais e espessuras para camada de revestimento, como exemplificado na Figura 1.

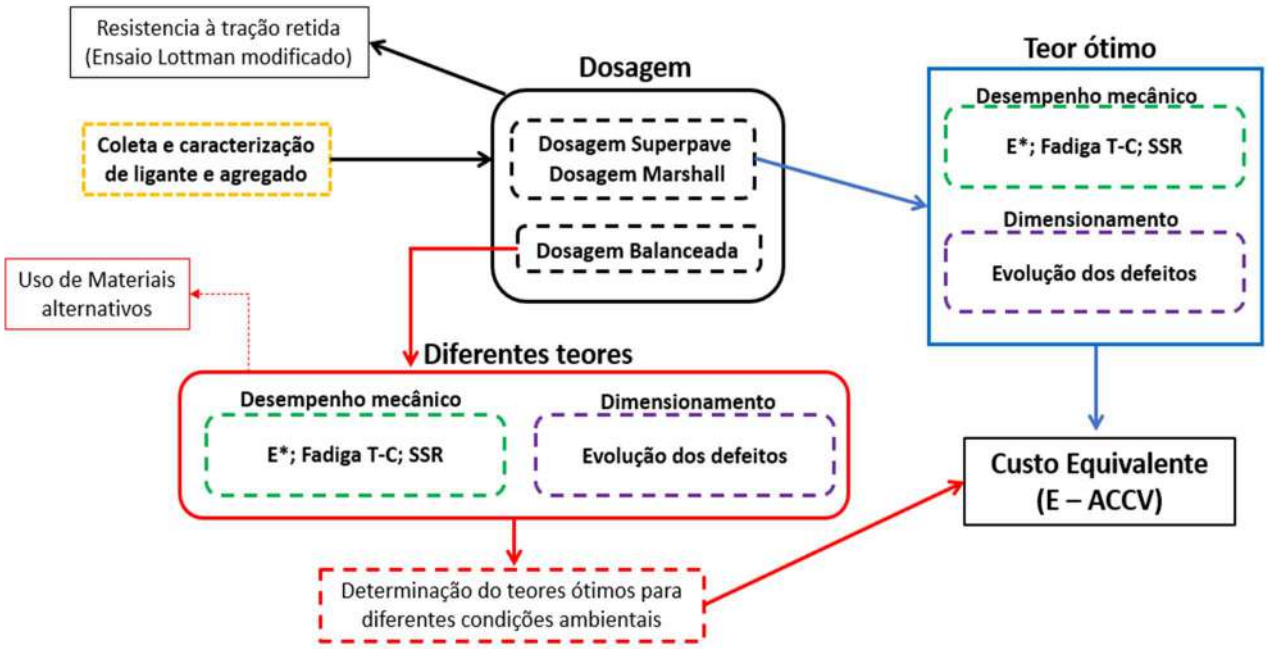


Figura 1: Representação preliminar do programa de pesquisa

Espera-se também ser possível determinar como metodologias de seleção granulométrica (FAD – CI, pensada para melhorar o desempenho à fadiga (Oliveira, 2019) e Bailey, voltada para deformação permanente (Bastos, 2016) podem alterar a situações de uso ideal para cada teor de ligante ensaiado e o impacto que a adição de materiais alternativos pode apresentar nas análises.

Baseado na metodologia proposta por Oliveira *et al.* (2024), também espera-se obter o custo equivalente, baseado numa implantação fictícia da camada de revestimento, em uma estrutura padronizada para buscar, ao menos dos teores ótimos obtidos, o custo de ciclo de vida, baseado na evolução dos defeitos ao longo da vida útil da estrutura (120 meses).

3. RESULTADOS ESPERADOS

Como principais resultados esperados para a presente pesquisa, podem ser citados:

- Determinação de uma faixa de teor de ligante ótima para uma mistura asfáltica de referência, e avaliar como a adição de determinados aditivos, influencia na determinação desse teor, seguindo diferentes metodologias de dosagem;
- Realização de uma análise comparativa entre a dosagem baseada em parâmetros volumétricos (Superpave) e a dosagem por desempenho (BMD), buscando exemplificar como a diferença entre os métodos pode influenciar na evolução dos defeitos ao longo da vida útil do pavimento, através de métodos de dimensionamento, e como a abordagem BMD pode levar a uma seleção de materiais mais racional e a uma previsão de durabilidade mais precisa;
- Articulação dos resultados esperados sobre a influência dos diferentes métodos de seleção granulométrica (FAD-CI e Bailey), buscando exemplificar como cada método afeta o desempenho da mistura e, consequentemente, a faixa ótima de ligante, de forma a otimizar a resistência à fadiga ou à deformação permanente;
- Determinação do impacto econômico na adoção de BMD através de análise comparativa do custo de ciclo de vida (120 meses) para as soluções de dosagem consideradas ótimas. Este resultado identificará a opção com o menor custo total, considerando a construção inicial e a evolução prevista dos defeitos;
- Validação de uma metodologia integrada que une ensaios de laboratório avançados (BMD) com ferramentas de dimensionamento mecanístico-empírico, estabelecendo um procedimento mais confiável e econômico para o projeto de pavimentos no Brasil.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bastos, J. B. S. (2016) Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Bernucci, L. L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2022) *Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros* (2ª ed.). Rio de Janeiro.

Kennedy, T.W.; G. A. Huber; E. T. Harrigan; R. J. Cominsky; C. S. Hughes; H. Von Quintus e J. S. Moulthrop (1994) Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program. Washington.

Li, N.; P. Hao; Y. Yao e C. Zhang (2023) The implementation of balanced mix design in asphalt materials: A review. *Construction and Building Materials*, v. 402. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132919

Oliveira, J. A.; M. F. C. Cardoso; S. A. T. Silva; I. S. Bessa, M. M. Farias; L. F. A. L. Babadopulos; B. C. S. Gouveia e J. B. Soares (2024) Análise de custos de implantação e de manutenção de rodovias dimensionadas por métodos empírico e mecanístico-empírico. *Transportes*, v. 32, n. 2. DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2936

Pant S.; M. Akentuna; L. N. Mohammad; S. B. Cooper III e S. B. Cooper Jr. (2024) Field performance validation of the Louisiana balanced asphalt mix design framework' *Construction and Building Materials*, v. 428. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136251

Oliveira, J. A. O. (2019) Avaliação do impacto da metodologia FAD-CI de seleção granulométrica na vida de fadiga de misturas asfálticas. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Organização das Nações Unidas (2022) Sustainable Development Goals Platform. Disponível em: https://sdgs.un.org/goals (acesso em: 07/07/2025).

Rocha, M. L.; F. T. S. Aragão; L. A. H. Nascimento e B. S. Underwood. (2023). Balanced Mixture Design Framework for Asphalt Mixtures Based on Index- and Performance-Volumetrics Relationships. *Transportation Research Record*v, v. 2677, n. 10, p. 233–245. DOI: 10.1177/03611981231161063

Yu, J.; X. Hu; Q. Mao; X. Chen; G. Cheng e Y. Zheng (2025) Investigation of asphalt mixture balanced design method based on intermediate layer properties. *Coatings*, v. 15, n. 4. DOI: 10.3390/coatings15040384

Lucas Aragão Lira (lucas.lira@det.ufc.br)
Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Bloco 703, Campus do Pici, Fortaleza, CE, Brasil.

MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA COM PLÁSTICO RECICLADO

Samuel Segatto Ribeiro, Lilian Ribeiro de Rezende
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este estudo objetiva investigar a viabilidade do uso de plástico reciclado incorporado a misturas asfálticas, buscando reduzir o descarte inadequado de resíduos plásticos e melhorar as propriedades mecânicas das misturas. Nesta pesquisa, os materiais utilizados foram: polietileno de baixa densidade (LDPE), cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70), agregado de micaxisto, álcool n-propílico (NPA) e estireno-butadieno-estireno (SBS). Incialmente, foi realizado um estudo preliminar para a definir o teor de plástico a ser incorporado ao ligante. Em seguida, foram realizados ensaios laboratoriais para a caracterização do ligante modificado, do agregado, determinar a dosagem e avaliar o comportamento mecânico da mistura asfáltica. Assim, a pesquisa busca uma solução sustentável que alia benefícios ambientais e técnicos, promovendo a reciclagem de plástico e a melhoria da qualidade de pavimentos flexíveis, oferecendo assim uma alternativa viável para dois problemas contemporâneos: a gestão de resíduos e a durabilidade de infraestruturas viárias.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

Este trabalho visa avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas com plástico reciclado em Goiânia. Para tanto, como se trata de uma primeira experiência regional, é necessário identificar os tipos de plástico disponíveis, bem como a infraestrutura existente nas usinas de misturas asfálticas locais. A partir disso, é possível definir o tipo de plástico e a forma de incorporação na mistura. A partir da definição do material, surge o desafio de incorporar o plástico reciclado no ligante asfáltico, sem que haja prejuízo às propriedades do ligante, tais como ponto de amolecimento, retorno elástico, penetração, viscosidade e estabilidade. Levando isto em consideração, deve-se avaliar a necessidade de utilização de aditivos modificadores dessas propriedades, buscando sempre manter características próximas dos ligantes já utilizados, evitando assim que haja problemas de compatibilidade entre as usinas existentes e o material a ser produzido. Após esses passos, é necessário realizar uma profunda caracterização do material, analisando a reologia e parâmetros físicos. Esses dados são essenciais para a dosagem da mistura e realização de ensaios para avaliação do comportamento mecânico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

A sustentabilidade relacionada aos plásticos enfrenta desafios significativos devido ao seu persistente impacto ambiental. Globalmente, cerca de 630 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram geradas desde 2015, com grande parte destinada a aterros ou acabando de forma incorreta na natureza, causando poluição e riscos à saúde (Li et al., 2024). No Brasil, apenas 28% das embalagens plásticas foram recicladas em 2023, em parte devido à maior atratividade econômica dos plásticos virgens (Ozório, 2024). Uma possível solução é a incorporação de plásticos reciclados em misturas asfálticas, aproveitando suas propriedades de resistência e durabilidade para melhorar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica, com (Duarte e Silva, 2023). No entanto, essa prática levanta preocupações sobre microplásticos e efeitos ambientais de longo prazo, exigindo mais pesquisas para garantir sua segurança ecológica (Enfrin e Giustozzi, 2022). Além disso, a variabilidade na composição do plástico afeta as propriedades mecânicas do asfalto, necessitando de seleção criteriosa e métodos adequados de incorporação (Li et al., 2024). No Brasil, essa abordagem é promissora, mas ainda carece de estudos abrangentes (Duarte e Silva, 2023).

A produção de asfalto convencional emite 0,048 kg de CO_2 por quilo de ligante (Vila-Cortavitarte et al., 2017), contribuindo para o aquecimento global. A modificação do asfalto com plásticos reciclados pode reduzir essas emissões e aumentar a vida útil do pavimento (Vila-Cortavitarte et al., 2017). Estudos mostram que a adição de 1% de poliestireno (PS) reciclado melhora as propriedades mecânicas, enquanto quantidades maiores (2%) prejudicam a coesão da mistura (Vila-Cortavitarte et al., 2017). Os processos de incorporação podem ser por via seca (plástico substitui parte dos agregados) ou via úmida (plástico é misturado ao ligante a altas temperaturas). A via seca permite a incorporação de uma maior quantidade de plástico e tem apresentado melhores resultados de resistência à fadiga, enquanto a via úmida exige equipamentos especializados e pode resultar em misturas menos estáveis (Ashish et al., 2023). Estudos indicam que a adição de plásticos como polietileno (PE), polipropileno (PP) e etileno-vinil-acetato (EVA) melhora a rigidez, resistência à deformação e elasticidade do asfalto (Ranieri et al., 2017). O polietileno de alta densidade (HDPE) melhora a resistência à tração, mas exige maior processamento para garantir homogeneidade (Costa et al., 2019). Essa garantia da

homogeneidade da mistura, bem como a estabilidade térmica e a compatibilidade entre polímeros e o ligante asfáltico são críticas para evitar separação de fases (Behnood e Gharehveran, 2019).

Já em Gana. a incorporação de plástico por via seca reduz a absorção de água (de 0,45% para 0,20%) e aumenta a resistência à abrasão (Asare et al., 2019). Na Nigéria, misturas com 16,7% de PET nos agregados apresentaram desempenho semelhante ao asfalto convencional, indicando grande potencial de utilização de material que seria anteriormente descartado (Sojobi et al., 2016). Outro ponto importante tem relação com o custo da utilização do material reciclado para incorporação na mistura asfáltica. Não há estudos que precifiquem o custo da incorporação do plástico reciclado em misturas asfálticas no Brasil. Contudo, um estudo realizado no Sri Lanka, identificou que o uso de polímeros reciclados reduziu os custos em 2,6 vezes em comparação com o custo quando utilizados polímeros virgens, ou seja, ao menos quando comparado com a utilização de polímeros virgens, a utilização do plástico reciclado se torna economicamente viável no contexto do Sri Lanka (Dinushka et al., 2020). No Brasil, existem algumas pesquisas com PET reciclado. Tais pesquisas indicaram redução no módulo de resiliência, mas melhorias na resistência à tração (Arao, 2016). Em 2023, um trecho experimental na Rodovia Washington Luís, em São Paulo, utilizou 450 kg de plástico reciclado por km, com expectativa de maior durabilidade (Estadão, 2024). Por ser um estudo recente, ainda não existem dados disponíveis sobre o desempenho mecânico do material nesse trecho experimental.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, a metodologia deste trabalho focou no estudo da viabilidade da incorporação de plástico reciclado modificando um ligante asfáltico convencional na região de Goiânia Na sequência, serão realizados ensaios de caracterização do ligante modificado e do agregado, a dosagem de uma mistura asfáltica e, posteriormente, ensaios mecânicos. Numa primeira etapa, foi realizado o mapeamento dos tipos e volumes de plásticos disponíveis na Região Metropolitana de Goiânia para ser utilizado no estudo. Constatou-se que o LPDE (Polietileno de baixa densidade), o PET (politereftalato de etileno) e o PVC (policloreto de vinila) são os plásticos reciclados disponíveis em quantidades consideráveis. Dessa forma, seria necessário avaliar a forma que as indústrias locais, tanto de ligantes quanto de misturas asfálticas, conseguiriam realizar a incorporação do material reciclado (por via seca ou via úmida). Após investigação, constatou-se que as indústrias locais não apresentam infraestrutura capaz de modificar a mistura asfáltica pela via seca. A partir desta constatação, neste momento, a pesquisa seguiu somente com o estudo da incorporação do plástico pela via ,sendo que a via seca será estudada em outra fase do projeto.

Com o apoio de uma distribuidora de asfalto da região, o ligante asfáltico convencional do tipo CAP 50/70 foi modificado, considerando dois tipos de amostras: uma com 4% de LPDE e outra com 6%. Inicialmente, foram realizadas misturas contendo somente o LPDE reciclado e o CAP 50/70. Contudo, a penetração ficou muito alterada quando comparada com a penetração do CAP 50/70 sem o plástico. Dessa forma, nas duas porcentagens avaliadas foi necessário incorporar 1% de aditivo NPA (álcool n-propílico) e 1% de polímero SBS (estireno-butadieno-estireno) para atender aos requisitos preliminares quanto ao ponto de amolecimento, retorno elástico e ponto de penetração. Após a definição das duas modificações, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização dos ligantes: massa específica - NBR 6296, ponto de amolecimento – NBR 6560, penetração – NBR 6576, viscosidade Brookfield – NBR 15529, ponto de fulgor – NBR 11341 e estabilidade - ASTM 7173. O agregado selecionado para o estudo foi o micaxisto localizado na região de estudo e já pesquisado em estudos anteriores (Cruz, 2024). Por se tratar de uma nova coleta de material, sua caracterização foi realizada por meio dos ensaios de análise granulométrica – ME 412, agregado fino: massa específica, densidade relativa e absorção – ME 411, agregado graúdo: massa específica, densidade relativa e absorção – ME 413, massa específica solta – ME 437, massa específica compactada – ME 437 e adesividade – ME 078. Sua curva granulométrica foi definida com base nos métodos Bailey de seleção granulométrica e FAD (Fração de Agregado Dominante). Ao realizar os ensaios de adesividade do agregado com os ligantes compostos com 4% e 6% de plástico reciclado, os resultados não foram satisfatórios. Assim, foi necessário incorporar 2% de cal e 0, 1% de DOPE na mistura, a fim de obter melhores resultados de adesividade.

Outro desafio enfrentado está relacionado com a viscosidade. Devido à alta viscosidade do material, os spindles 21 e 27 não puderam ser utilizados para o ligante com 6%. Tentou-se, então, ensaiar como feito para asfalto borracha, com o spindle 03. Foram obtidos resultados muito acima dos esperados, indicando que o ligante com 6% de LDPE apresenta viscosidade muito alta (21 cPa na temperatura de 177 ºC). Dessa forma, esse ligante

apresentou-se incompatível com os parâmetros necessários para uma boa trabalhabilidade e, por esse motivo não foi utilizado nas próximas etapas da pesquisa. O ligante com 4% de LDPE apresentou viscosidade de 0,4 cPa para a temperatura de 175 ºC. Assim, foi feito um estudo de dosagem Superpave para uma mistura asfáltica composta de micaxisto e ligante asfáltico modificado com 4% de LDPE. Com a mistura dosada, serão realizados os seguintes ensaios mecânicos: resistência a tração diametral – ME 136, dano por umidade induzida – ME 180, módulo de resiliência – ME 135, *flow number* – ME 184, fadiga convencional – ME 183, *semi-circular bending* estático – TP 105 e *semi-circular bending* diânico (Teixeira *et al.*, 2023).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arao, M. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

Asare, P. N. A.; Kuranchie, F. A.; Ofosu, E. A. Evaluation of incorporating plastic wastes into asphalt materials for road construction in Ghana. Cogent Environmental Science, v 5, n. 1, 2019, DOI: https://doi.org/10.1080/23311843.2019.1576373.

Ashish, P. K.; Sreeram, A.; Chandrasekar, P.; Jagadeesh. A.; Adwani, D.; Padhan, R. Closing the loop: Harnessing waste plastics for sustainable asphalt mixtures – a comprehensive review. Construction and Building Materials, v 400, 2023, DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132858.

Behnood, A.; Gharehveran, M. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. European Polymer Journal, v 112, p. 766–791, 2019, DOI: https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2018.10.049.

Costa, L. M. B.; Silva, H. M. R.; Peralta, J.; Oliveira, J. Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – Performance and morphological assessment. Construction and Building Materials, v 198, p. 237–244, 2019, DOI: https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.279.

Cruz, M. B. Estudo sobre as características do concreto asfáltico modificado por borracha de pneu para as condições do estado de Goiás. 2024. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

Dinushka, D. K. S.; Waidysekara, K. G. A. S.; Dewagoda, K. G. Applicability of recycled plastic for road construction in Sri Lanka. In: CONFERENCE PROCEEDINGS. Proceedings... Moratuwa: Faculty of Architecture Research Unit (FARU), 2020, p. 245-252, DOI: https://doi.org/10.31705/FARU.2020.28.

Duarte, N. C.; Silva, O. H. Analysis of the use of solid waste in road asphalt coatings: a literature review. Concilium, v 23, n. 7, p. 243-261, 2023, DOI: https://doi.org/10.53660/CLM-1195-23E20B.

Enfrin, M.; Giustozzi, F. Recent advances in the construction of sustainable asphalt roads with recycled plastic. SCI, 2022, DOI: 10.1002/pi.6405.

Jornal Estadão. Trecho da rodovia SP-294 recebe pavimento com asfalto reciclado. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/trecho-da-rodovia-sp-294-recebe-pavimento-com-asfalto-reciclado/>. Acessado em: 14/10/2024.

Li, H.; Han, Y.; Guangxun, E.; Sun, Y.; Wang, L.; Liu, X.; Ren. Recycling of waste polyethylene in asphalt and its performance enhancement methods: Acritical literature review. Jornal of Cleaner Production, v. 451, 2024, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.067.

Ozório, L. EXAME. Disponível em: https://exame.com/esg/14-milhao-de-toneladas-de-plastico-foram-recicladas-em-2023-apesar-de-desafios-na-cadeia/. Acessado em: 02/11/2024.

Ranieri, M.; Costa, L.; Oliveira, J. R. M.; Silva, H. M. R. D.; Celauro, C. Asphalt Surface Mixtures with Improved Performance Using Waste Polymers via Dry and Wet Processes. Journal of Materials in Civil Engineering, v 29, n. 10, p. 1-9, 2017, DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002022.

Sojobi, A. O.; Nwobodo, S. E.; Aladegboye, O. J. Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. Cogent Engineering, 2016, DOI: https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1133480.

Teixeira, J.E.L.; Amaecing Jr., C.M.; Rezende, L. R.; Branco, V.T.F.C.; Kim, Y.K. Evaluation of asphalt concrete's fatigue behavior using cyclic semi-circular bending test. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 400, p. 132772, 2023, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132772.

Vila-Cortavitarte, M.; Lastra-Gonzáles, P.; Calzada-Pérez, M. Analysis of the Influence of Using Recycled Polystyrene as a Substitute for Bitumen in the Behaviour of Asphalt Concrete Mixtures. Journal of Cleaner Production, 2017, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.232.

Samuel Segatto Ribeiro (samuel_segatto@discente.ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, 5ª Avenida, Setor Universitário, Goiânia, Goiás, Brasil
Lilian Ribeiro de Rezende (lrezende@ufg.br)
Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, 5ª Avenida, Setor Universitário, Goiânia, Goiás, Brasil

Pavimentos Aeroportuários

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ESTUDO DA VULNERABILIDADE DE AERÓDROMOS NA AMAZÔNIA FACE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Daniele Rodrigues dos Santos[1], **Matheus Mendonça**[2], **Narciso Oliveira**[3], **Cláudia Azevedo Pereira**[1]
[1] ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, [2]VINCI Concessions, [3]VINCI Airports

RESUMO
Este artigo sugere uma análise da vulnerabilidade dos aeródromos na Amazônia em relação às mudanças climáticas, com foco na ação da água sobre os pavimentos, temperaturas elevadas e alagamentos. Adaptando a metodologia VULCLIM (vulnerabilidade de aeródromos frente a mudanças climáticas), desenvolvida pelo STAC (2025), são analisados os impactos desses alvos climáticos sobre a infraestrutura aeroportuária. Dentre os efeitos identificados, destacam-se deformações do pavimento, interrupções operacionais causadas por enchentes e a degradação da drenagem superficial. Por meio de uma análise combinada da exposição climática projetada até 2050, avalia-se o impacto funcional nos componentes do aeroporto e o grau de risco associado. Além disso, a pesquisa destaca a importância de soluções de engenharia baseadas na natureza, como vegetação e pavimentos permeáveis. Por fim, propõe-se a utilização de uma matriz de risco como ferramenta de apoio ao planejamento estratégico, contribuindo para aumentar a resiliência climática da aviação.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vem sendo estudas e inseridas nas pautas do setor de aviação em todo mundo, eventos que comprometem a operacionalidade de aeródromos como do Aeroporto Salgado Filho no Rio Grande do Sul, que foi integralmente fechado em maio de 2024, representa a vulnerabilidade das infraestruturas perante o ocorrido. Conforme apresentado por Suarez *et al.* (2024), segundo estimativas preliminares da concessionária, os danos diretos somaram R$ 630,6 milhões. Desse total, 63% (R$ 395,6 milhões) referem-se a prejuízos em infraestruturas e equipamentos do lado ar (*airside*).

Este artigo traz visibilidade a este tema na Região Norte do Brasil, local dependente do transporte fluvial e aéreo, onde não há rodovias para integração com o restante do país, e que durante a estação da seca no verão, é dependente 100% do transporte aéreo em algumas regiões, o que dificulta a resiliência desses aeroportos.

Segundo Marengo & Souza (2018), desde 2010 a Amazônia vem enfrentando uma mudança climática com secas severas intercaladas com enchentes catastróficas, rios em níveis historicamente baixos, aumento de temperatura e aquecimento, incêndios durante longos e intensos períodos, sendo o desmatamento agente para a incidência de enchentes e enxurradas. Pelo estudo de Portella *et al.* (2022), as queimadas vêm impactando o padrão das chuvas, tornando os eventos mais intensos e menos frequentes, o que modifica profundamente a dinâmica climática da região.

É necessário desenvolver resiliência frente aos desafios climáticos que se acentuam, principalmente nos aeroportos, para que a conectividade entre as regiões brasileira não seja comprometida. Conforme o *National Academies* (2024), resiliência é a capacidade operacional de um aeroporto em lidar proativamente com eventos climáticos severos, abrangendo preparação, resposta imediata e recuperação.

A *Federal Aviation Administration* (FAA) em 2008 passou a incluir pesquisas climáticas em seu portifólio, e em 2015 apresentou uma metodologia estruturada de avaliação de risco climático e desde então visa fortalecer a capacidade dos aeroportos de enfrentar os efeitos das mudanças climáticas, por meio de uma abordagem sistemática de análise de riscos e planejamento de adaptação, incluindo também aeroportos com restrições de recursos.

Neste contexto, serão analisados três aeroportos localizados na Amazônia, realizando uma avaliação climática, preventiva e dos riscos aos quais esses aeródromos estão suscetíveis. Com intuito de estimar os impactos diretos e indiretos, e como se pode reduzi-los. Uma vez conhecido o risco é necessário o aprofundamento com análise para contenção, plano preditivo e de contingência em caso de ocorrências.

De acordo com Imazon (2009), a Amazônia é uma das regiões mais estratégicas do planeta, abrangendo a maior bacia hidrográfica do mundo, com cerca de 25 mil quilômetros de rios navegáveis. No contexto brasileiro, a Amazônia Legal foi delimitada em 1966 e atualmente cobre uma área de 5 milhões de quilômetros quadrados, o equivalente a 59% do território nacional, englobando os estados do Amazonas, Acre, Pará, Amapá, Roraima, Rondônia, Mato Grosso, Maranhão, Goiás e Tocantins.

Diversas pesquisas destacam o papel fundamental da Amazônia na dinâmica climática do Brasil, principalmente como elemento-chave em processos de formação de chuvas em outras regiões do país. Como descrevem Portella *et al.* (2022), a Amazônia exerce influência significativa sobre o clima das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

Flores *et al.* (2024) sinalizam a crescente possibilidade de a floresta amazônica atingir um ponto de inflexão crítico, a resiliência do sistema está diminuindo, e áreas degradadas somam mais de 38% da floresta, o que tende a resultar um colapso ecológico em grande escala até 2050. Considerando a importância da Amazônia neste ambiente de regulação climática, é de relevância uma análise crítica sobre o assunto.

2. METODOLOGIA

Neste estudo será adaptada para o contexto brasileiro, em específico na Amazônia, a metodologia VULCLIM do Serviço Técnico de Aviação Civil (STAC) da França, pela sua facilidade de análise e predição. O método adotado baseia-se no mapeamento de riscos, o qual tem como vantagem reproduzir as etapas típicas de uma análise de vulnerabilidade, apresentando os resultados de forma visualmente clara e acessível.
Essa abordagem se estrutura em duas frentes principais:

- primeiramente, identificar o grau de exposição do aeródromo a cada ameaça climática, utilizando indicadores previamente definidos;
- em segundo lugar, avaliar o impacto específico de cada ameaça sobre os diversos componentes da infraestrutura aeroportuária.

A combinação dessas duas análises possibilita a construção de uma matriz de dupla entrada, na qual se cruzam os níveis de exposição e de impacto. Como resultado, obtêm-se dados que expressam tanto o risco efetivo quanto a vulnerabilidade estimada do aeródromo, conforme indicado na Figura 1 e nas Tabelas 1 e 2.

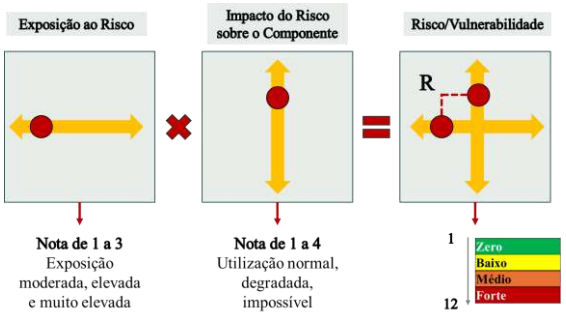


Figura 1: Esquema resumido para determinar a vulnerabilidade de um aeroporto às mudanças climáticas em relação a um determinado aspecto. Adaptado STAC, 2025.

Tabela 1: Exposição aos Riscos Climáticos. Adaptado STAC, 2025.

Exposição aos Riscos Climáticos		
1	***Moderada***	O aeroporto estará exposto a este risco com uma frequência e/ou intensidade substancialmente equivalente ao atual ou um pouco mais alto.
2	***Elevada***	O aeroporto estará exposto a este risco com uma frequência e/ou intensidade maior do que atualmente.
3	***Muito Alta***	O aeroporto estará exposto a este risco com uma frequência e/ou intensidade signficativamente maior do que atualmente.

Tabela 2: Impacto dos Riscos sobre o Componente. Adaptado STAC, 2025.

Impacto dos Riscos sobre o Componente			
Nível do Impacto		**Funcionalidade do Sistema**	
1	***Sem gravidade***	Normal ou não degradado	Sem interrupção do sistema
2	***Secundário***	Degradação Aceitável	O sistema é afetado em sua operação
3	***Severo***	Degradação Restritiva	O sistema está com mau funcionamento e sua sustentabilidade está afetada (ou comprometida)
4	***Desastroso***	Degradação Inaceitável	Falha do sistema ou mau funcionamento do sistema a longo prazo

Para embasar a análise e aplicação da metodologia foram utilizados os mapas apresentados na Figura 2(a) e Figura 2(b). Flores *et al.* (2024), relatam que com base em dados de satélite, foi possível identificar, a partir do início dos anos 2000, uma redução acentuada na resiliência da Amazônia, associada tanto ao aquecimento global quanto a intervenções humanas. Desde a década de 1980, a região tem registrado um aumento médio

de temperatura de 0,27°C por década durante a estação seca, com elevações mais intensas, chegando a 0,6°C, nas áreas central e sudeste do bioma. Atualmente, a temperatura média da Amazônia é aproximadamente 2°C mais alta do que há quarenta anos. De acordo com o estudo, até 2050, entre 10% e 47% das florestas amazônicas poderão estar sujeitas a distúrbios capazes de provocar alterações ecossistêmicas imprevistas, com potencial para intensificar as mudanças climáticas na região.

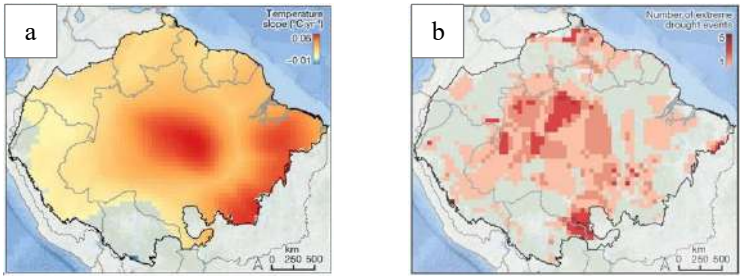


Figura 2: (a) Alterações na temperatura média durante a estação seca de julho a outubro. (b) Ocorrências sucessivas de secas extremas a partir de 2001. Adaptado Flores *et al.* (2024)

Também como suporte a avaliação, foi considerado o estudo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH (2024), para um Tempo de Retorno (TR) de 50 anos quanto aos critérios hidrológicos como destaca a Figura 3(a), cujo mapa apresenta a precipitação máxima e a Figura 3(b) que expressa a frequência de vazões máximas dos rios nos estados brasileiros. A partir desses mapas, é possível mensurar o impacto da mudança climática nos aeroportos da Amazônia com relação a temperatura, seca, chuvas extremas, alagamentos e submersão, considerando os próximos 50 anos.

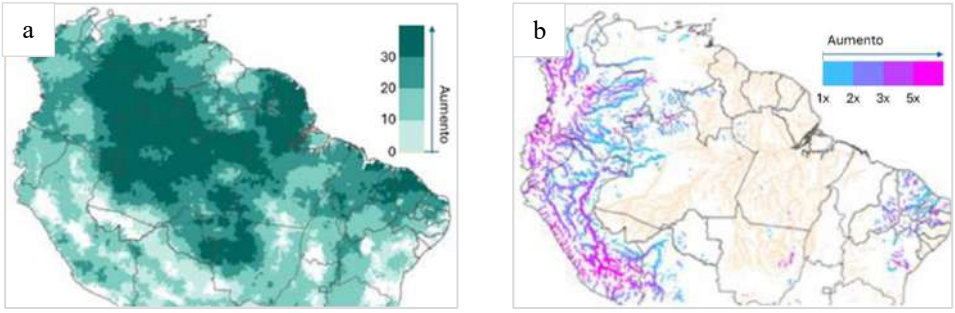


Figura 3: (a) Chuvas extremas (b) Cheias extremas dos rios TR = 50 anos. Adaptado IPH (2024)

3. ANÁLISE DE RESULTADOS E SOLUÇÕES E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO

De acordo com a metodologia aplicada, obtém-se a matriz de risco conforme ilustra a Tabela 3. A partir desta análise, podemos considerar que o Aeródromo A, apresenta vulnerabilidade à submersão e a chuvas extremas, com valores máximos em todas as infraestruturas; secas ondas de calor e mudança dos ventos dominantes aparecem com valores moderados, representando vulnerabilidade média e como não relevante os ventos extremos. Isso confirma que a sua exposição a mudanças climáticas pode impactar significativamente a operação e que medidas de contingência devem ser pensadas e avaliadas previamente.

O Aeródromo B, indica vulnerabilidade média, com exposição elevada e impacto significativo para pista de pouso e decolagem, com baixos valores em quase todos os componentes, indicando fraca vulnerabilidade. Sendo o aeródromo B o mais resiliente dos três analisados, conforme os critérios da matriz.

O Aeródromo C exibe valores homogêneos de 4 a 6 em quase todos os itens, o que sugere uma vulnerabilidade média, podendo evoluir para forte se não forem tomadas medidas preventivas.

A metodologia aplicada orienta que aeródromos com vulnerabilidade ≥ 6 reavaliem regularmente os riscos e implementem medidas de adaptação para mitigar os impactos, se tornando assim mais resilientes.

A exposição a ventos extremos e mudanças da direção dos ventos não são objeto de consideração central, por falta de evidência de mudança significativa futura, mas devem ser considerados.

Com base nas projeções, entende-se que o Aeródromo A precisa de atenção para a possibilidade de submersão e inundações; seguido de estratégias de adaptação para o aeródromo C e monitoramento e manutenção

preventiva para o aeródromo B.

Tabela 3: Exposição aos Riscos Climáticos. Adaptado STAC, 2025.

Aeródromo	Infraestrutura	Mudança da direção dos ventos dominantes	Submersão	Onda de Calor	Seca	Chuvas Extremas/Alagamento	Ventos Extremos
A	Vias de Acesso Operacional		9	3	3	9	2
	Pátio de Aeronaves		9	3	3	9	2
	Pista de Táxi		9	3	3	9	2
	Pista de Pouso e Decolagem	3	9	3	3	9	2
B	Vias de Acesso Operacional		1	4	1	6	2
	Pátio de Aeronaves		1	4	1	6	2
	Pista de Táxi		1	4	1	6	2
	Pista de Pouso e Decolagem	6	1	4	1	6	2
C	Vias de Acesso Operacional		6	4	4	6	2
	Pátio de Aeronaves		4	4	4	6	2
	Pista de Táxi		4	4	4	6	2
	Pista de Pouso e Decolagem	4	4	4	4	6	2

Os impactos diretos a serem aferidos primeiramente são os riscos de acidentes em pistas alagadas ou danificadas, a dependência de infraestrutura e busca por rotas alternativas.
Economicamente, os aspectos que devem ser considerados são:
- O aumento dos custos de manutenção corretiva, emergencial ou em último caso de reconstrução.
- A desvalorização da confiabilidade operacional do aeroporto, com atrasos e cancelamentos de voos, com prejuízos também as companhias aéreas e passageiros.

Com foco nos resultados apresentados, em termos de impacto certamente o de maior relevância é com relação a infraestrutura da pista de pouso e decolagem.
As soluções adotadas no Brasil com relação a pavimentos permeáveis são a Camada Porosa de Atrito (CPA) e o pavimento estriado (*grooving*). Em pavimentos com *grooving*, são criadas ranhuras transversais ao eixo da pista para direcionar o escoamento da água da chuva, facilitando seu afastamento da superfície. A Camada Porosa de Atrito (CPA) cumpre essa mesma função de drenagem, porém por um método diferente: em vez de ranhuras, sua estrutura altamente porosa permite que a água penetre na camada do pavimento e escoe por baixo da superfície, promovendo drenagem subsuperficial. É importante também ressaltar o estudo de ligantes asfálticos, principalmente com relação a locais expostos a altas temperaturas, como é o caso da Amazônia, onde também há a presença de solos expansivos. Estudos com base em metodologias voltadas às mudanças climáticas como o TEACR (*Transportation Engineering Approaches to Climate Resiliency*) em *Federal Highway Administration*, Hyman *et al.* (2017), trata de pavimentos em solos expansivos e propõe ajustes no projeto de misturas asfálticas considerando projeções futuras de temperatura. Para tanto, é imprescindível considerar também o grau do ligante asfáltico a ser utilizado para mitigar o amolecimento e reduzir danos por fadiga e formação de trincas. Considerando as temperaturas extremas, que podem inclusive impactar na necessidade de aumento no comprimento de pista da PPD e que estão suscetíveis a deformações permanentes dos pavimentos, conforme ressaltado pelo STAC (2025).
Para minimizar a infiltração de umidade no subleito e evitar a erosão da camada de base, Hyman *et al.* (2017) sugere o uso de geotêxteis nos acostamentos, com o objetivo de aprimorar a eficiência da drenagem subterrânea.
A implantação de uma drenagem eficiente também é um ponto de atenção quando se trata de chuvas de grande intensidade, assim como a utilização de vegetação rasteira em torno da infraestrutura para captação e vazão, de modo a diminuir também os processos erosivos dos solos. Assim, estudos mais aprofundados são necessários com relação a este tema.

6. CONCLUSÃO

Este estudo focou na aplicação adaptada da metodologia VULCLIM a três aeroportos localizados na Amazônia, considerando o agravamento das mudanças climáticas e a crescente exposição dos aeródromos brasileiros. Os resultados destacam a necessidade de medidas proativas e estratégias adaptativas para garantir a continuidade e a segurança das operações aeroportuárias nessa região vulnerável. A pista de pouso e descolagem foi identificada como o componente mais afetado pelas condições climáticas adversas, o que destaca a necessidade de implementação de soluções integradas, como o uso da Camada Porosa de Atrito (CPA), melhoria dos sistemas de drenagem e planejamento estratégico ao redor das infraestruturas. Ajustar o tipo de ligante asfáltico, utilizar geotêxteis e elaborar planos operacionais de contingência são medidas complementares que aumentam a capacidade de resposta a eventos extremos.

Diante disso, recomenda-se a adoção sistemática de matrizes de risco climático em todos os aeroportos brasileiros, independentemente de sua classificação operacional, uma vez que a metodologia pode ser utilizada em diversos cenários. Essa ação constitui um progresso significativo para o aumento da resiliência e da segurança do setor aeroportuário nacional diante dos desafios trazidos pelas alterações climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Flores, B. M.; E. Montoya; B. Sakschewski; N. Nascimento; A. Staal; R. A. Betts; C. Levis; D. M. Lapola; A. Esquível-Muelbert; C. Jakovac; C. A. Nobre; R. S. Oliveira; L. S. Borma; D. Nian; N. Boers; S. B. Hecht; H. ter Steege; J. Arieira; I. L. Lucas; E. Berenguer; J. A. Marengo; L.V. Gatti; C. R. C. Mattos e M. Hirota (2024) *Critical transitions in the Amazon forest system*. Nature, 626 (7999), 555–564.https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0

Hyman, R.; R. Kafalenos; B. Beucler e K. Mohamed (2017*) Temperature and Precipitation Impacts to Pavements on Expansive Soils.* FHWA-HEP-17-018; Departamento de Transportes dos EUA, Administração Federal de Rodovias: Washington, DC, EUA. Disponível em: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/59243/dot_59243_DS1.pdf (acesso em 05/07/2025).

Imazon (2009) *A Amazônia em números: raio x da ocupação da Amazônia.* Disponível em: https://imazon.org.br/imprensa/a-amazonia-em-numeros/ (acesso em 30/06/2025).

Instituo de Pesquisas Hidráulicas, IPH (2024) *Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil.* Nota Técnica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em: https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-criterios-hidrologicos-para-adaptacao-a-mudanca-climatica-chuvas-e-cheias-extremas-na-regiao-sul-do-brasil/ (acesso em 05/07/2025).

Marengo, J.A. e C. S. Junior (2018). *Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia*. São Paulo. Cemaden Educação. Disponível em: https://educacao.cemaden.gov.br/midiateca/mudancas-climaticas-impactos-e-cenarios-para-a-amazonia/ (acesso em 30/06/2025).

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2024) *Assessing Climate Change Vulnerability at Airports: A Primer.* Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/27982.

Portella, D. A. P. C.; L. S. Blanco; M. E. T. M. Filho e J. L. A. Santos (2022) *A importância da Amazônia na dinâmica climática do Centro-Sul brasileiro: influência nas dinâmicas ambientais e socioeconômicas.* Ensaios de Geografia. Niterói, vol. 9, nº 19, pp. 66-86. Disponível em: https://portal.amelica.org/ameli/journal/754/7543791006/html/ (acesso em 30/06/2025).

STAC (2025) *Vulnérabilité des aérodromes face au changement climatique VULCLIM.* Service technique de l'aviation civile. Note d'information technique. França. Disponível em: https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/publications/vulnerabilite-des-aerodromes-face-au-changement-climatique (acesso em 13/06/2025).

Suarez, G.; O. Bello e J. Campbell (2024) *Avaliação dos efeitos e impactos das inundações no Rio Grande do Sul*. https://doi.org/10.18235/0013254

Daniele Rodrigues dos Santos (danielerods@hotmail.com)
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Infraestrutura Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Matheus Carvalho Mendonça (matheus.mendonca@vinci-concessions.com)
VINCI Concessions, Ingénieur Chaussées, Direction de l'Ingénierie, 1973, Boulevard de la Défense, Nanterre, France.

Narciso Galvão Oliveira (narciso.oliveira@vinci-airports.com.br)
VINCI Airports, Engenheiro Civil, Diretoria Técnica, Praça Santos Dumont, 100, Boa Vista, Roraima, Brasil.

Cláudia Azevedo Pereira (claudia.azevedo@ita.br)
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Infraestrutura Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Pavimentos de Concreto

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

AVALIAÇÃO DA POROSIDADE E DA PERMEABILIDADE DE CONCRETOS POROSOS: COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODO TEÓRICO E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Karina de Lima[1], **Larissa Virgínia Silva Ribas**[1, 2], **Verônica Teixeira Franco Castelo Branco**[1]
[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Universidade Federal da Bahia

RESUMO
A adequada caracterização da estrutura porosa é crucial para o desempenho do Pavimento de Concreto Poroso (PCP) no gerenciamento de águas pluviais. Este estudo investigou a eficácia da porosidade teórica, obtida por absorção de água, utilizando a porosidade por tomografia como referência. Amostras apresentaram porosidades totais entre 21,5% e 24,5%, com uma alta proporção de poros interconectados (93,3% a 97,5% da porosidade total). A porosidade teórica mostrou-se próxima à porosidade por tomografia, com variação de 0,57% a 2,77%. A distribuição dos diâmetros dos poros revelou que maiores volumes e tamanhos de poros (pico em torno de 1 mm e volumes até 7,5 mm³) estão associados à maior permeabilidade (≈16,55 mm/s), reforçando a relevância da morfologia porosa. Conclui-se que, dada sua proximidade com a estrutura real avaliada e seu baixo custo operacional, a porosidade teórica é uma técnica eficaz e viável para a obtenção da porosidade efetiva dos PCP.

1. INTRODUÇÃO

A permeabilidade do Pavimento de Concreto Poroso (PCP) é essencial para o gerenciamento de águas pluviais, recarga de aquíferos e redução dos efeitos das ilhas de calor urbanas (Rahman *et al*.,2025). O PCP é uma classe especial de concreto com uma estrutura porosa, que permite a passagem de água da superfície para as camadas subjacentes, oferecendo benefícios como maior resistência à derrapagem, redução do ruído em até 4 dB e redução do escoamento superficial em até 43% quando comparado à pavimentação asfáltica (Ong *et al*., 2020). No entanto, a funcionalidade dos PCP é frequentemente comprometida pelo fenômeno da colmatação, que ocorre devido ao acúmulo de detritos nos poros internos reduzindo a permeabilidade (Ekolu *et al*., 2022a).

A relação entre a estrutura porosa e a permeabilidade do PCP é não-linear. A porosidade por si só não é suficiente para determinar a permeabilidade (Ong *et al*., 2020). Parâmetros como o volume de vazios interconectados, o tamanho e a distribuição dos poros, a tortuosidade e o número de coordenação (conectividade dos poros) são importantes para a avaliação da capacidade de fluxo de fluidos (Yavuz *et al*., 2023). A permeabilidade aumenta com o aumento da porosidade efetiva (trata-se dos poros interconectados que permitem o fluxo de fluidos através do material), do volume médio de poros efetivos, da área da garganta (refere-se às zonas de conexão entre dois poros**)** e do número de coordenação (Ong *et al*., 2020).

A porosidade teórica em materiais porosos representa uma estimativa do volume de vazios com base nas propriedades dos componentes do compósito e na densidade. Este parâmetro pode ser determinado por ensaios de imersão total da amostra em água (Shan *et al*., 2022). Apesar de sua praticidade, questiona-se se essa metodologia de imersão de fato representa o volume total de vazios do material, ou se subestima a porosidade real, uma vez que a porosidade obtida por métodos de imersão pode apresentar variabilidade em testes repetidos (Mata, 2008). A relevância da porosidade teórica reside em sua capacidade de oferecer uma medida comparativa à porosidade real da estrutura, enquanto a tomografia computadorizada permite a visualização detalhada da rede de poros (Manahiloh *et al*., 2012).

A tomografia computadorizada é uma ferramenta não destrutiva usada para caracterizar a estrutura porosa do PCP (Ong *et al*., 2020). Com a tomografia é possível obter imagens tridimensionais da rede de poros interna do PCP, possibilitando a análise de parâmetros microestruturais, como volume de poros, área de superfície, tamanho, forma e conectividade que permite o desenvolvimento e validação de modelos numéricos de fluxo de fluidos (Ong *et al*., 2020). A utilização de tomografia computadorizada, combinada com técnicas de processamento digital de imagens permite analisar sua morfologia da rede de poros (Yavuz *et al*., 2023).

Este artigo tem como objetivo verificar a correspondência da porosidade teórica de PCP, determinada por ensaio de imersão total em água, com a estrutura porosa avaliada por tomografia. Para tanto, será realizada a comparação com os resultados de porosidade obtidos por tomografia computadorizada, que permite a identificação da porosidade total, da porosidade efetiva (poros interconectados) e dos poros isolados. Adicionalmente, o estudo busca confirmar a coerência entre essas medições e a permeabilidade do material, visando fortalecer a compreensão da caracterização hidráulica do PCP.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Moldagem das amostras de PCP e Preparação para Aquisição de Imagens

Os PCP foram fabricados com uma máquina TPrex VibroPress empregando uma mistura de concreto de traço: 1:0,74:2,48:0,33 (cimento: areia: brita: água/cimento), utilizou-se areia de rio e brita número 0 (D_{max} de 9,50mm). As placas com dimensões de 40 × 40 × 8cm, foram categorizadas para tráfego leve, conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 16416:2015. O cimento Portland CPV ARI foi selecionado como aglomerante por sua elevada resistência à compressão em estágios iniciais, o que otimizou o processo de desmoldagem. O teste de permeabilidade para os blocos de PCP foi executado com base na norma ABNT NBR 16416:2015.

Amostras de PCP cilíndricas 10cm de diâmetro por 8cm de altura foram extraídas das placas de PCP, utilizando máquina de perfuração a ar. A escolha da geometria cilíndrica é justificada pela otimização para a digitalização por tomografia computadorizada, uma vez que a varredura rotacional é otimizada para essa forma *(Zhang et al., 2023)*. A análise por tomografia computadorizada foi realizada com o tomógrafo modelo XT H 225 ST Nikon Metrology, operando com 220kV e 225µA**,** com resolução de 50µm e velocidade angular de 0,17°/s.

2.2. Obtenção da Porosidade do PCP Através da Tomografia Computadorizada

Para o processamento das imagens de tomografia computadorizada dos corpos de prova de PCP, as radiografias 2D, que somam uma média de 1.800 imagens por amostra, foram submetidas a etapas de pré-processamento para mitigar ruídos. Técnicas como a filtragem de média não local foram aplicadas para aprimorar a qualidade das imagens antes da reconstrução tridimensional (Shan *et al*., 2022).

Após o pré-processamento, as fatias 2D são reconstruídas em um modelo 3D da amostra utilizando o *software* ImageJ, o que permite uma análise volumétrica detalhada da estrutura interna. A porosidade é então calculada a partir dessas imagens 3D segmentadas, determinando a proporção do volume de *voxels* atribuídos aos poros em relação ao volume total da amostra (Zhang *et al*., 2023).

O processo de análise microestrutural inicia-se com a reconstrução tridimensional (Figura 1A) de uma amostra cilíndrica de PCP (Manahiloh *et al*., 2012). Esta representação 3D oferece uma perspectiva holística da rede porosa interna do material. Subsequentemente, a análise bidimensional (Figura 1B) é realizada a partir de uma fatia transversal da amostra, obtida por tomografia computadorizada. Esta fatia é necessária para a quantificação da área de poros na seção analisada, onde as regiões de baixa atenuação (escuras) correspondem aos vazios, e as regiões de alta atenuação (claras) representam a matriz sólida composta por agregados e pasta de cimento. A escala de 10mm na imagem fornece uma referência dimensional calibrada para a caracterização morfológica dos poros. Para compreender o comportamento hidráulico do PCP, a simulação de linhas de fluxo (Figura 1C) é empregada para visualizar o transporte de fluidos através da rede de poros interconectados. Nesta representação, as variações cromáticas indicam a magnitude da velocidade do fluido.

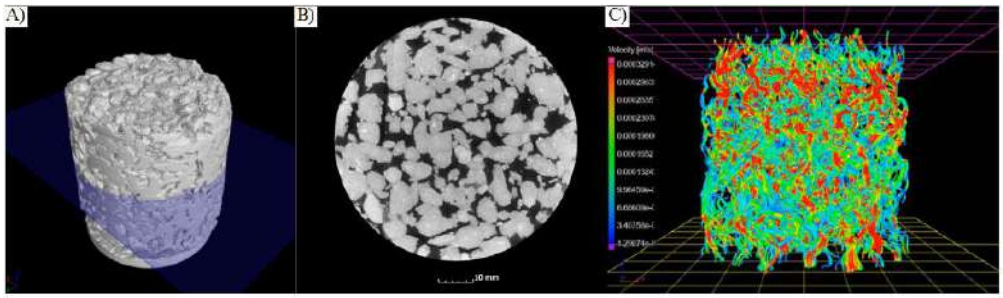


Figura 1: Análise da Estrutura Porosa do PCP por Tomografia Computadorizada e Simulação de Fluxo: a) reconstrução tridimensional de uma amostra cilíndrica de PCP; b) fatia transversal bidimensional da amostra de PCP; c) simulação de linhas de fluxo de fluido através da rede de poros interconectados da amostra de PCP

2.3. Obtenção da Porosidade Através de Ensaios de Imersão Total do PCP

A porosidade teórica dos PCP foi obtida utilizando a diferença de pesos entre a amostra submersa e seca em estufa, com base nas normas de concreto de alvenaria e de misturas asfálticas (ABNT NBR 16886, 2022;DNIT 428, 2022). Este método de imersão total, ao medir a porosidade de vazios preenchidos por água sob pressão atmosférica, fornece uma estimativa da capacidade de armazenamento do PCP e, por consequência, de seu

desempenho hidrológico (Mata, 2008). Para o cálculo da porosidade, foi utilizada a equação 1.

$$V_r = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w Vol}\right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: V_r: índice de vazios total (porosidade), em porcentagem; W_1: peso da amostra submersa em água (kg); W_2: peso da amostra seca em estufa (kg); ρ_w = massa específica da água (kg/m³); Vol: volume nominal da amostra, baseado nas dimensões da amostra (m³).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados de tomografia computadorizada para os corpos de prova de PCP (Figura 2) revela a predominância de poros interconectados, designados como porosidade efetiva. Em média, a porosidade efetiva atinge 21,97%, enquanto a média da porosidade total é de 22,60%, o que significa que 97,20% da estrutura porosa é interconectada. Em contraste, os poros isolados, que não contribuem para o fluxo de água, representam uma fração mínima do volume total com uma média de apenas 0,63% (Huang *et al*., 2021). Esta baixa ocorrência de poros isolados sustenta a funcionalidade do PCP como material drenante e reforça a aplicabilidade de métodos que conseguem capturar prioritariamente os poros interconectados para a avaliação da permeabilidade(Ong *et al*., 2020).

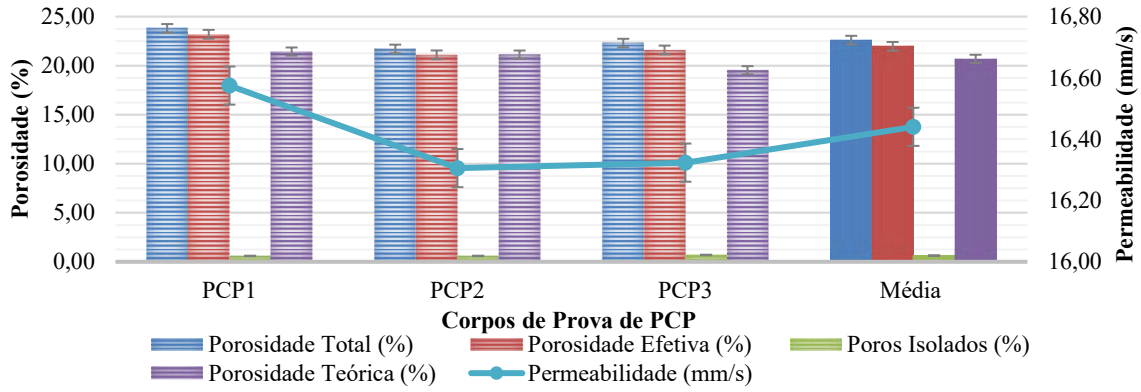


Figura 2: Porosidade e Permeabilidade de Corpos de Prova de PCP

A porosidade teórica, determinada por ensaios de imersão em água, demonstra proximidade com a porosidade efetiva encontrada por tomografia, conforme Figura 2. A análise de amostras distintas (PCP1, PCP2 e PCP3) do mesmo material de Concreto Poroso permite considerar a variabilidade inerente às propriedades desses materiais. No PCP1, a porosidade teórica é menor em 1,76 % que a porosidade efetiva. Para o PCP2, a porosidade teórica é igual à porosidade efetiva. Essa equivalência pode ser atribuída à sua baixa porcentagem de poros isolados (0,60%) e, em particular, à predominância de poros menores observada no PCP2 (Figura 3). A menor dimensão dos poros provoca completa saturação apenas dos poros interconectados durante o ensaio de imersão (Mata, 2008). Já no PCP3, a porosidade teórica é menor em 2,07 % que a porosidade efetiva. O método de absorção de água utilizado para encontrar a porosidade teórica, embora prático, mede a porosidade aberta e interconectada, ou seja, apenas os poros que são acessíveis à água e, portanto, podem não quantificar integralmente todos os vazios capturados pela tomografia (Machado *et al*., 2015). A partir da Figura 2 é possível perceber que o aumento das porosidades teórica e efetiva também acompanham o aumento no coeficiente de permeabilidade, corroborando com a literatura (Huang *et al*., 2021).

A Figura 3 ilustra a distribuição dos diâmetros dos poros (mm) em função do volume por compartimento (bin, em mm³), que representa intervalo de 0.02mm entre as imagens da tomografia, para três corpos de prova de PCP, revelando características distintas da estrutura porosa. O PCP1 exibe distribuição de volume de poros mais ampla e com os maiores volumes absolutos. Observa-se um pico de volume total de poros, aproximadamente 1.000 mm³, para diâmetros de poro em torno de 1,5 a 1,7mm. Esta predominância de poros de maior diâmetro e em maior quantidade total é associada a uma alta permeabilidade (16,55mm/s para o PCP1) sendo maior do que estabelecido como mínimo de 1mm/s pela ABNT NBR 16416:2015. Este achado corrobora com a literatura, que afirma que a presença de poros maiores e interconectados reflete no bom desempenho de drenagem do PCP (Ong *et al*., 2020).

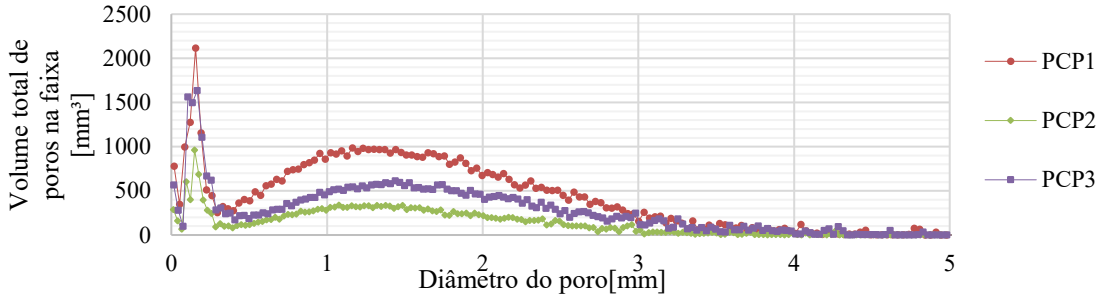


Figura 3: Distribuição do diâmetro dos poros (mm) do PCP em função do volume por compartimento (bin, em mm³)

Em contraste, o PCP2 apresenta os menores volumes totais de poros na faixa para a maioria dos diâmetros. Seu pico de volume total de poros é menor, aproximadamente 350mm³, e ocorre para diâmetros de poro menores, situando-se abaixo de 0,5mm. A curva restringe-se a uma faixa mais estreita de diâmetros e volumes, não ultrapassando aproximadamente 3,5mm de diâmetro. Isso sugere uma predominância de poros menores e em menor volume total, em comparação com as outras amostras. A permeabilidade do PCP2 é de aproximadamente 16,3mm/s, e sua porosidade efetiva corresponde a 97,2% da porosidade total. Apesar de seus poros serem menores e em menor volume total do que os do PCP1, sua permeabilidade ainda é significativa, o que pode ser atribuído à sua conectividade e à distribuição desses poros de menor diâmetro, corroborando com a literatura que sugere que outros fatores, como a estrutura conectada de poros, também afetam a permeabilidade, além do tamanho dos mesmos (Yavuz *et al*., 2023).

Por fim, o PCP3 apresenta uma distribuição de volume de poros na faixa e diâmetro de poro intermediária entre o PCP1 e o PCP2. Seu pico de volume total de poros é maior que o do PCP2 (aproximadamente 600mm³) e ocorre para diâmetros de poro em torno de 1,5mm. A curva se estende até aproximadamente 4,5mm de diâmetro. A permeabilidade do PCP3 é de aproximadamente 16,32mm/s, e sua porosidade efetiva corresponde a 96,8% da porosidade total. Apesar de o PCP3 apresentar uma porosidade total ligeiramente menor (aproximadamente 21,5%) em comparação com o PCP2 (aproximadamente 22%), os valores de permeabilidade e porosidade são similares. Isso reforça a indicação da literatura de que a porosidade por si só não é suficiente para determinar a permeabilidade, e que a distribuição do tamanho dos poros possui um impacto crucial (Yavuz *et al*., 2023).

4. CONCLUSÃO

A porosidade teórica derivada da absorção de água mostrou-se próxima à porosidade efetiva obtida via tomografia, com diferença máxima de 2,07%. Essa subestimação é atribuída à limitação dos métodos tradicionais, que não atingem todos os vazios presentes na matriz, especialmente os poros não acessíveis à água. Além disso, a tomografia revelou que os poros isolados representam uma fração mínima (0,20% a 0,60%), indicando que a maior parte da rede porosa é efetivamente interconectada, condição essencial para a drenagem eficiente do sistema.

O PCP1 apresentou os maiores valores de porosidade e os poros com maiores diâmetros e volumes por bin, o que resultou na maior permeabilidade (≈16,55mm/s). Por outro lado, o PCP2 e o PCP3, mesmo com porosidades efetivas menores, mantiveram níveis elevados de permeabilidade (≈16,3mm/s), um fato que pode ser atribuído à sua conectividade interna. Assim, conclui-se que a porosidade teórica pode ser utilizada para representar a porosidade efetiva dos PCPs e é eficaz para determinar a porosidade total do PCP, dada a baixa porcentagem de poros isolados. Os resultados demonstram que a porosidade efetiva, que corresponde aos poros interconectados importantes para o fluxo de água, é próxima da porosidade total, com os poros isolados representando uma fração mínima.

Os resultados apresentados neste estudo fornecem uma base para a compreensão da estrutura porosa do PCP e sua relação com a permeabilidade, evidenciando o potencial da tomografia computadorizada para análises detalhadas. Para aprofundar o conhecimento e otimizar a aplicação desses materiais, sugere-se a realização de estudos futuros que explorem a influência da colmatação na microestrutura do PCP utilizando tomografia computadorizada e que avaliem quantitativamente a redução da porosidade efetiva e as alterações na distribuição dos poros com o tempo de serviço. Adicionalmente, pesquisas poderiam focar na otimização de

PCP com base nos parâmetros microestruturais identificados neste trabalho, visando o desenvolvimento de PCPs com características hidráulicas superiores e durabilidade aprimorada. A incorporação de modelos numéricos de fluxo de fluidos em geometrias obtidas por tomografia também representa uma promissora linha de pesquisa para simular o desempenho hidráulico sob diferentes condições de contorno. Ademais, é pertinente investigar o comportamento térmico de pavimentos de concreto poroso, visando mitigar o fenômeno das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs), uma vez que o PCP demonstra potencial para reduzir o efeito de ICUs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto — Requisitos e procedimentos. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16886: Concreto — Amostragem de concreto fresco. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 4 p.

DNIT (2020) Norma DNIT 428/2020 – ME: Pavimentação - Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Ekolu, S. O., Solomon, F., de Beer, F., Bitandi, L., Kilula, R. N., Maseko, K. T., & Mahlangu, F. G. (2022). Measurement of pore volume, connectivity and clogging of pervious concrete reactive barrier used to treat acid mine drainage. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(37), 55743–55756. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18850-7

Huang, J., Zhang, Y., Sun, Y., Ren, J., Zhao, Z., & Zhang, J. (2021). Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *290*, 123228. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123228

Machado, A. C., Silva, M. A., Filho, R. D. T., Pfeil, M. S., Lima, I., & Lopes, R. T. (2015). 3D investigation of steel fiber distribution in reinforced concrete by X-ray microtomography. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, *8*(5), 707–720.

Manahiloh, K. N., Muhunthan, B., Kayhanian, M., & Gebremariam, S. Y. (2012). X-Ray Computed Tomography and Nondestructive Evaluation of Clogging in Porous Concrete Field Samples. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *24*(8), 1103–1109. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000484

Mata, L. A. (2008). *Sedimentation of pervious concrete pavement systems*.

Ong, G. P., Jagadeesh, A., & Su, Y.-M. (2020). Effect of pore network characteristics on non-Darcy permeability of pervious concrete mixture. *Construction and Building Materials*, *259*, 119859. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119859

Rahman, T., Tajudin, A. N., Wulaningtyas, A. H., Andika, N., Irawan, M. Z., & Widyatmoko, I. (2025). Recent developments in mitigating clogging in permeable pavements: a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*, *10*(3), 80. https://doi.org/10.1007/s41062-025-01882-6

Shan, J., Zhang, Y., Wu, S., Lin, Z., Li, L., & Wu, Q. (2022). Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials*, *327*, 126874. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874

Yavuz, D., Yazıcı, Ş., Avcı, M. S., & Özmen, D. (2023). A novel approach to estimate the tortuosity of pervious concretes using computed tomography. *Materials and Structures*, *56*(4), 74. https://doi.org/10.1617/s11527-023-02166-0

Zhang, J., Wang, Z., Xiong, J., Jin, Q., Hou, D., Song, Z., Shen, Y., & Hu, N. (2023). Evaluation of in-situ permeability measurement methods for pervious concrete pavement. *Urban Water Journal*, *20*(2), 184–192. https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2155852

Karina de Lima (karina.lima@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, R. Prof. Armando Farias, 703, Pici, Fortaleza - CE, Brasil
Larissa Virgínia Silva Ribas (larissa.ribas@det.ufc.br)
Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia, R. Prof. Aristides Novis, 02, Federação, Salvador - BA, Brasil
Verônica Teixeira Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, R. Prof. Armando Farias, 703, Pici, Fortaleza - CE, Brasil

VIABILIDADE TÉCNICA DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS INTERTRAVADOS

Maria Lúcia Hiromi da Silva Okumura[1], **Matheus David Inocente Domingos**[1]
[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR

RESUMO
Este estudo avaliou a viabilidade técnica da aplicação de lodo de estação de tratamento de água (LETA) como substituto parcial da areia na produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados (*pavers*). Foram testadas dosagens de 0% (concreto de referência), 5% e 7% de LETA. A caracterização físico-química indicou compatibilidade com matrizes cimentícias e segurança ambiental conforme normas técnicas, e os blocos com LETA apresentaram resistência à compressão superior a 35 MPa. A absorção de água aumentou com o teor de LETA, mas permaneceu dentro dos limites normativos. A resistência à abrasão foi satisfatória em todos os teores estudados na pesquisa. Os resultados demonstram que o uso de até 7% de LETA é tecnicamente viável para vias de tráfego leve e ambientalmente vantajoso, pois contribui para reduzir o descarte inadequado de resíduos e a extração de recursos naturais, alinhando-se aos princípios da economia circular e construção sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do pavimento intertravado de concreto surgiu na Europa no pós-guerra e foi introduzida no Brasil na década de 1970, consolidando-se como tecnologia versátil e eficiente na construção civil (Hallack, 2001). O sistema utiliza peças pré-moldadas que se encaixam entre si, formando superfícies resistentes, estáveis e de fácil execução, com rápida liberação ao tráfego e potencial de reaproveitamento de materiais (Ghasemi-Mobtaker *et al*., 2022; Meert *et al.*, 2021).

Atualmente, a demanda por soluções sustentáveis vem crescendo em vários setores da Engenharia Civil. Neste aspecto, o pavimento intertravado pode oferecer vantagens ambientais como permeabilidade e incorporação de resíduos reciclados nos blocos (Rajan *et al*., 2025). Estudos mostram que a adição de resíduos industriais – cinzas e escórias, por exemplo – contribui para a redução da extração de agregados naturais, bem como uma menor emissão de CO_2 (Duan *et al*., 2020). Dentre os resíduos com potencial de reaproveitamento em *pavers*, é possível citar o lodo de estações de tratamento de água (LETA). Este resíduo é composto por partículas minerais e compostos químicos que, quando descartados inadequadamente, podem contaminar o solo e liberar gases de efeito estufa (He *et al*., 2021). Pesquisas apontam que a utilização de LETA em concretos pode resultar em propriedades mecânicas adequadas e melhorar a sustentabilidade do material compósito, desde que sejam atendidos critérios de caracterização e compatibilidade com a matriz cimentícia (Duan *et al*., 2020; Liu *et al.*, 2020).

No Brasil, resíduos de estações de tratamento são produzidos em larga escala e, não raro, comumente descartados em aterros sanitários ou locais sem qualquer controle ambiental. Pesquisas como Bittencourt *et al.* (2012) e Silva e Korf (2024) têm buscado oferecer destinações ambientalmente corretas para estes resíduos, tais como recuperação de solos degradados. Quanto ao seu reaproveitamento em pavimentos com blocos intertravados de concreto, ainda não existe um consenso na literatura nacional acerca da viabilidade técnica (Bastos, 2025; Marangoni *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2024). Considerando tal lacuna científica, o presente trabalho tem por objetivo a investigação da viabilidade técnica do uso de LETA em *pavers* e com vistas à sua aplicação ao menos em vias de tráfego leve segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O LETA selecionado nesta pesquisa foi coletado em uma Estação de Tratamento de Água situada na cidade de Maringá/PR, que utiliza sistema de tratamento convencional com policloreto de alumínio (PAC) como coagulante e vazão média de 1.000 L/s. Isto acarreta a geração de lodo com umidade elevada e propriedades adequadas ao uso em matrizes cimentícias. Após a coleta, o material foi seco em estufa a 105 ± 5°C por 24 h, desagregado manualmente e peneirado conforme a NBR 7217 (ABNT, 2019) para obtenção de um resíduo com granulometria compatível com a areia convencional.

A caracterização físico-química do resíduo incluiu os parâmetros pH, sólidos totais, DBO, DQO e ensaios de lixiviação e solubilização segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004). Foi empregado um cimento Portland CP II-Z 32 na confecção dos *pavers*, e os agregados convencionais incluíram Brita 0 (dimensão máxima de 9,5

mm) como material graúdo e areia natural de rio – módulo de finura entre 2,20 e 2,90 – como agregado miúdo. O fator água/cimento foi fixado em 0,45.

Seguindo recomendações da literatura (Marangoni *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2024), o LETA substituiu parte da fração miúda do concreto (areia). Os traços de concreto foram dosados da seguinte forma: (a) concreto de referência, ou seja, sem LETA; (b) concreto com 5% de LETA em substituição à massa de areia; e (c) concreto com 7% em substituição à massa de areia. Foram moldados 12 Corpos de Prova (CPs) com dimensões (20 x 10 x 6) cm para cada um destes traços, os quais foram confeccionados manualmente e curados por 28 dias em câmara úmida a 23 ± 2°C.

Os dois ensaios preconizados pela NBR 9781 (ABNT, 2013) foram realizados nos corpos de prova, a saber: resistência à compressão simples (*fc*) e resistência à abrasão. O controle da taxa de absorção de água também foi feito, para fins de verificação do enquadramento dos CPs ao limite máximo de 6% para esta taxa. Os resultados finais foram avaliados estatisticamente conforme estabelecido na mesma norma técnica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaios químicos e análise granulométrica do LETA

Os ensaios químicos no LETA *in natura* indicaram pH neutro (7,18) e alta umidade (cerca de 92%), valores estes consistentes com estudos anteriores envolvendo resíduos gerados com policloreto de alumínio como agente coagulante (Duan *et al.*, 2020; Shamaki *et al.*, 2021). Os teores de sólidos totais (882 mg/L) e de sólidos suspensos (723 mg/L) também se enquadram nas faixas descritas na literatura especializada, o que reforça a viabilidade técnica do uso deste tipo de LETA como substituto parcial do agregado convencional, desde que seja feita uma secagem prévia para estabilização da umidade. Cabe destacar que a granulometria do lodo seco (Figura 1) apresenta distribuição semelhante à da areia natural, o que favorece sua incorporação ao concreto em substituição ao material convencional.

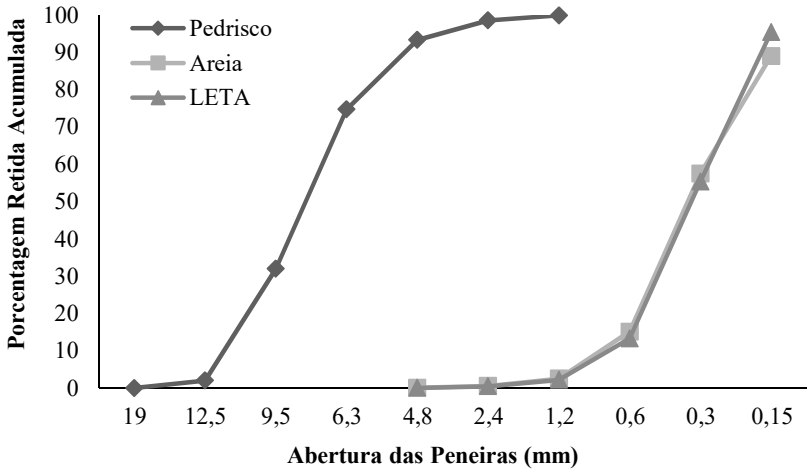


Figura 1: Curvas granulométricas dos agregados convencionais e do LETA.

Os ensaios de lixiviação e solubilização enquadraram o LETA na Classe II-A, ou seja, não perigoso e não inerte (ABNT, 2004). Apesar da presença de metais como alumínio, arsênio e manganês em concentrações superiores aos limites de inércia, todos os valores permaneceram abaixo dos limites máximos para resíduos não perigosos. Isto valida o uso do resíduo em concretos, desde que sob condições controladas de preparo.

3.2. Ensaios mecânicos e absorção de água nos *pavers* com e sem LETA

As dimensões médias dos blocos de concreto – comprimento, largura e altura – apresentaram variações dentro das tolerâncias estabelecidas pela ABNT (2013), evidenciando que a substituição de até 7% de areia por LETA não comprometeu a conformidade geométrica das peças.

As resistências à compressão (f_c) dos concretos com e sem LETA (Figura 2) demonstram resultados

satisfatórios em todas as dosagens consideradas na pesquisa. Em suma, os valores médios de f_c aos 28 dias superaram os 35 MPa para todos os traços estudados, o que sugere a viabilidade do uso destes concretos em pavimentos com tráfego leve ou moderado. O pequeno incremento de 2,23% no valor de f_c observado para o traço com 7% de LETA pode estar associado à presença de frações finas e compostos de sílica e alumina, que exercem possível efeito pozolânico secundário. Isto contribui para a compactação e o ganho de resistência do concreto (Liu *et al.*, 2020).

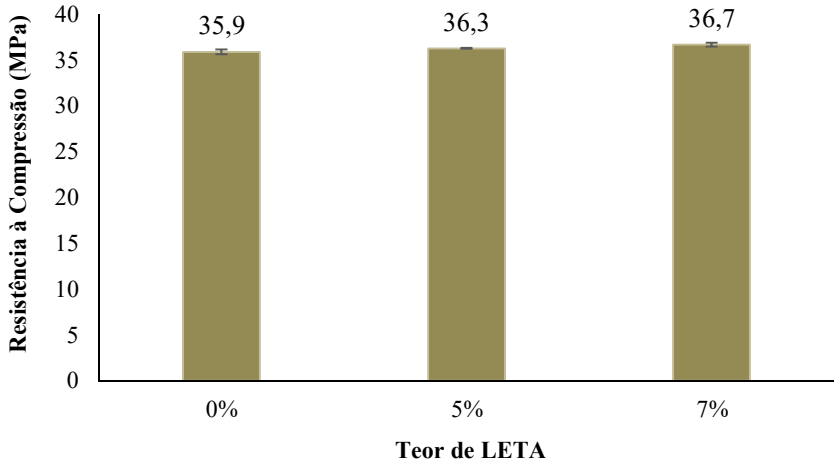


Figura 2: Resistências à compressão aos 28 dias dos traços de concreto com e sem LETA.

Quanto à taxa de absorção de água, verificou-se um aumento deste valor proporcionalmente ao teor de LETA. Enquanto o traço de referência apresentou uma absorção de 4,2%, o traço com 5% de LETA mostrou um valor de 4,6% e o traço com 7% de LETA resultou em uma taxa de 5,1%. Isto pode ser explicado pela maior porosidade capilar do resíduo, ainda que todos os resultados tenham ficado abaixo do limite máximo de 6% estabelecido pela ABNT (2013).

A resistência à abrasão manteve-se dentro dos parâmetros normativos, com desgaste inferior a 23 mm em todos os traços avaliados (Figura 3). O menor valor de desgaste foi observado no traço com 5% de LETA, possivelmente em função da distribuição granulométrica mais uniforme e da melhor compactação da superfície. Segundo Bilir *et al.* (2022), o desempenho à abrasão está relacionado principalmente à densidade superficial e ao processo de cura do concreto, o que explica a manutenção da resistência do concreto mesmo com o aumento da porosidade interna (i. e., maior absorção de água).

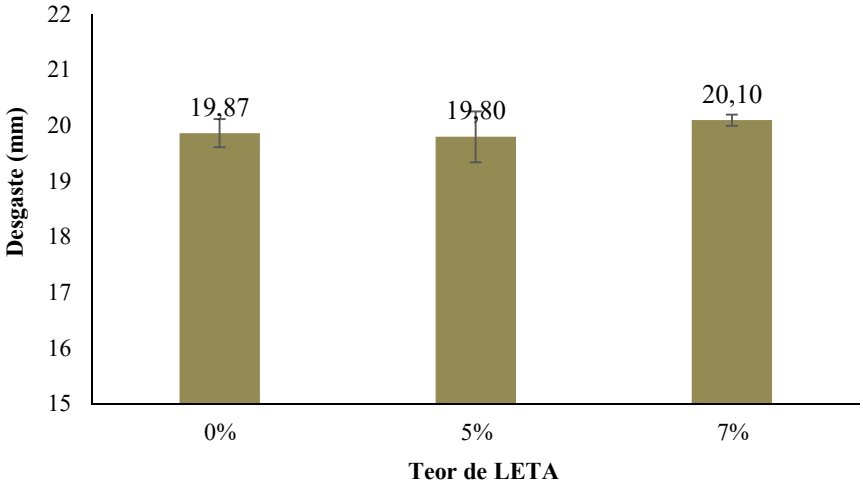


Figura 3: Desgastes obtidos nos ensaios de abrasão após 28 dias e nos traços de concreto com e sem LETA.

É possível observar que, dentre os três traços estudados, o concreto com 7% de LETA possui as melhores vantagens técnicas e econômicas para uso em pavimentos intertravados e sujeitos a tráfego leve. Sua

resistência à compressão é comparável ao concreto de referência, a taxa de absorção de água não excede os limites da ABNT (2013) e a resistência à abrasão atende aos requisitos normativos. Este teor é compatível com os trabalhos de Hemalatha *et al.* (2024), Liu *et al.* (2020) e Marangoni *et al.* (2018), segundo os quais teores de até 10% de resíduos de estações de tratamento são adequados para concretos. Os aumentos na resistência à compressão foram igualmente observados no estudo de Reis *et al.* (2024), ainda que, no caso destes autores, os *pavers* não sejam adequados para uso em pavimentação. Importante destacar que algumas aplicações deste tipo de resíduo incluem até mesmo a substituição parcial de até 35% do teor original de cimento Portland (Velumani e Senthilkumar, 2017).

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho avaliou a viabilidade técnica da produção de concretos de cimento Portland com teores de até 7% de lodo de estação de tratamento de água (LETA) em *pavers*, em substituição parcial da areia convencional. Os ensaios realizados na pesquisa incluem os preconizados pelas normas técnicas brasileiras vigentes para peças de concreto destinadas à pavimentação. Neste sentido, é possível concluir que:

- Todos os teores estudados (5% e 7% de LETA) apresentaram resistências à compressão superiores a 35 MPa aos 28 dias, evidenciando sua viabilidade técnica para uso em vias sujeitas a tráfegos veiculares leves ou moderados;
- A granulometria do LETA se mostrou similar ao agregado natural, o que favoreceu a trabalhabilidade e a estabilidade das peças de concreto;
- Apesar do pequeno aumento na absorção de água em relação ao concreto de referência, os concretos com 5% e 7% de LETA não excederam os limites normativos para este parâmetro de controle; e
- Todos os traços investigados na pesquisa apresentaram níveis de abrasão inferiores ao máximo estipulado nas normas técnicas vigentes da ABNT.

Conclui-se, portanto, que o uso do LETA em peças de concreto pode contribuir para a redução do descarte inadequado de resíduos e, ao mesmo tempo, colaborar para a minimização da extração de recursos naturais e alinhar-se às práticas de economia circular. Recomenda-se que pesquisas futuras sobre o tema incluam aspectos importantes sobre pavimentação, tais como a durabilidade do *paver* com LETA, o desempenho dos blocos em escala real (simuladores de tráfego ou trechos experimentais de campo) e comparações envolvendo LETAs de diferentes origens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2019) NBR 7217: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2013) NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2004) NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Bastos, A. A. (2025) *Incorporação de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto em blocos de concreto para pavimento intertravado*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Maranhão, São Luís.

Bilir, T., B. F. Aygun; J. Shi; O. Gencel e T. Ozbakkaloglu (2022) Influence of different types of wastes on mechanical and durability properties of interlocking concrete block paving (ICBP): a review. *Sustainability*, v. 14, n. 7, 3733. DOI: 10.3390/su14073733.

Bittencourt, S.; B. M. Serrat; M. M. Aisse; L. M. K. S. Marin e C. C. Simão (2012) Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 3, p. 315–324. DOI: 10.1590/S1413-41522012000300008.

Duan, W.; Y. Zhuge; P. N. Pham; C. W. K. Chow; A. Keegan e Y. Liu (2020) Utilization of drinking water treatment sludge as cement replacement to mitigate alkali–silica reaction in cement composites. *Journal of Composites Science*, v. 4, n. 4, 171. DOI: 10.3390/jcs4040171.

Ferreira, G.; K. T. Barbosa; M. S. Quadro; G. H. Trindade; R. Beltrame; L. B. G. A. Morselli e R. Andreazza (2022) Emprego do lodo de uma estação de tratamento de água beneficiado como material suplementar ao cimento Portland. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 4, p. 653-661. DOI: 10.1590/S1413-415220210035.

Ghasemi-Mobtaker, H.; M. Sharifi; N. Taherzadeh-Shalmaei e S. Afrasiabi (2022) A new method for green forage production: energy use efficiency and environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 363, 132562. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132562.

He, Z.-H.; Y. Yang; Q. Yuan; J.-Y. Shi; B.-J. Liu; C.-F. Liang e S.-G. Du (2021) Recycling hazardous water treatment

sludge in cement-based construction materials: mechanical properties, drying shrinkage, and nano-scale characteristics. *Journal of Cleaner Production*, v. 290, 125832. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125832.

Hemalatha, B.; G. Shyamala; M. D. Babu e V. Pramila (2024) Technical feasibility of water treatment plant sludge with nano silica as concrete paver block. *Nano World Journal*, v. 10, Supl. 1, p. S301-S306, 2024. 10.17756/nwj.2024-s1-054.

Liu, Y.; Y. Zhuge; C. W. K. Chow.; A. Keegan; D. Li; P. N. Pham; J. Huang e R. Siddique (2020) Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: microstructural analysis, durability and leaching properties. *Journal of Environmental Management*, v. 262, 110352. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110352.

Marangoni, B.; A. Zaleski e S. C. Vanzetto (2018) Avaliação da incorporação de lodo de ETE como substituição ao agregado miúdo na matriz de concreto. *Perspectiva*, v. 42, n. 158, p. 21-30.

Meert, R.; D. Hastenpflug e J. J. O. Andrade (2021) Contribuição para o uso de lodo de estação de tratamento de água in natura como agregado miúdo em concretos de cimento Portland: avaliação da consistência, massa específica, porosidade, absorção, resistência à compressão e tração na compressão diametral. *Matéria*, v. 26, n. 3, e13025. DOI: 10.1590/S1517-707620210003.13025.

Hallack, A. (2001) Pavimento intertravado: uma solução universal. *Revista Prisma*, v. 1, p. 25-27.

Rajan, M. R. R.; D. Rajalinggam; K. Narayanan e S. Ramasamy (2025) Eco-friendly paver blocks: repurposing plastic waste and foundry sand. *Matéria,* v. 30, e20240707, 2025. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0707.

Reis, T. F.; M. L. Garcia; R. Oliveira e L. F. Armelin (2024) Reutilização de lodo de estação de tratamento de esgoto para a fabricação de blocos de concreto. *Brazilian Journal of Development*, v. 10, n. 6, p. 1-22. DOI: 10.34117/bjdv10n6-048.

Shamaki, M.; S. Adu-Amankwah e L. Black (2021) Reuse of UK alum water treatment sludge in cement-based materials. *Construction and Building Materials*, v. 275, 122047. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122047.

Silva, V. B. e E. P. Korf (2024) Caracterização e valoração de lodo de tratamento de esgoto para aplicação agrícola e na recuperação de áreas degradadas. *Revista Brasileira de Gestão e Sustentabilidade*, v. 10, n. 24, p. 325-336. DOI: 10.21438/rbgas(2023)102421.

Velumani, P. e S. Senthilkumar (2017) Production of sludge-incorporated paver blocks for efficient waste management. *Journal of the Air and Waste Management Association*, v. 68, n. 6, p. 626-636. DOI: 10.1080/10962247.2017.1395373.

Maria Lúcia Hiromi da Silva Okumura (mariaokumura@alunos.utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, Campus Curitiba, CEP 81280-340, Ecoville, Curitiba, Paraná, Brasil.
Matheus David Inocente Domingos (matheusdomingos@utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, Campus Curitiba, CEP 81280-340, Ecoville, Curitiba, Paraná, Brasil.

Pavimentos de Concreto

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

PROPOSTA DE UM MODELO DE PREVISÃO DE DESEMPENHO PARA BLOCOS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM BORRACHA MOÍDA E NANOCOMPOSTO

Maria Lúcia Hiromi da Silva Okumura[1], **Matheus David Inocente Domingos**[1]
[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR

RESUMO
A pavimentação intertravada tem se consolidado em vias rodoviárias por sua durabilidade, facilidade de manutenção e estética. Este estudo propõe desenvolver um modelo de previsão de desempenho laboratorial para blocos de concreto (*pavers*) de alta resistência, modificados com borracha moída de pneus inservíveis (BMP) e nanocomposto. O objetivo é identificar teores ótimos desses modificadores utilizando experimentos com misturas, buscando reduzir o descarte ilegal de resíduos e promover a sustentabilidade. Serão realizados ensaios mecânicos normatizados e análises microestruturais para compreender a transmissão de esforços nos *pavers*. A expectativa é demonstrar a viabilidade técnica da aplicação dos *pavers* em vias de tráfego pesado como alternativa aos pavimentos asfálticos tradicionais, aliando desempenho mecânico superior e benefícios ambientais.

1. INTRODUÇÃO

Os blocos de concreto para pavimentos intertravados, também conhecidos como *pavers*, podem ser definidos como componentes pré-moldados utilizados como revestimentos na estrutura de um pavimento (ABNT, 2013). O pavimento intertravado em si possui as seguintes camadas típicas, dentre outras: subleito, sub-base, camada de assentamento, material de rejuntamento, revestimento e contenção (ABNT, 2011). Este pavimento tem como característica o fato de ser uma estrutura flexível, em que os blocos são justapostos sobre uma camada de assentamento. Diversas fontes (Fernandez *et al.*, 2018; Jamshidi *et al.*, 2019; Mashaly *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020; Patil e Sathe, 2021) destacam as vantagens deste tipo de pavimentação, tais como: maior conforto térmico, maior permeabilidade, superfície antiderrapante, liberação imediata ao tráfego, fácil reparação de peças danificadas, eficiência energética e possibilidade de reciclagem posterior.

Estudos têm sido conduzidos para avaliar a produção de *pavers* com resíduos como, por exemplo, os agregados reciclados (Braga *et al.*, 2017), lodo de estação de tratamento (Liu *et al.*, 2020) e areia de fundição (Patil e Sathe, 2021). Em um contexto geral, todos eles têm como objetivo comum a busca por formas eficientes de reaproveitamento dos resíduos, evitando descarte ilegal e a sobrecarga dos aterros. A preferência por um ou outro tipo de resíduo varia em função do país em que cada estudo foi realizado (Rodríguez *et al.*, 2016). Em termos da borracha moída de pneus inservíveis (BMP), este resíduo ganha relevância nacional na medida em que, somente em 2022, aproximadamente 440.000 tons de pneus foram recolhidos para reciclagem (ANIP, 2023). Além disso, a BMP não é biodegradável e pode demorar mais de 600 anos para decompor-se na natureza (Gamage *et al.*, 2022). Porém, quando triturada ou reduzida a pó, constitui-se um material interessante para reuso na indústria (ANIP, 2023).

O uso da BMP no concreto acarreta melhorias no seu comportamento elástico, na ductilidade e na capacidade de absorção de energia, em comparação ao concreto simples (Siddika *et al*., 2019). Outros autores também mencionam aumentos do módulo de elasticidade e da resistência ao impacto, tornando a ruptura mais dúctil (Ling *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2015). Há ainda relatos de maiores resistências à compressão, à flexão e à tração para concretos com BMP (Murugan *et al.*, 2016). Soma-se a tudo isso o fato de uma das causas de aceleração da deterioração dos pavimentos no Brasil ser justamente o alto fluxo de veículos, o que contribui para uma deterioração rápida e um descarte precoce dos pneus.

Em alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2025) e à busca por materiais recicláveis na produção de pavimentos mais duráveis e resistentes ao tráfego, o objetivo principal deste estudo consiste no desenvolvimento de um modelo de previsão de desempenho para pavimentos intertravados, considerando *pavers* modificados com BMP e um nanocomposto. Para fins de aplicação destes *pavers* em vias de tráfego pesado, serão designadas resistências mínimas características à compressão iguais a 50 MPa. Os objetivos secundários da pesquisa podem ser resumidos da seguinte forma:

- Encontrar possíveis teores ótimos de BMP e nanocomposto, considerando a técnica de experimentos com misturas; e
- Correlacionar as resistências mecânicas dos *pavers* em laboratório com os respectivos resultados das análises de imagens.

2. METODOLOGIA

Inicialmente, será elaborado um traço de concreto sem qualquer adição de BMP e nanocomposto, designado como traço de referência (*T0*). A dosagem deste concreto convencional será feita segundo os critérios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e considerando os protocolos de ensaio definidos pela ABNT (2013). Uma primeira tentativa para esta dosagem será 1:1,16:2,73:0,35 conforme estudo anterior conduzido por Lazzeris *et al.* (2019).

Para fins de avaliação das influências da BMP e do nanocomposto na resistência característica do *paver* à compressão, será desenvolvido um delineamento baseado na técnica estatística de experimentos com misturas (Cornell, 2011). Esta técnica consiste em realizar uma análise mediante gráficos de efeito de cada material e correlacionar a dependência dos compostos através de uma função quadrática, de modo que o somatório dos componentes deve resultar igual à unidade. Para buscar o teor ideal de substituição do agregado miúdo por BMP e nanocomposto, sugere-se inicialmente a elaboração de seis traços com diferentes teores de modificadores. Em um primeiro momento, o teor máximo de BMP será de 10% devido aos intervalos máximos de valores sugeridos por outros autores (Dharmaraj *et al.*, 2022; Siddika *et al*., 2019). Serão inicialmente moldados 10 corpos de prova para cada traço, a fim de obter um espaço amostral maior e realizar os outros ensaios em quadruplicata (ABNT, 2013).

Além da resistência à compressão, também serão conduzidos ensaios de absorção de água e resistência à abrasão, conforme prevê a NBR 9781 (ABNT, 2013). Análises microestruturais incluirão a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a difração por raio-X (DRX) e o escaneamento da seção transversal de cada traço para avaliação das propriedades de intertravamento dos agregados. Especificamente em termos das seções transversais dos corpos de prova, pesquisas anteriores têm destacado êxito na correlação entre parâmetros derivados destas seções e as propriedades mecânicas correspondentes em materiais compósitos (Domingos *et al.*, 2025; Taheri-Shakib e Al-Mayah, 2023).

Quanto ao modelo de previsão de desempenho do *paver*, este poderá ser desenvolvido através de programas computacionais específicos que correlacionam as características do pavimento com a evolução dos defeitos de superfície sob determinadas condições climáticas e de tráfego. Prevê-se o uso de simuladores de tráfego para monitorar a evolução do pavimento com o tempo e, assim, coletar dados de desempenho para construção do modelo. Esta técnica foi adotada por Eltwati (2015) para fins de avaliação do desempenho da estrutura sob condições aceleradas de carregamento e diferentes conformações construtivas.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se obter a porcentagem ideal de substituição parcial do agregado miúdo pela combinação de BMP e nanocomposto, permitindo assim a aplicação do *paver* em vias de tráfego pesado a partir da comprovação do seu desempenho em laboratório. Considerando os dados de resistência à compressão e absorção de água e as análises microscópicas e microestruturais, almeja-se não apenas construir um modelo de previsão de desempenho dos *pavers* e ressaltar a sua viabilidade técnica em pavimentos com tráfego pesado, mas também fomentar a reciclagem de resíduos e contribuir para uma menor degradação ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2013) NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2011) NBR 15953: Pavimento intertravado com peças de concreto – execução. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANIP (2023). *Página inicial*. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, São Paulo. Disponível em: <https://www.anip.org.br/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

Braga, A. M.; J. D. Silvestre e J. De Brito (2017) Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 529-543. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.057.

Cornell, J. A. (2011) *A primer on experiments with mixtures*. New York: John Wiley and Sons, Inc. DOI: 10.1002/9780470907443.

Dharmaraj, R.; P. Manikandan; K. Narayanan; R. Malathy; R. Alagumurugan e P. Rajalinggam (2022) Study of impact of crumb rubber used as an aggregate in concrete mix. *Materials Today: Proceedings*, v. 68, n. 6, p. 2104-2110. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.371.

Domingos, M. D. I.; A. O. Gomes; R. O. Gomes e W. Mazer (2025) Microstructural analysis and compressive strength evaluation of interlocking concrete paving blocks incorporating crumb rubber. *Principia*, v. 62, e8656. DOI: 10.18265/2447-9187a2025id8656.

Eltwati, A. S. (2015) *Structural performance of asphalt blocks pavement as related to thickness, binder types, and joint width*. Thesis (Doctor of Philosophy). Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Kuala Lampur.

Fernandez, L. P.; P. C. B. Mikowski; G. Macioski; A. Nagalli e F. B. Freire (2018) Avaliação da incorporação do lodo de estação de tratamento de água em peças de concreto intertravado. *Matéria*, v. 23, n. 3, e12156, 2018. DOI: 10.1590/S1517-707620180003.0490.

Gamage, S.; S. Palitha; D. P. D. P. Meddage; S. Mendis; H. M. Azamathulla e U. Rathnayake (2022) Influence of crumb rubber and coconut coir on strength and durability characteristics of interlocking paving blocks. *Buildings*, v. 12, n. 7, 1001. DOI: 10.3390/buildings12071001.

Jamshidi, A.; K. Kurumisawa; G. White; T. Nishizawa; T. Igarashi; T. Nawa e J. Mao (2019) State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. *Construction and Building Materials*, v. 200, p. 713-755. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286.

Lazzeris, F. D.; H. Alionço; T. R. S. Duarte; M. D. I. Domingos; W. Mazer e D. F. Vicentini (2019) Viabilidade técnica da produção de blocos de concreto de alta resistência preparados com plásticos reciclados para aplicação em pavimentação intertravada. *Anais do XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Balneário Camboriú, p. 1914-1925.

Ling, T.-C.; H. M. Nor; M. R. Hainin e S.-K. Kim (2010) Long term strength of rubberized concrete paving blocks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials*, v. 163, n. 1, p. 19-26. DOI: 10.1680/coma.2010.163.1.19.

Mashaly, A. O.; B. N. Shalaby e M. A. Rashwan (2018) Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 800-818. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046.

Murugan, R. B.; C. Natarajan e S.-E. Chen (2016) Material development for a sustainable precast concrete block pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 3, n. 5, p. 483-491. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.001.

Liu, Y.; Y. Zhuge; C. W. K. Chow.; A. Keegan; D. Li; P. N. Pham; J. Huang e R. Siddique (2020) Utilization of drinking water treatment sludge in concrete .paving blocks: microstructural analysis, durability and leaching properties. *Journal of Environmental Management*, v. 262, 110352. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110352.

ONU (2025) *Sobre o nosso trabalho para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil*. Organização das Nações Unidas no Brasil, Brasília. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 14 jul. 2025.

Patil, A. R. e S. B. Sathe (2021) Feasibility of sustainable construction materials for concrete paving blocks: a review on waste foundry sand and other materials. *Materials Today: Proceedings*, v. 43, n. 2, p. 1552-1561. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.402.

Rodríguez, C.; C. Parra; G. Casado; I. Miñano; F. Albaladejo; F. Benito e I. Sánchez (2016) The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces. *Journal of Cleaner Production*, v. 127, p. 152-161. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.137.

Taheri-Shakib, J. e A. Al-Mayah (2023) A review of microstructure characterization of asphalt mixtures using computed tomography imaging: prospects for properties and phase determination. *Construction and Building Materials*, v. 385, 131419. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131419

Siddika, A.; M. A. A. Mamun; R. Alyousef; Y. H. M. Amran; F. Aslandi e H. Alabduljabbar (2019) Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: a review. *Construction and Building Materials*, v. 224, p. 711-731. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108.

Silva, F. M.; L. A. G. Barbosa; R. C. C. Lintz e A. E. P. G. A. Jacintho (2015) Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 71-79. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027.

Maria Lúcia Hiromi da Silva Okumura (mariaokumura@alunos.utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, Campus Curitiba, CEP 81280-340, Ecoville, Curitiba, Paraná, Brasil.
Matheus David Inocente Domingos (matheusdomingos@utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Construção Civil, Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, Campus Curitiba, CEP 81280-340, Ecoville, Curitiba, Paraná, Brasil.

Pavimentos Ferroviários

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DAS TENSÕES ADMISSÍVEIS NO PAVIMENTO FERROVIÁRIO A PARTIR DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DO DORMENTE

Marina Donato[1], Bruno Guida Gouveia[2], Alice Monteiro Mendes Alegria[1], Luis Felipe Wolff Fernandes[3], Gustavo Fernandes do Nascimento[1], Tainara Michelle Pereira[3]
[1]Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ – DTECH, [2]Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ – DCCT, [3]Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT – FAENG/DTQM

RESUMO
Os dormentes são elementos fundamentais na via permanente ferroviária, responsáveis por distribuir as cargas para as camadas inferiores da estrutura. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência do comprimento dos dormentes na distribuição das tensões verticais no sublastro, reforço de subleito e subleito natural. Foram analisados quatro cenários com diferentes comprimentos de dormentes, considerando bitolas métrica e larga. Ao utilizar materiais típicos de ferrovias de carga no Brasil e aplicar o método empírico de dimensionamento, ou seja, sem recorrer a simulação computacional, observou-se que o aumento do comprimento dos dormentes promoveu uma redução significativa das tensões, sobretudo nas camadas superiores. O cenário 4, com dormentes de 2,80 m em bitola larga, apresentou o melhor desempenho, com as menores tensões verticais. Conclui-se que o comprimento dos dormentes tem impacto direto na eficiência estrutural da via, sendo um fator relevante no dimensionamento para garantir estabilidade e desempenho operacional adequados.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os dormentes são elementos fundamentais da superestrutura ferroviária, com a função de manter o espaçamento dos trilhos e distribuir as cargas do tráfego para as camadas inferiores, contribuindo para a estabilidade da via e a preservação de sua geometria (Brina, 1979; Kerr, 2003; Paiva, 2016). Segundo Queiroz (1990), o posicionamento e o espaçamento entre os dormentes afetam diretamente a estabilidade da linha, o desgaste dos materiais e a frequência de manutenção. Sañudo (2022) ressalta que dormentes mais curtos tendem a concentrar tensões no sublastro e no reforço do subleito, o que pode comprometer a durabilidade da estrutura, enquanto dormentes mais longos promovem melhor distribuição das cargas, embora demandem camadas de apoio mais espessas e possam impor limitações à capacidade de carga, exigindo um dimensionamento criterioso.

O desempenho estrutural da via permanente está diretamente ligado à forma como as cargas do material rodante são distribuídas e absorvidas pelas camadas do sistema ferroviário. Dentre os fatores que influenciam essa distribuição, destaca-se o comprimento dos dormentes, cuja variação pode alterar significativamente o comportamento das tensões transmitidas à estrutura, afetando a eficiência do suporte da via (Rangel e Motta, 2019). Assim, a pesquisa tem como objetivo a avaliação do comportamento mecânico da via permanente em função da variação do comprimento dos dormentes, com ênfase na distribuição de tensões nas camadas inferiores da estrutura ferroviária. Especificamente, busca-se analisar as tensões verticais atuantes no topo do sublastro, na camada de reforço do subleito e no subleito natural, de modo a compreender a influência geométrica dos dormentes sobre a propagação de cargas induzidas pelas solicitações do material rodante.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método adotado neste estudo foi estruturado em cinco etapas principais: (1) caracterização dos materiais das camadas da via permanente, com obtenção de parâmetros geotécnicos e mecânicos conforme o método empírico; (2) definição das cargas atuantes e do período de projeto com base no eixo-tipo ferroviário; (3) dimensionamento estrutural da via utilizando o método empírico, considerando a capacidade de suporte dos materiais; (4) simulação de diferentes cenários com variação no comprimento dos dormentes, por meio da modelagem da seção transversal da via; e (5) análise das tensões verticais efetivas nas camadas de sublastro, reforço de subleito e subleito natural, correlacionando os resultados com a geometria dos dormentes.

2.1. Exposição de dados

Foram analisados quatro cenários distintos, nos quais se variaram os comprimentos mínimos e máximos dos dormentes, considerando as bitolas métrica e larga, com base nos valores recomendados pelo DNIT (2016) e Paiva (2016). As características correspondentes a cada cenário estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos cenários analisados.

Cenários	Bitola (m)	Comprimento dormente (m)
Cenário 1	1,00	1,90
Cenário 2	1,00	2,00
Cenário 3	1,60	2,65
Cenário 4	1,60	2,80

Fonte: Adaptado de DNIT, 2016; Paiva (2016).

2.2. Características dos materiais

Neste estudo, foram considerados dormentes serrados de madeira, em virtude de sua ampla utilização na malha ferroviária nacional e de suas propriedades mecânicas compatíveis com os requisitos estruturais da modelagem proposta. As dimensões adotadas para os dormentes variaram em função da bitola da via, conforme especificado na Tabela 2.

Tabela 2: Dimensões dormentes serrados de madeira.

	Comprimento (m)		Largura (m)		Altura (m)	
Bitola (m)	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Métrica (1,00)	1,90	2,00	0,22	0,24	0,16	0,18
Larga (1,60)	2,65	2,80	0,22	0,26	0,16	0,19

Fonte: Adaptado de DNIT, 2016; Paiva (2016).

Para assegurar a representatividade e a precisão da análise estrutural conduzida neste estudo, foram adotados materiais amplamente utilizados em ferrovias de carga brasileiras. Foram utilizados dormentes de madeira, conforme especificações do DNIT (2016) e Paiva (2016), trilhos do tipo TR–68, conforme indicado pelo DNIT (2015), e materiais de jazida para as camadas de lastro e sublastro, cujas propriedades foram obtidas a partir da pesquisa realizada por Silva e Reis (2014). O subleito utilizado é composto por solo proveniente do Câmpus da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado no município de Várzea Grande – MT. A Tabela 3 apresenta a caracterização dos materiais utilizados nas diferentes camadas que compõem os cenários avaliados.

Tabela 3: Caracterização dos materiais que compõe as camadas dos cenários avaliados.

Dormente	Trilho	Lastro	Sublastro	Subleito
Madeira (DNIT, 2016 e Paiva, 2016)	TR – 68 (DNIT, 2015)	Material de jazida (Silva e Reis, 2014)	Material de jazida (Silva e Reis, 2014)	Solo *in natura*

Fonte: Adaptado de DNIT, 2016; Paiva, 2016; DNIT, 2015; Silva e Reis, 2014.

Para a modelagem da estrutura ferroviária, foram adotados parâmetros técnicos compatíveis com as condições operacionais de uma ferrovia de carga. Esses dados incluem características geométricas, de carregamento, e propriedades do suporte da via, conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Características dos elementos da via ferroviária.

Elementos da ferrovia	Valores
Diâmetro da roda	38”
Peso do eixo	40ton
Coeficiente dinâmico	1,43
Largura do dormente	26,5cm
Velocidade máxima	49,71m/h
Módulo k	0,6

Fonte: Adaptado de Silva e Reis, 2014.

2.3. Carregamento e período de projeto

O número de ciclos de carga que atuam sobre a estrutura ao longo de sua vida útil, representado pela variável N. Diante disso, o número N é obtido com base na composição do trem, número de eixos por veículo, frequência diária de operação e duração do período de projeto. Neste estudo, adotou-se a metodologia proposta por Gomes *et al.* (2017), que prevê o cálculo do número de ciclos separadamente para locomotivas (NL) e vagões (NV), respectivamente Equação 1 e 2:

$$NL = \text{número de locomotivas} \times \text{número de eixos por locomotiva} \times \text{periodicidade diária} \times 365 \quad (1)$$

$$NV = \text{número de vagões} \times \text{número de eixos por vagão} \times \text{periodicidade diária} \times 365 \quad (2)$$

Considerando uma composição com 2 locomotivas de 6 eixos e 120 vagões de 4 eixos, operando 7 vezes ao dia, durante 365 dias por ano e com período de projeto de 20 anos, obteve-se:

$$NL = 2 \times 6 \times 7 \times 365 = 30.660$$

$$NV = 120 \times 4 \times 7 \times 365 = 1.226.400$$

resultando em um número total de ciclos, soma-se NL com NV:

$$N = (30.660 + 1.226.400) \times 20 = 25.141.200 \approx 2{,}5 \times 10^7.$$

2.4. Dimensionamento do pavimento ferroviário pelo método empírico (convencional)

Inicialmente, para o dimensionamento do pavimento ferroviário pelo método empírico, é fundamental conhecer as demandas de tráfego às quais a estrutura será submetida ao longo de sua vida útil. A partir dessa informação, calcula-se o número de ciclos de carga aplicados sobre a via. Com base nesse valor, estima-se a pressão vertical transmitida às camadas do pavimento, permitindo a verificação da capacidade de suporte dos materiais e a definição das espessuras adequadas para cada camada da estrutura ferroviária.

Para a aplicação do método empírico, é necessário determinar a tensão admissível no subleito, a qual pode ser estimada por meio da equação proposta por Heukelon, apresentada na Equação 3.

$$\sigma_{adm} = \frac{0{,}006 \cdot Ed}{1 + 0{,}7 \cdot \log N} \tag{3}$$

em que σ_{adm} representa a tensão admissível (kgf/cm²), Ed é o módulo de elasticidade do solo (kgf/cm²) e Ncorresponde ao número de ciclos de carga previstos para o período de projeto.

Adicionalmente, para o cálculo da pressão transmitida às camadas inferiores, especialmente à profundidade h, aplica-se a Equação 4 proposta por Schramm:

$$Ph = \frac{1{,}5 \cdot R}{[3(l - s) + b] \cdot h \cdot tan\epsilon} \tag{4}$$

Onde Ph é a pressão em profundidade (kgf/cm²), R é a carga máxima sobre um apoio do trilho (kgf), l é o comprimento do dormente (cm), s é a distância entre os trilhos (cm), b é a largura do dormente (cm), h é a profundidade a partir da face inferior do dormente (cm), e ϵ é o ângulo de espraiamento das tensões (graus).

Cabe destacar que, conforme a proposta de Gerhard Schramm, adota-se o valor de K = 0,6 para o coeficiente de distribuição de pressões. Essa constante representa a eficiência da dispersão das tensões verticais ao longo da profundidade do pavimento, sendo influenciada por fatores como a rigidez dos materiais e o grau de confinamento. Seu valor pode variar entre 0,4 e 0,8, dependendo das condições do sistema de apoio da via, sendo 0,6 uma estimativa intermediária amplamente utilizada em análises empíricas de dimensionamento ferroviário.

Em seguida, o cálculo do valor de CBR (*California Bearing Ratio*) necessário para suportar tais tensões, pode ser realizado com a Equação 5 também atribuída a Heukelon:

$$CBR\ (\%) = \frac{\sigma_{adm} \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \log N)}{0{,}006 \cdot 100} \tag{5}$$

Por fim, a espessura real de cada camada é obtida a partir da profundidade geométrica h, ajustada por meio do coeficiente de distribuição C_d, conforme a Equação 6:

$$h_{real} = h \cdot C_d \tag{6}$$

sendo que os valores de C_d adotados normalmente são 1,00 para o lastro, 0,866 para o sublastro e 0,745 para o reforço de subleito.

Dessa forma, ao se adotar tais procedimentos, assegura-se que as camadas superiores sejam convenientemente assentadas sobre uma fundação homogênea e mecanicamente estável, o que constitui condição imprescindível para a durabilidade e a eficiência funcional da via permanente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização geotécnica e mecânica do solo aplicado no subleito

As caracterizações geotécnicas e mecânicas do solo utilizado na camada de subleito foram realizadas conforme os critérios exigidos pela metodologia empírica de dimensionamento. Os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) seguiram, respectivamente, as normas NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2016), sendo posteriormente calculado o índice de plasticidade (IP). Para a determinação da capacidade de suporte do solo, foi realizado o ensaio CBR, conforme a NBR 9895 (ABNT, 2017b), utilizando compactação com energia normal. As propriedades obtidas nesses ensaios estão consolidadas na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização geotécnica e mecânica do solo.

Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Tipo de material	CBR (%)	Expansão (%)
Solo	26	18	8	A-2-4	11	0,2

Com base nos resultados, o solo apresentou LL de 26%, LP de 18% e IP de 8%, sendo classificado como A-2-4, segundo a metodologia do *Transportation Research Board* (TRB), em função da sua distribuição granulométrica. Logo, a classificação foi corroborada pelas diretrizes do DNIT (2006), que consideram a fração de material passante nas peneiras nº 200 e nº 40. O valor de CBR obtido foi de 11%, com expansão de 0,2%, caracterizando um solo com comportamento adequado para ser utilizado como subleito em estruturas ferroviárias.

3.2. Tensão no topo da camada do pavimento ferroviário – sublastro, reforço de subleito e subleito

A Figura 1 apresenta os valores de tensões verticais admissíveis estimadas nas camadas de sublastro, reforço de subleito e subleito natural para quatro diferentes cenários estruturais, variando-se o comprimento dos dormentes. Os cenários foram definidos com base nos comprimentos mínimos e máximos recomendados para dormentes de madeira nas bitolas métrica (cenários 1 e 2) e larga (cenários 3 e 4) (DNIT, 2016).

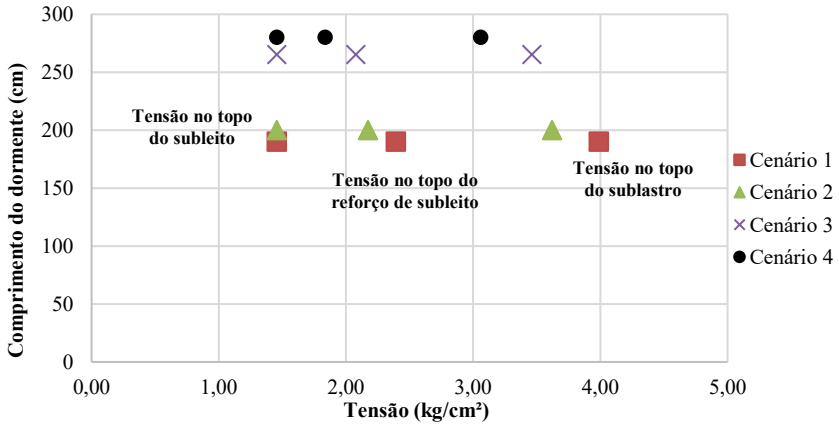


Figura 1: Tensões admissíveis nas camadas de sublastro, reforço do subleito e subleito – Cenários 1, 2, 3 e 4.

No cenário 1, observou-se uma tensão vertical de 3,99 kgf/cm² no topo do sublastro, 2,39 kgf/cm² no reforço de subleito e 1,46 kgf/cm² no subleito. Já no cenário 2, ao se adotar dormentes de 200 cm, as tensões nas camadas superiores apresentaram reduções significativas: 3,62 kgf/cm² no sublastro (queda de 9,27%) e 2,17 kgf/cm² no reforço de subleito (queda de 9,21%). A tensão no subleito manteve-se inalterada em 1,46 kgf/cm², evidenciando que o aumento de apenas 10 cm no comprimento do dormente melhora substancialmente a distribuição de cargas, especialmente nas camadas mais próximas à superfície.

Nos cenários referentes à bitola larga, foram observadas tensões menores em comparação à bitola métrica. No cenário 3, com dormentes de 265 cm, as tensões foram de 3,46 kgf/cm² no sublastro, 2,08 kgf/cm² no reforço de subleito e 1,46 kgf/cm² no subleito. Ao aumentar o comprimento dos dormentes para 280 cm no cenário 4, verificou-se nova redução nas tensões: 3,06 kgf/cm² no sublastro (redução de 11,56%) e 1,84 kgf/cm² no reforço de subleito (redução de 11,54%), permanecendo a tensão no subleito inalterada em 1,46 kgf/cm². Isso indica que a maior extensão dos dormentes proporciona uma área de distribuição mais ampla, reduzindo os esforços verticais transmitidos às camadas superiores da estrutura ferroviária.

De forma geral, os resultados demonstram que a utilização de dormentes mais longos favorece a dissipação das tensões verticais no pavimento ferroviário, especialmente na camada de sublastro. Dentre os cenários analisados, aquele que apresentou os menores valores de tensão foi o cenário 4, seguido pelos cenários 3 e 2. O cenário 1 concentrou os maiores esforços verticais nas camadas superiores, indicando menor eficiência na distribuição das cargas. Além disso, observou-se que, mesmo com comprimentos menores, os dormentes utilizados na bitola larga apresentaram desempenho estrutural superior àqueles empregados na bitola métrica, evidenciando a influência tanto do comprimento dos dormentes quanto da geometria da via na resposta mecânica do sistema.

Os resultados obtidos corroboram as recomendações da literatura especializada, onde Leite *et al*. (2023), e Sañudo *et al*. (2021), indicam que o emprego de dormentes com comprimentos reduzidos é adequado para

linhas com tráfego leve a moderado, possibilitando otimização de custos sem comprometer os requisitos mínimos de desempenho estrutural. Em contrapartida, para ferrovias submetidas a tráfego intenso, a utilização de dormentes mais alongados, em conjunto com reforço estrutural do subleito, conforme evidenciado por Sañudo *et al*. (2022), promove a diminuição das tensões nas camadas de suporte, assegurando a estabilidade e durabilidade da via, ainda que implique em maior custo inicial. Adicionalmente, Sañudo *et al*. (2021 e 2022) demonstram que, mediante controle rigoroso das tensões admissíveis e adoção de espaçamentos entre elementos estruturais superiores a 0,6 m, é possível reduzir em até 40% os custos de implantação da via, mantendo a integridade estrutural e operacional do sistema ferroviário.

4. CONCLUSÃO

A influência do comprimento dos dormentes na distribuição das tensões verticais nas camadas superiores do pavimento ferroviário, especialmente no sublastro e reforço de subleito, revela-se expressiva. Incrementos modestos no comprimento dos dormentes promovem reduções significativas nas tensões, otimizando a dissipação das cargas aplicadas e potencialmente aumentando a durabilidade estrutural. Ademais, a geometria da via, em particular a bitola larga, apresenta desempenho superior em relação à bitola métrica, mesmo com dormentes de menor comprimento, evidenciando sua relevância no comportamento mecânico do sistema.

A literatura técnica corrobora a adequação do uso de dormentes curtos para ferrovias com tráfego leve a moderado e a necessidade de dormentes mais longos, associados a reforço estrutural, para linhas de tráfego intenso. O controle rigoroso das tensões admissíveis, aliado à otimização do espaçamento entre elementos estruturais, possibilita redução significativa dos custos de implantação sem comprometer a integridade operacional da via. Portanto, o dimensionamento eficiente dos pavimentos ferroviários deve integrar os parâmetros geométricos e as demandas de tráfego para assegurar desempenho estrutural compatível com a sustentabilidade econômica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsas de iniciação científica, que possibilitaram a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017a). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017b). NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). Manual de pavimentação. 3ª edição - Publicação IPR - 719. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ.

Brina, H. L. (1979) Estradas de ferro – via permanente. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2015). PIM 01 – Dormente de madeira. Procedimento de inspeção de material. Contrato DIF/DNIT 127/2008.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). Procedimento de inspeção de material – PIM 14 – Trilho para linha férrea. Brasília.

Gomes, M. *et al*. (2017). Análise da tensão admissível de um subleito de pavimento ferroviário empregando-se ensaios de CBR versus o módulo resiliente do triaxial dinâmico. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte.

Kerr, A. D. (2003). Fundamentals of railway track engineering. Omaha: Simmons-Boardman Books.

Leite, F. H.; Ávila, F. G.; Saraiva, R. M. D. C. (2023) Estudo do intervalo entre dormentes de concreto em ferrovias de carga no Brasil: caso da ferrovia de integração oeste-leste. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, v. 16, n. 9, p. 14845–14870. DOI: 10.55905/revconv.16n.9-060.

Paiva, C. E. L. (2016) Super e infraestruturas de ferrovias: critérios para projeto (1ª ed.). Rio de Janeiro: Elsevier Brasil.

Queiroz, R. C. (1990). Estudo experimental de tensões e deformações em camadas da infraestrutura e superestrutura ferroviária. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo – USP. São Carlos – SP.

Rangel, G. W. A.; Motta, L; M. G. (2019). Um método para a estimava da deflexão do pavimento ferroviário. In:. XXXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. Balneário Camboriú – 2019.

Sañudo, R. O.; M. Miranda; B. Alonso e V. Markine (2022) Sleepers spacing analysis in railway track infrastructure. Infrastructures, v. 7, n. 6. DOI: 10.3390/infrastructures7060083

Sañudo, R. O.; J. Pombo; S. Ricci e M. Miranda (2021) The importance of sleepers spacing in railways. Construction and Building Materials, v. 300, 124326. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124326

Silva, M. A.; Reis, A. C. C. (2014). Estudo comparativo entre os métodos empírico e mecanístico do dimensionamento de pavimento ferroviário. XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Curitiba.

CONTAMINAÇÃO DO LASTRO E SEUS EFEITOS NA EFICIÊNCIA OPERACIONAL FERROVIÁRIA: PROPOSTA DE PROCEDIMENTO E APLICAÇÃO PRÁTICA

Rafael Lanunci da Silva Teixeira Poubel[1], **José Luiz Lopes Teixeira Filho** [1, 2], **Hostilio Xavier Ratton Neto** [3]
[1]AGETRANSP, [2]Universidade Federal de Juiz de Fora, [3]Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
Este artigo trata da deficiência de via permanente conhecida como contaminação do lastro ferroviário, condição que compromete a drenagem da via e contribui para a formação de bolsões de lama. Esses bolsões afetam diretamente a geometria da via, exigindo a imposição de restrições de velocidade e comprometendo a eficiência da operação ferroviária. Para mensurar esse impacto, foi desenvolvido um procedimento baseado em parâmetros operacionais padronizados, como velocidade máxima autorizada, pontos de frenagem e retomada, além das características técnicas do material rodante. O modelo estima as perdas no tempo de viagem decorrentes da presença dos bolsões de lama na via permanente. A metodologia proposta foi aplicada aos dados do sistema de transporte ferroviário de passageiros do Rio de Janeiro, utilizando os Quadros de Restrição de Velocidade para identificar e analisar os trechos afetados. Os resultados evidenciam perdas operacionais relevantes e reforçam a importância de intervenções adequadas no planejamento da manutenção e na concepção da infraestrutura ferroviária. Desta forma, o estudo apresenta uma metodologia simples, replicável e fundamentada em parâmetros de circulação, capaz de quantificar de forma objetiva os impactos operacionais de anomalias na via permanente.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas ferroviários de passageiros desempenham papel fundamental na mobilidade urbana, tendo em vista que conecta às diversas áreas de uma cidade ou de uma região metropolitana, às centralidades econômicas com capacidade e regularidade diferenciadas, em relação a outros modos. No estado do Rio de Janeiro, por exemplo, o sistema de transporte ferroviário de passageiros é operado pela Concessionária Supervia (Supervia) que transportou em 2023 cerca de 86,64 milhões de passageiros, o que representa aproximadamente 313 mil passageiros por dia útil (AGETRANSP, 2024). Conforme se observa do relatório da AGETRANSP (2024), a maior parte dessas viagens são pendulares, aparentemente de casa para o trabalho ou para instituições de ensino, refletindo a dependência cotidiana da população desses sistemas de transporte coletivo de alta capacidade.

No entanto, para que esse modo de transporte se mantenha relevante socialmente e economicamente é necessário que a operação permaneça eficiente e regular. Deficiências nos sistemas que compões a infraestrutura ferroviária, em especial na via permanente, obrigam à imposição de severas restrições de velocidade, ampliando os tempos programados de viagem, perturbando a experiência do passageiro, além de elevar o risco de descarrilamentos. Deste modo, realizar estudos sistemáticos sobre essas diversas deficiências e quantificar seus efeitos pode contribuir de forma significativa para melhorar o planejamento das intervenções de manutenção, de modo a regatar a confiabilidade do serviço e, em última instância, melhorar a qualidade de vida dos passageiros que dependem diariamente do sistema ferroviário.

Dentre às deficiências corriqueiras no sistema de via permanente, o presente estudo aborda a contaminação do lastro ferroviário que afeta diretamente a segurança e eficiência do transporte ferroviário. Com o envelhecer da estrutura e o constante uso da via, os vazios apresentados pela camada de lastro começam a apresentar acentuado acúmulo de partículas finas (Indraratna et al., 2010).

Entre as principais consequências da contaminação do lastro ferroviário destaca-se a formação dos chamados bolsões de lama. Esse fenômeno ocorre quando a água proveniente de precipitações e falhas na drenagem se mistura com partículas finas, formando uma lama que, em função dos ciclos de carga gerados pela passagem dos trens, é bombeada para a superfície da via, comprometendo sua estabilidade. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar os impactos operacionais associados aos bolsões de lama, por meio do desenvolvimento de um procedimento de avaliação baseado em premissas simplificadas e parâmetros definidos pelo autor. A metodologia proposta é então aplicada a dados reais da Concessionária Supervia, com o intuito de ilustrar sua aplicabilidade prática e contribuir para a compreensão dos efeitos dessas anomalias na eficiência do transporte ferroviário de passageiros.

2. METODOLOGIA

A via permanente lastreada constitui o elemento central da infraestrutura ferroviária, responsável por distribuir cargas do material rodante para o subleito, manter o alinhamento da via e assegurar as condições de estabilidade operacional (Castello Branco & Ferreira, 2002; Coimbra, 2008). Entre seus componentes, o lastro exerce papel essencial, tanto estrutural quanto hidráulico. Quando contaminado por partículas finas, oriundas do bombeamento do subleito ou da degradação do próprio material, o lastro perde capacidade drenante, favorecendo a formação dos chamados bolsões de lama (Figura 1).

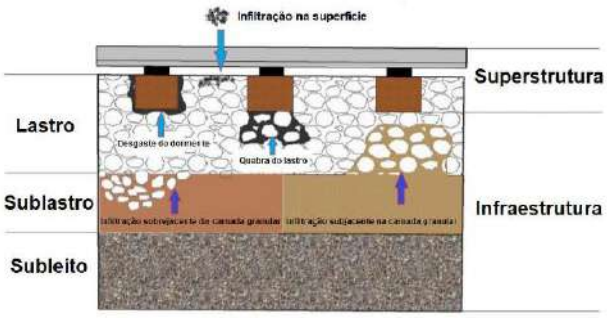


Figura 1: Contaminação do lastro ferroviário (Fonte: ROSA (2020), SELIG e WATERS (1994))

Esses bolsões são resultado da mistura entre partículas finas e água de infiltração, bombeada para a superfície em função das cargas dinâmicas impostas pelo tráfego de trens. O fenômeno compromete a rigidez da via, reduz a vida útil de dormentes e impõe riscos à segurança operacional (Indraratna et al., 2010; Merheb, 2014). Em razão disso, os trechos afetados geralmente passam a operar sob restrições de velocidade, medida amplamente relatada em manuais de manutenção e práticas de fiscalização. Estudos anteriores (Indraratna et al., 2010; Rosa, 2020; Rangel, 2017) destacam os efeitos da drenagem deficiente e da presença de finos sobre a estabilidade da via. O presente trabalho avança ao propor um procedimento para quantificar o impacto operacional desses bolsões a partir de parâmetros de circulação padronizados.

O procedimento proposto parte do princípio de que cada bolsão identificado implica redução temporária da velocidade, com consequente perda de tempo de viagem. Para estimar esse impacto, foram definidos parâmetros fixos de circulação, baseados em características técnicas da frota de trens e na infraestrutura existente na operação ferroviária do sistema estudado. As principais premissas adotadas foram:

- **Velocidade Máxima Autorizada (VMA):** corresponde ao limite operacional estabelecido para cada ramal, refletindo as condições normais de circulação da via.
- **Velocidade de restrição:** é o valor reduzido imposto em trechos com anomalias, aplicado como medida de segurança para manter a estabilidade operacional.
- **Pontos de frenagem e retomada:** referem-se às posições ao longo da via onde o trem deve iniciar a redução de velocidade e, posteriormente, a aceleração, determinados por equações de movimento.
- **Retomada da VMA:** representa o momento em que a composição pode recuperar a velocidade máxima, o que ocorre apenas após a saída completa do bolsão de lama.

Com base nessas premissas, a perda de tempo associada a cada bolsão foi calculada a partir da diferença entre o percurso em velocidade normal e o percurso sob restrição. O modelo (Figura *2*) considera as quatro etapas sucessivas: (i) redução da velocidade; (ii) travessia do trecho restrito; (iii) saída do bolsão; e (iv) retomada da VMA.

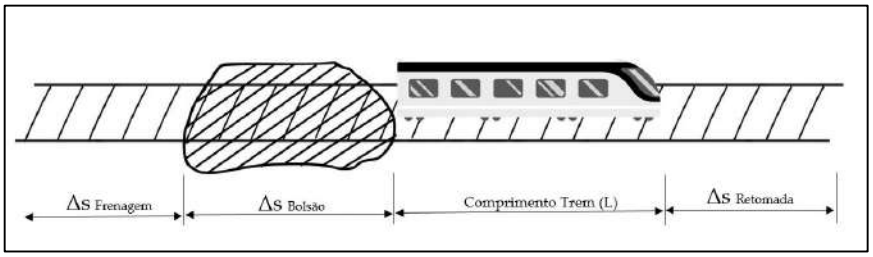


Figura 2: Esquema das etapas de transição para cálculo das perdas (Fonte: Elaborada pelo autor).

A perda total de tempo foi estimada pela seguinte expressão:

$$Perda\ Total = T_{VMA} - T_{restrição} + P_{frenagem} + P_{retomada} \quad (1)$$

onde:
T_{VMA} – corresponde ao tempo de percurso no trecho sem restrição;
$T_{restrição}$ – é o tempo de percurso no mesmo trecho sob a velocidade limitada;
$P_{frenagem}$ – representa o tempo adicional necessário para reduzir até a velocidade imposta;
$P_{retomada}$ – corresponde ao tempo adicional para retomar a VMA após a transposição do bolsão.

As etapas necessárias à aplicação do procedimento são descritas a seguir e encontram-se igualmente representadas na Figura 3, que apresenta o fluxograma metodológico do processo de análise.

1. Identificação dos bolsões de lama nos Quadros de Restrição de Velocidade (QRV) que contêm sua localização e extensão;
2. Definição dos parâmetros de circulação;
3. Aplicação das equações de movimento para cada etapa;
4. Estimativa da perda total de tempo por ocorrência;
5. Consolidação dos resultados por ramal.

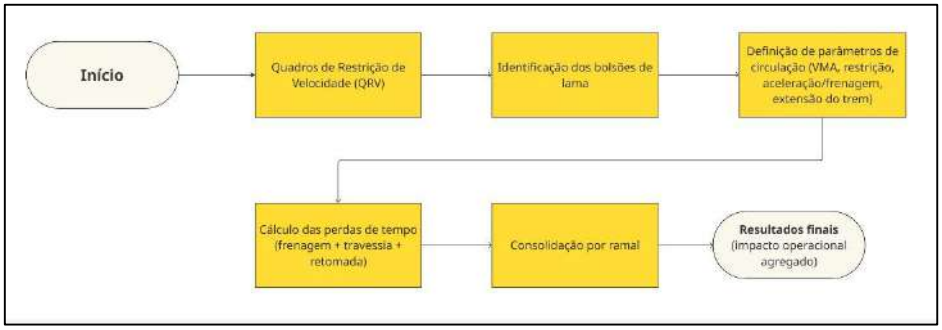


Figura 3: Fluxograma do procedimento para estimativa do impacto operacional dos bolsões de lama

Dessa forma, a metodologia desenvolvida se apresenta como uma ferramenta de aplicação prática, simples e replicável em diferentes contextos ferroviários, desde que disponíveis dados de QRV e especificações básicas do material rodante.

3. PROCEDIMENTO DESENVOLVIDO E APLICAÇÃO

Com a metodologia estruturada, partiu-se para sua aplicação prática, tomando como base os dados reais da operação ferroviária da Supervia. Foram utilizados os dados dos Quadros de Restrição de Velocidade (QRV) referente ao período de agosto de 2022 até outubro de 2023, encaminhados mensalmente pela Concessionária à agência reguladora. Esses dados permitiram identificar a localização e extensão dos bolsões de lama na via permanente. Com base nesse levantamento, foram selecionados apenas os trechos impactados por essa intercorrência específica, desconsiderando outros tipos de anomalias. A partir desse recorte, foi possível quantificar os impactos temporais na operação ferroviária, associando os dados empíricos às premissas adotadas no estudo.

Considerando a diversidade da frota em operação, composta por sete séries diferentes de Trens Unidade Elétrica (TUE), definiu-se como padrão para o estudo o modelo de trens da série 3000, por representar cerca de 50% da frota ativa e refletir a realidade predominante da operação. As composições analisadas são formadas por dois TUEs, totalizando oito carros com comprimento total de 176 metros. Com base nas características técnicas desse modelo de trens foram adotados parâmetros fixos para aceleração e frenagem, necessários para os cálculos de distâncias e tempos de transição nos trechos afetados pelos bolsões de lama.

Para simular as perdas operacionais, definiu-se como premissas principais: velocidades máximas autorizadas (VMA) de 80 km/h para os ramais de Deodoro, Japeri e Santa Cruz, e de 70 km/h para os ramais de Belford Roxo e Saracuruna; restrição de velocidade de 30 km/h para todos os trechos impactados; e pontos específicos para início da frenagem e retomada da VMA, calculados com base na equação de Torricelli. Considerou-se, ainda, que a retomada da aceleração só ocorre após a completa saída da composição do bolsão de lama, com retomada progressiva da velocidade. Esses parâmetros permitiram estimar as perdas de tempo em cada trecho afetado e, por extensão, o impacto agregado sobre a eficiência da operação ferroviária.

4. RESULTADOS

A aplicação do modelo proposto sobre os dados operacionais da Supervia permitiu quantificar os impactos provocados pelos bolsões de lama na eficiência do sistema ferroviário. A aplicação do procedimento descrito na seção anterior foi realizada de forma sistemática sobre cada ocorrência identificada nos Quadros de Restrição de Velocidade (QRV). Para cada bolsão de lama, foram considerados os parâmetros operacionais definidos e aplicadas as equações de movimento que permitiram estimar as perdas de tempo associadas às etapas de frenagem, travessia e retomada. A consolidação desses resultados, por linha e por ramal, permitiu chegar às médias apresentadas a seguir.

Entre agosto de 2022 e outubro de 2023, foram identificados, em média, mais de 50 bolsões de lama ativos em todo o sistema, totalizando dezenas de ocorrências distribuídas nos principais ramais da malha. Dentre os ramais avaliados, destacam-se Santa Cruz e Japeri como os mais comprometidos, com médias superiores a 17 e 13 bolsões por linha, respectivamente, conforme a Tabela 1. No entanto, quando observada a extensão relativa afetada, os ramais de Deodoro e Saracuruna apresentam a maior proporção de via comprometida por esse tipo de inconformidade.

Tabela 1: Extensão média dos bolsões em relação à extensão nominal dos ramais (Fonte: Elaborada pelo autor)

Ramal	Extensão Total Ramal (km)	Quantidade Média de Bolsões (un)		Média da Extensão Total/Bolsões (km)		Média da Extensão Total/Bolsões (%)	
		Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
Deodoro	22,60	4	2	1,62	0,98	7,2%	4,3%
Japeri	61,40	8	5	3,47	2,35	5,7%	3,8%
Santa Cruz	55,00	8	9	2,94	2,72	5,3%	4,9%
Belford Roxo	32,90	4	3	1,02	0,99	3,1%	3,0%
Saracuruna	34,20	5	3	2,93	1,45	8,6%	4,2%

A partir do cruzamento entre os QRV e as características técnicas do material rodante, foi possível estimar a perda média diária de tempo de viagem enfrentada pelos usuários em cada ramal, apresentado na Tabela 2. Nos casos mais críticos, como os ramais Santa Cruz e Japeri, os passageiros podem acumular perdas superiores a 5 horas mensais apenas em função das restrições causadas pelos bolsões de lama. Mesmo ramais com extensão menor, como o de Saracuruna, apresentaram perdas mensais superiores a 3 horas por usuário, o que evidencia o impacto direto na experiência do passageiro, especialmente em um sistema com perfil pendular e alta dependência para deslocamentos diários.

Tabela 2: Perda média diária de tempo de viagem por ramal (Fonte: Elaborada pelo autor).

Ramal	Perda média diária (min)	Perda média mensal (h)
Deodoro	6,12	2,24
Japeri	12,87	4,72
Santa Cruz	14,22	5,21
Belford Roxo	5,20	1,91
Saracuruna	8,57	3,14

Essas ocorrências resultam diretamente em perdas operacionais expressivas, principalmente pela necessidade de impor restrições de velocidade nos trechos afetados. O impacto mais evidente é o aumento do tempo programado de viagem, que, nos ramais de maior extensão, pode ultrapassar 30 minutos em relação aos tempos observados em 2019.

Esse aumento é reflexo da degradação da via permanente e da imposição de sucessivas limitações operacionais para garantir a segurança. Como exemplo, no ramal Santa Cruz, foi verificado um acréscimo de até 38 minutos no tempo de percurso entre 2019 e 2023, configurando um quadro de deterioração significativa da eficiência do sistema. Esse cenário também compromete a regularidade da operação e a confiabilidade percebida pelos passageiros.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um procedimento de análise operacional que se revelou simples, eficaz e aplicável às condições reais da operação ferroviária de passageiros. A partir da análise de dados empíricos, a metodologia demonstrou capacidade de estimar as perdas de desempenho associadas à presença de bolsões de lama, oferecendo resultados consistentes e alinhados à experiência de campo observada na Supervia.

Com estrutura flexível e abordagem baseada em parâmetros operacionais padronizados, o procedimento permite sua aplicação em diferentes ramais e contextos, viabilizando uma avaliação abrangente dos impactos causados por essa anomalia. Ao oferecer subsídios objetivos para o diagnóstico da via permanente e o planejamento de ações corretivas e preventivas, a metodologia contribui para o avanço técnico na gestão da infraestrutura ferroviária, com foco na melhoria contínua da eficiência operacional. Além disso, o estudo fornece uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, capaz de direcionar intervenções de manutenção e estratégias de operação em sistemas ferroviários de passageiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGETRANSP (2024). Relatório Mensal de Atividades – Janeiro de 2024. Relatório Técnico. Disponível em: https://www2.agetransp.rj.gov.br/operacao-servicos/relatorio-de-atividades. (Acesso em: 02/07/2025).

Castello Branco, J. E. S.; Ferreira, R. (2002). *Tratado de Estradas de Ferro Vol. II – Prevenção e Investigação de Descarrilamentos.* 1ª ed. Editora Reflexus Estúdio de Produção Gráfica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Coimbra, M. V. (2008). *Modos de Falha dos Componentes da Via Permanente Ferroviária e Seus Efeitos no Meio Ambiente*. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=116099 (acesso em 06/07/2025)

Indraratna, B.; Nimbalkar, S. S.; Tennakoon, N. (2010). *The Behaviour of Ballasted Track Foundations: Track Drainage and Geosynthetic Reinforcement*. GeoFlorida 2010 Conference on Advances in Analysis, Modeling & Design, Florida, USA. DOI; 10.1061/41095(365)241

Merheb, A. H. M. (2014). Análise Mecânica do Lastro Ferroviário por Meio de Ensaios Triaxiais Cíclicos. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP, Brasil. DOI: https://doi.org/10.11606/D.3.2014.tde-20052015-160602

Rangel, G. W. A. (2017). *Um Método para a Estimativa da Deflexão do Pavimento Ferroviário Lastreado*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: http://hdl.handle.net/11422/9808 (acesso em 06/07/2025)

Rosa, A. C. (2020). *Análise Mecanística do Pavimento Ferroviário de um Trecho da Ferrovia Centro-Atlântica.* Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18797.41441

Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994). Track Geotechnology And Substructure Management. 1 ed. London: Thomas Telford Services Ltd.

Rafael Lanunci da Silva Teixeira Poubel (r.poubel@gmail.com)
Agência Reguladora de Serviços Públicos Concedidos de Transportes Aquaviários, Ferroviários, Metroviários e de Rodovias do Estado do Rio de Janeiro - AGETRANSP, Av. Pres. Vargas, 1.100 - Centro, Rio de Janeiro – RJ
José Luiz Lopes Teixeira Filho (jluiztx2015@gmail.com)
Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, MG - Brasil
Hostilio Xavier Ratton Neto (hostilio@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes. Av. Horácio Macedo, 2030, Prédio do Centro de Tecnologia - Ilha do Fundão - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

EFFECTS OF HIGHER-SPEED RAIL INTRODUCTION ON TRACK DEGRADATION IN A FORMER FREIGHT-ONLY CORRIDOR: A CASE STUDY OF AN AMERICAN RAILROAD

José Gustavo Venâncio da Silva Ramos[1, 2], **Arthur de Oliveira Lima**[2], **Marcus Scott Dersch**[2], **John Riley Edwards**[2]
[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, [2]University of Illinois at Urbana-Champaign

ABSTRACT
This paper presents a comprehensive field study of track geometry degradation along a 64-km freight corridor that began mixed Higher-Speed Rail (HrSR) operations in September-2023. The research question was whether the introduction of HrSR service affected track degradation in a former freight-only corridor. Using a cross-correlation method to identify degradation cycles on 80.5-m segments, linear degradation rates (standard deviation of vertical profile) were computed over 2.5 years of data. A four-way ANOVA assessed the effects of HrSR introduction, track structure, curvature, and maximum allowable speed, while Tukey-Kramer post-hoc tests examined pairwise differences. Results showed significant reductions in degradation rates post-HrSR introduction (–33% to –60%), higher legacy degradation in former sidings, increasing rates with curvature degree, and faster degradation in low-speed zones. These findings inform targeted maintenance strategies in mixed-traffic corridors and reflect not only the introduction of HrSR service but also the accompanying stricter maintenance and operational practices.

1. INTRODUCTION

In the United States, the Federal Railroad Administration (FRA) (2009) classifies corridors with maximum speeds of 145 km/h or higher into Emerging (145-177 km/h), Regional (177-241 km/h), and Express (≥ 241 km/h) High-Speed Rail (HSR) categories, with the term Higher-Speed Rail (HrSR) typically used for the first two (Peterman *et al*., 2013). Since the 2009 American Recovery and Reinvestment Act (ARRA) and the 2021 Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA), significant federal funding has spurred incremental upgrades of existing freight infrastructure rather than construction of new dedicated passenger lines. Mixed-traffic service—where faster, lighter Higher-Speed Trains (HrST) share tracks with slower, heavier freight trains—introduces increased dynamic loads and tighter geometry tolerances (Saat and Barkan, 2013). To meet these demands, shared-use corridors often employ concrete sleepers for their superior durability and load distribution, although their adoption in North America remains limited compared to traditional wooden ties. Currently, literature lacks research regarding the track degradation changes after the introduction of HrSR service on previously freight-only corridors.

Track-geometry degradation is usually monitored via geometric parameters, as vertical-profile measurements—typically every 1 ft (~ 0.3 m)—with the FRA setting allowable deviations (e.g., 5.7 cm for Class 3 and 2.54 cm for Class 6 track) (FRA, 2018). Summarizing these measurements by their standard deviation over inspection lengths provides a widely used indicator of overall track condition and enables estimation of degradation rates for maintenance planning (Ramos, 2024). In this context, this study examined a 64-km southeastern corridor upgraded in September 2023 for mixed HrSR operations. Building on Ramos (2024), we used cross-correlation of successive profile runs to define degradation cycles, computed linear rates over 80.5 m inspection windows, and applied a four-way ANOVA to test the effects of HrSR introduction, track structure, curvature, and maximum allowable speed. Because HrSR operations typically entail more stringent maintenance and operational standards, the observed effects are linked both to the HrST introduction and to these enhanced practices.

2. METHODS

2.1. Field site overview and data collection

The study corridor comprises 64 route kilometers of double track on a U.S. Class II (Surface Transportation Board classification) freight railroad. Originally constructed over 100 years ago, the corridor supported freight-only service from the 1970s until HrSR service began in September 2023. Track upgrades included full double-tracking, and minor curve adjustments. The track is built with concrete sleepers, except for one timber-tie bridge. Pre-existing old passing sidings and second main track (Old 2MT/Siding) were leveraged for the double track construction, in addition to sections of newly built track. Monthly tonnage reports estimate ~15 million gross tons (MGT) per track per year. Vertical profile inspections were conducted at approximately 0.3 m intervals and recorded as the vertical displacement at the midpoint of an 18.9 m chord, between August 2022 and February 2025 (12 months pre-HrST; 18 months post-HrST). Grade crossings, turnouts and

bridges were excluded at a 160.9 m resolution to avoid transition effects (Rodrigues and Teixeira, 2024; Ramos *et al*., 2025).

2.2. Statistical tests

Degradation rates of standard deviation of profile were obtained using a cross-correlation method based on Ramos (2024). Raw degradation rates exhibited strong right skew (Figure 1a). A Box-Cox transformation ($\lambda = 0.1168$) yielded near-normal distribution (Figure 1b) (Box and Cox, 1964; SciPy, 2025). Then, a four-way ANOVA with Type III sums of squares tested fixed effects of: HrST condition (pre vs. post-introduction); track structure (Old main, Old 2MT/Siding, New main); curvature class (Tangent; < 0.75°; 0.75–1.50°; > 1.50°); and maximum allowable speed (65 or 80 (F), 95 (F), ≤95 (P), 105–127 (P), and 145–177 (P) km/h), where (F) means freight train speed, and (P), passenger train speed.

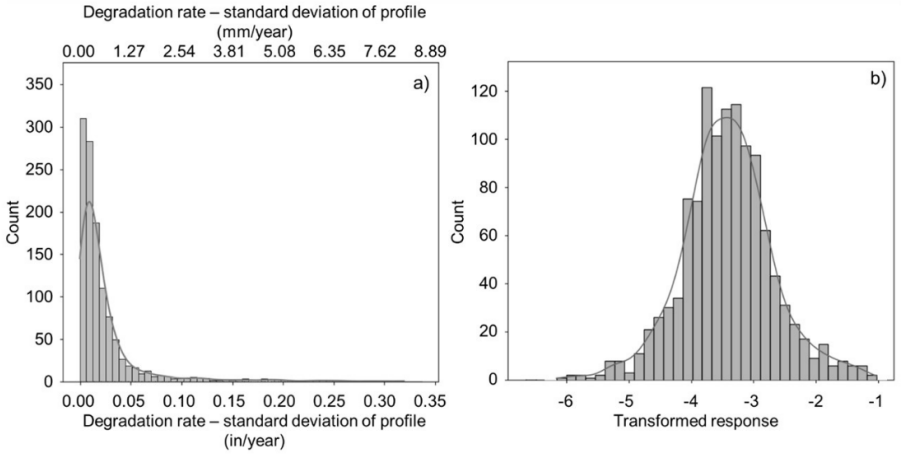


Figure 1: Distribution of track degradation rate: (A) raw data, (B) Box-Cox transformed data

Following the ANOVA, pairwise comparisons were conducted using the Tukey–Kramer procedure, which extends Tukey's Honest Significant Difference (HSD) to accommodate unequal group sizes and controls the family-wise error rate within each set of contrasts. Comparisons were made both among levels of curvature, speed, and track structure within each HrST condition level (pre- vs. post-HrST) and between HrST condition within each level of the other factors. The significance level for all statistical tests was set at 5% ($\alpha = 0.05$). Some segments were measured in both periods. While this implies partial dependency, observations were treated as independent since the focus was on group-level effects, not individual segment trajectories.

3. RESULTS

3.1. ANOVA summary

Table 1 presents the ANOVA results. All main effects were significant (p-value < 0.05). Residual diagnostics (graphs not shown) supported normality and homoscedasticity assumptions.

Table 1: Four-way ANOVA summary for track degradation rate

Source	SS	df	*F*-value	*p*-value	Reject H_0 (*p*-value <0.05)
Intercept	779.82	1	1,720.49	6.09×10^{-231}	Yes
HrST condition	3.96	1	8.74	3.18×10^{-3}	Yes
Maximum allowable speed	1,188.64	4	655.61	3.30×10^{-295}	Yes
Track structure	18.80	2	20.73	1.42×10^{-9}	Yes
Curvature class	18.02	3	13.25	1.65×10^{-8}	Yes
Residual	523.06	1,154	-	-	-

SS: sum of squares, df: degrees of freedom

3.2. Track structure effects

Traffic was assumed to be evenly divided between tracks during the data collection period; however, it is possible that different traffic loads and maintenance practices carried out in the past at each track structure explain different current degradation rates. To assess these differences in general trends, data was divided into track structure, and divided into Pre- and Post-HrST introduction. The degradation rates for each of these conditions are shown in Figure 2.

Old 2MT/Siding segments degraded more than twice as fast as Old and New main tracks, considering medians, both before and after HrST introduction. Tukey-Kramer post-hoc tests (data not shown) confirmed these differences. This legacy effect likely stems from historical under-maintenance and lower traffic volumes on sidings, which led to deeper subgrade and ballast settlement that persists under mixed-traffic loading (Khajehei *et al*., 2022). In contrast, Old and New main tracks exhibit similar rates, likely reflecting the convergence of rapid initial settlement (< 5 years) and long-term ballast degradation (> 30 years) (Rodrigues and Teixeira, 2024).

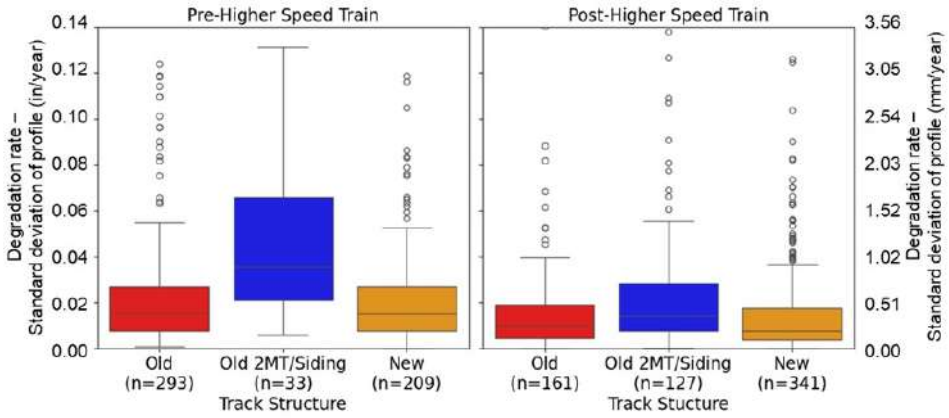


Figure 2: Degradation rates for different track structures, pre- and post-HrST introduction

After the introduction of HrST, degradation rates fell by 33% on the Old track, 60% on the Old 2MT/Siding, and 47% on the New track segments. This decline may be attributable to more effective maintenance, driven by tighter geometry thresholds and a higher potential revenue loss associated with track restrictions under HrSR conditions (Saat and Barkan, 2013). Maintenance records showed that, following HrST introduction, the railroad performed approximately 10.22 km of ballast undercutting—roughly evenly divided between the Old and Old 2MT/Siding segments—and significantly increased tamping activity, which then steadily declined over the final six months of data, supporting enhanced maintenance effectiveness.

3.3. Curvature and speed range effects

Figure 3 illustrates degradation rates across the different curvature ranges. Within the curved track groups (i.e., excluding tangent), there is a general trend for increasing median degradation rate with increasing curvature. Moreover, tangent track exhibited approximately 50% higher median degradation rate than the <0.75° of curve group, although this difference was only marginally significant for pre-HrST. Tangent degradation was statistically similar to that of the 0.75-1.50° group, and approximately half of the >1.50° of curve group, based on median values. These trends are held for the conditions pre- and post-HrST introduction. Additionally, each group (expect for >1.50°) showed statistically different degradation rates after HrST introduction condition, supporting the hypothesis that HrST operation (and improved maintenance) influenced degradation patterns.

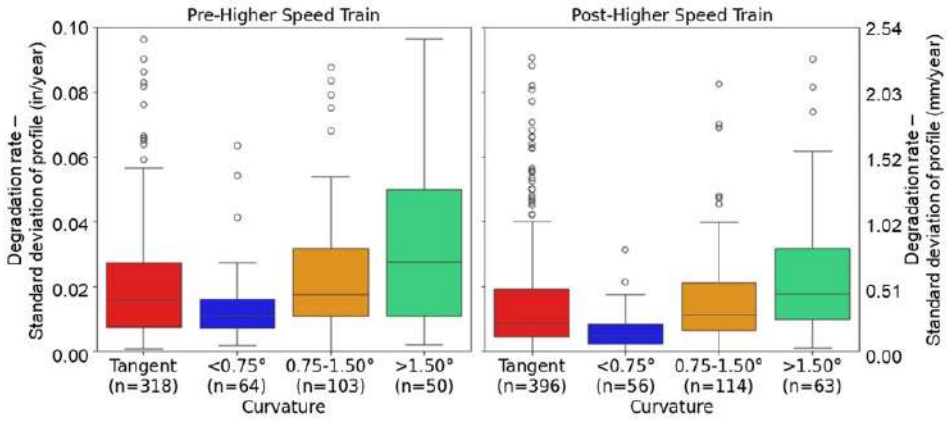


Figure 3: Degradation rates by curvature group, pre- vs. post-HrST

One hypothesis is that, on tangent track, trains induce higher dynamic loads while sharper curves generate higher lateral loads. Under mixed traffic, curves may experience higher differences in load pattern between freight and passenger trains. Hence, for sharper curves, the increased degradation rate due to the lateral forces on curves outweighs that due to vertical dynamic loads on tangent track. Degradation rates were also analyzed across different maximum allowable speed ranges (Figure 4).

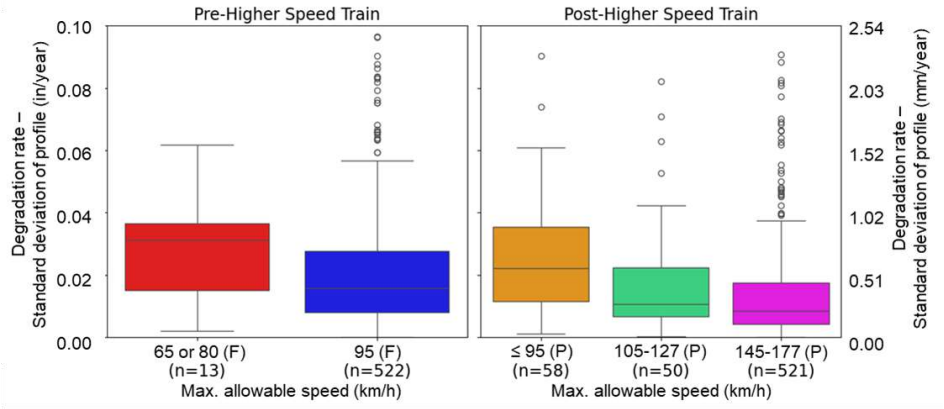


Figure 4: Degradation rates by speed category, pre- vs. post-HrST

From Figure 4, locations with lower maximum allowable speed degraded faster (approximately twice based on median values) than the other locations for both before and after HrST introduction. Navaratnarajah *et al.* (2018), in a laboratory study, found that increasing either load or frequency independently resulted in increased vertical plastic deformation of ballast, suggesting that higher speed zones may degrade faster. However, one hypothesis is that these low-speed segments are located on the sharper curves or at problematic locations with permanent speed restrictions, making them more prone to accelerated degradation. Vale and Lurdes (2013) reported similar results on a Portuguese HSR corridor, where higher speed zones (i.e., 160-220 km/h) showed lower degradations rates. They attributed this to better track structure in these zones resulting in reduced settlements. Guler *et al.* (2011) found that maximum allowable speed has a negative correlation with track degradation rate, arguing that speed is higher in tangents and higher radius sections and lower at high-degree curves, making it a meaningful proxy to represent points on the track where the speed is restricted. Because lower speeds often coincide with sharper curves, some degree of collinearity between speed and curvature factors is unavoidable; this should be considered when interpreting their separate effects.

Finally, because tangent track comprises a larger share of the corridor than curved segments, the number of samples was naturally higher. This may partially explain the greater dispersion and number of outliers observed in tangent boxplots. Similarly, higher-speed ranges included fewer segments compared with lower-speed ones. While this reflects the actual corridor characteristics, it should be considered when extrapolating results to other railways with different curvature or speed distributions.

4. CONCLUSIONS

This study used a cross-correlation–based method to define degradation cycles and calculate linear degradation rates from standard deviations of vertical profile along a 64-km freight corridor before and after introducing higher-speed rail (HrSR) service, and then applied a four-way ANOVA with Tukey-Kramer post-hoc tests to assess the effects of track type/age, HrST presence, curvature, and maximum speed. No significant difference was found between New and Old main tracks, supporting previous findings of similar early and late-stage concrete-tie degradation; by contrast, former sidings degraded more than twice as fast as main tracks regardless of HrST, indicating legacy effects from historical loading and maintenance. Degradation generally increased with curve degree, though tangent segments degraded faster than shallow curves, suggesting dynamic load interactions, and segments with lower allowable speeds degraded faster than higher-speed ones, likely reflecting structural or geometric constraints. Finally, HrST introduction corresponded with reduced degradation rates across all conditions, probably due to more stringent geometry thresholds and intensified maintenance under mixed-traffic operations.

Acknowledgments
This work was supported by the U.S. Department of Transportation (USDOT) Federal Railroad Administration (FRA). The authors received strong support from the US rail industry, including provision of data from at least one major railroad. The material in this paper represents the position of the authors and not necessarily that of sponsors. The authors would like to acknowledge the Federal Institute of Education, Science and Technology of Goias (IFG) for the Ph.D. leave granted to the first author.

REFERENCES

Box, G. E. P.; Cox, D. R. (1964) "An Analysis of Transformations." Journal of the Royal Statistical Society Series B, 26(2), 211–243.

Federal Railroad Administration (2009) Vision for High Speed Rail in America. Washington, D.C., USA, p. 20.

Federal Railroad Administration (2018) "Volume II Track Safety Standards Chapter 1 Track Safety Standards Classes 1 Through 5." In Track and Rail and Infrastructure Integrity Compliance Manual, U.S. Department of Transportation – Federal Railroad Administration, Washington, DC, USA.

Federal Railroad Administration (2025) Infrastructure Investment and Jobs Act Information from FRA. U.S. Department of Transportation – Federal Railroad Administration. https://railroads.dot.gov/IIJA?utm_source=chatgpt.com. Accessed Jun. 16, 2025.

Khajehei, H.; Ahmadi, A.; Soleimanmeigouni, I.; Haddadzade, M.; Nissen, A.; Latifi Jebelli, M. J. (2022) "Prediction of Track Geometry Degradation Using Artificial Neural Network: A Case Study." International Journal of Rail Transportation, 10(1), 24–43.

Peterman, D. R.; Frittelli, J.; Mallett, W. J. (2013) The Development of High Speed Rail in the United States: Issues and Recent Events. Congressional Research Service Publication R42584.

Rodrigues, P.; Teixeira, P. F. (2024) "Influence of Ballast and Railway Substructure on the Degradation of Local Geometry Defects." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 238(7), 814–826.

Ramos, J. A. V. da S. (2024) Railway Track Condition Change Detection: A Data Driven Approach to Track Geometry and Component Degradation Modeling. M.S. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.

Ramos, J. A. V. da S.; de O. Lima, A.; Dersch, M. S.; Edwards, J. R. (2025) "Stochastic Investigation of the Relationship between Track Geometry and Ballast Degradation Rates." Transportation Geotechnics, 51, 101533.

Saat, M. R., and C. P. L. Barkan. (2013). Investigating technical challenges and research needs related to shared corridors for high-speed passenger and railroad freight operations. *U.S. Department of Transportation – Federal Railroad Administration*, Washington, DC, p. 133.

SciPy v1.15.2 Manual (2025) "scipy.stats.boxcox." https://docs.scipy.org/doc/scipy-1.15.2/reference/generated/scipy.stats.boxcox.html. Accessed May 23, 2025.

Zarembski, A. M.; Patel, P. (2010) "Estimating Maintenance Costs for Mixed Higher Speed Passenger and Freight Rail Corridors." In Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference, Urbana, IL, USA.

José Gustavo Venâncio da Silva Ramos (jose.ramos@ifg.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia, Rua 75, nº 46, Centro, Goiânia, Goiás, Brasil.
Rail Transportation and Engineering Center – RailTEC, Department of Civil and Environmental Engineering, The Grainger College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1240 Newmark Civil Engineering Laboratory, MC-250, 205 N. Mathews Ave., Urbana, IL 61801
Arthur de Oliveira Lima (aolima@illinois.edu)
Rail Transportation and Engineering Center – RailTEC, Department of Civil and Environmental Engineering, The Grainger College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1240 Newmark Civil Engineering Laboratory, MC-250, 205 N. Mathews Ave., Urbana, IL 61801
Marcus Scott Dersch (mdersch2@illinois.edu)
Rail Transportation and Engineering Center – RailTEC, Department of Civil and Environmental Engineering, The Grainger College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1240 Newmark Civil Engineering Laboratory, MC-250, 205 N. Mathews Ave., Urbana, IL 61801
John Riley Edwards (jedward2@illinois.edu)
Rail Transportation and Engineering Center – RailTEC, Department of Civil and Environmental Engineering, The Grainger College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1243 Newmark Civil Engineering Laboratory, MC-250, 205 N. Mathews Ave., Urbana, IL 61801

IMM-TRACK - MODELO INTEGRADO DE AVALIAÇÃO E MANUTENÇÃO DE FERROVIAS

José João Pires [1], Guilherme Castro [1], Marta Pereira da Luz [2]
[1]Egis Engenharia e Consultoria, [2] PUC-GO

RESUMO
A fim de avaliar a evolução da qualidade estrutural/geométrica das ferrovias ao longo do tempo, é necessário entender o seu comportamento em função do tráfego ou mesmo, das manutenções durante a operação. Uma avaliação que contemple os aspectos geométricos/estruturais, incluindo a sua manutenção é de vital importância para profissionais que atuam nas áreas técnicas e de gestão. O objetivo do trabalho é apresentar um modelo numérico integrado (IMM-TRACK) que forneça resultados estruturais/geométricos ao longo do tempo por meio de metodologia que contemple a coleta/avaliação de dados, desenvolvimento do modelo e avaliação dos resultados relacionados a um estudo de diferentes espaçamentos entre dormentes (0,60 m e 0,65 m). Em geral, no caso de um espaçamento maior, os estudos indicaram um aumento discreto nas cargas, tensões e deformações considerando o acúmulo das cargas e as manutenções ao longo do tempo.

1. INTRODUÇÃO

A fim de avaliar quanto a evolução em termos de qualidade estrutural e geométrica das vias férreas ao longo do tempo, é necessário entender o seu comportamento em função das ocorrências em termos de tráfego ou mesmo, das necessidades de manutenção. O desempenho da via resulta de uma interação complexa entre os elementos da grade e camadas granulares em resposta aos esforços impostos pelo material rodante. Os fatores cruciais que afetam o seu comportamento mecânico são aqueles relacionados as condições operacionais, além das condições da infraestrutura/superestrutura, incluindo questões relacionadas a dormentação (Selig e Waters, 1994). Ainda, importante aspecto refere-se à degradação dos componentes devido ao tráfego e manutenções. *Grosso modo*, a perda de qualidade da via ocorre normalmente como consequência da sua degradação devido às condições estruturais, geométricas e operacionais combinadas. Assim, a fim de realizar uma avaliação que leve em consideração tais aspectos é necessária uma ferramenta que considere tais aspectos ao longo do tempo. O objetivo do artigo é apresentar uma ferramenta numérica (IMM-TRACK) a fornecer respostas geométricas/estruturais em um cenário de alta carga (*Heavy Haul*) referente a avaliação quanto ao espaçamento entre dormentes para fins de otimização, levando-se em consideração condições operacionais e de manutenção.

2. METODOLOGIA

A metodologia se dividiu em fases cujos resultados gerais são apresentados a seguir. Estas, consideraram a avaliação da bibliografia incluindo equacionamentos gerais do modelo e obtenção de dados em termos de via permanente relacionados às ferrovias *Heavy Haul*. Por conseguinte, realizou-se a adequação matemática do modelo numérico e por fim, discussão dos resultados e definição das conclusões da avaliação.

3. MODELO DE DEGRADAÇÃO DA VIA (INTEGRATED MAINTENANCE MODEL-TRACK)

A fim de realizar as avaliações referentes as respostas estruturais e geométricas da via ao longo do tempo, foi desenvolvida a ferramenta numérica IMM-TRACK. Esta, utiliza as condições iniciais da via para calcular as variáveis estruturais e geométrica ao longo do tempo que causam irregularidades na mesma e por conseguinte, as necessidades de manutenções. O aspecto integrado do modelo se deve à relação entre os aspectos estruturais e geométricos à manutenção etc. Nesta versão, o modelo se baseou em Shimatake (1997) e Pires (2016). Em geral, os principais aspectos do modelo relativos ao seu cálculo e consequente análise são os seguintes:

- Perfil estrutural composto por trilhos, dormentes de concreto, lastro e subleito;
- Time-step de simulação de 01 mês com um tempo total de 360 meses (30 anos);
- Cálculo e atualização dos parâmetros estruturais e geométricos da via ao longo do tempo;
- Degradação dos componentes da via (lastro e trilhos) de forma acumulativa;
- Avaliação da variação geométrica da via ao longo do tempo;
- Consideração das atividades de manutenção ao longo do tempo (socaria, esmerilhamento e substituição);
- Possibilidade de determinação da eficiência de cada manutenção e avaliação de diferentes estratégias;

O modelo usa a abordagem dinâmica de sistema, podendo ser entendido como uma abordagem para o comportamento não linear de sistemas complexos, ou seja, uso de ciclos de feedback e organização hierárquica ao longo do tempo. Nesta abordagem, a relação entre as causas e os resultados em um sistema é avaliada por meio de conexões, podendo ser representadas por diagramas de *loop* causais. Por exemplo, a carga dinâmica do trem afeta as tensões nos componentes da via com respostas em termos de deformações gerais, principalmente no material granular. Estas deformações provocam irregularidades na via que influenciam

diretamente as cargas sobre os trilhos a serem consideradas no próximo *loop* de cálculo de forma iterativa. Dessa forma, com a evolução das deformações e da qualidade geométrica da via, em algum momento, serão necessárias ações de manutenção. Logo, nos meses os quais o modelo indicar a necessidade de manutenção, esta é levada em consideração nos cálculos em termos de recuperação da qualidade geométrica o que de fato, ocasionará uma melhora nas características mecânicas/estruturais. Assim, a importância do modelo está também relacionada à previsão das evoluções quanto aos aspectos estruturais e geométricos da via ao longo do tempo e previsões de manutenção. Em geral, o objetivo do modelo é fornecer respostas em termos de condições da via e necessidades de manutenção visando a otimização do planejamento das manutenções. De forma geral, o modelo contempla uma série de equações que podem ser visualizadas em Pires (2016).

Estrutura geral - o modelo está esquematicamente dividido em cinco módulos: condição inicial, diretrizes estruturais e geométricas, materiais e diretrizes de manutenção. O cálculo de cada tem relação específica com os demais ao longo do tempo. A Figura1 exibe a relação entre os módulos do modelo.

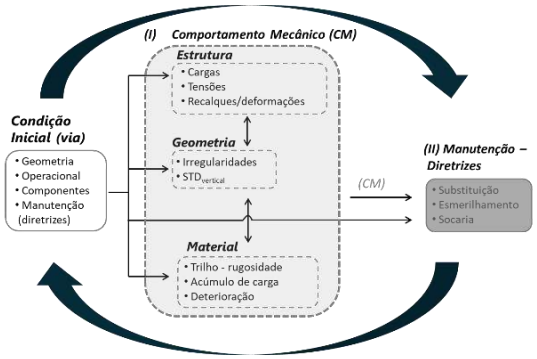


Figura 1: Diagrama Geral do modelo IMM-TRACK

Inputs – referem-se a aspectos operacionais, geométricos da via/componentes e de manutenção, sendo utilizados para calcular as respostas estruturais (cargas, tensões e deformações) e geométricas (Tabela 1).

Tabela 1: Principais dados de entrada considerados no modelo.

Tipos de dados	Principais dados de entrada
Características Operacionais	Tráfego por dia, velocidade média, carregamento estático, número de vagões
Material rodante	Peso bruto de vagões e locomotivas, raio da roda, centro de gravidade etc.
Componentes da via	• Trilho – momento de inércia (I), módulo de elasticidade (E), tensões de escoamento, módulo das seções, coeficientes para rugosidade inicial e crescimento das rugosidades. • Dormentes – dimensões gerais, espaçamentos e caracaterísticas de flexão. • Lastro – espessura, rigidez, degradação inicial e ao longo do tempo. • Subleito – módulo de reação (K).
Geometria da via	Raio da via, bitola, superelevação, empenos e STD (*Standard Deviation*) da irregularidade vertical.
Manutenção - desempenho	• Socaria – taxa de eficiência, deterioração do lastro devido a socaria. • Esmerilhamento – remoção de rugosidade superficial do trilho.
Manutenção - Diretrizes	Valor em MTBT (Milhões de Toneladas Brutas Transportadas) para realização das manutenções.
Outros	Comprimento da via, módulo de via, coeficiente de vibração e condição inicial dos componentes.

Cálculo dos aspectos estruturais e geométricos – os parâmetros estruturais e geométricos são calculados tendo em conta a execução de manutenções. Assim, em um *loop* inicial de cálculo, a condição mecânica é obtida através do cálculo das cargas dinâmicas e o seu devido Coeficiente de Impacto Dinâmico (CID) além da determinação das respostas estruturais em termos de tensões e deformações no lastro e subleito. Por conseguinte, tais deformações provocam recalques e consequentemente, perda de qualidade geométrica na via (irregularidades da via) que são calculadas em termos de desvio padrão ao longo da simulação. Assim, o valor da condição geométrica ao fim de um período (mês) é utilizado no cálculo da carga dinâmica do próximo *loop* de cálculo (mensal) e assim sucessivamente. A Figura 2 mostra o diagrama causal da irregularidade vertical da via considerada e o diagrama de *loop* para alguns dos parâmetros calculados.

Degradação - no cálculo mensal das respostas estruturais/geométricas, a degradação do lastro e dos trilhos é calculada de forma cumulativa em função da tonelagem transportada e ações de manutenção a recuperar parte da perda geométrica da via por rugosidade (trilho) e deterioração/degradação (lastro).

Manutenção da via - A variação dos parâmetros estruturais e geométricos provoca alterações na qualidade da via exigindo desta forma, manutenções. No modelo, estas são relativas a socaria (lastro) e esmerilhamento (trilho). Neste modelo, as ações de manutenção são realizadas sob o viés preventivo (ativo) caracterizando-se pela realização periódica de uma ação após a obtenção de um valor limite de MTBT pré-definido.

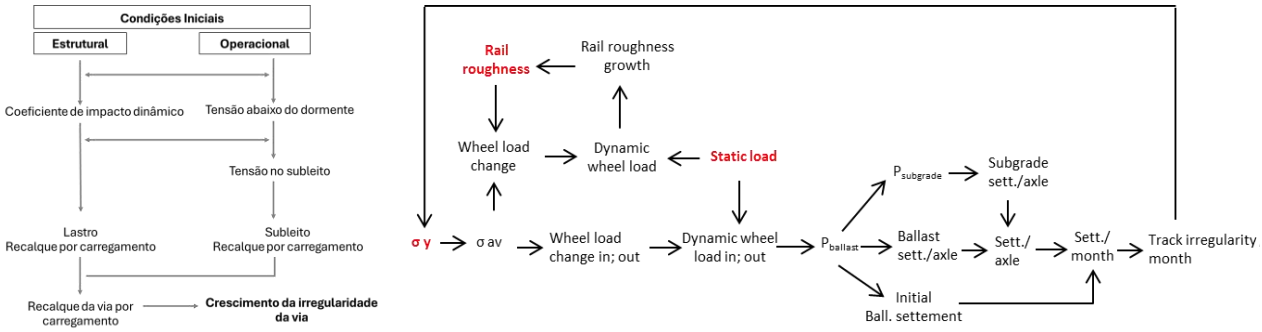


Figura 2: Diagramas de fluxo para o cálculo dos recalques da via e irregularidade vertical, e das iterações para o cálculo das principais variáveis referentes aos aspectos geométricos e estruturais.

4. ESTUDO DE CASO – AUMENTO DE ESPAÇAMENTO ENTRE DORMENTES

Neste estudo, foram avaliados dois casos, considerando diferentes espaçamentos entre dormentes (0,60 e 0,65 m) permanecendo todos os outros aspectos operacionais, geométricos e de manutenção iguais. Em geral, os *inputs* adotados na avaliação são aqueles em sua grande maioria considerados nas ferrovias nacionais de carga.

Inputs - condições operacionais e geométricas – aspectos gerais de operação/geometria a representar a condição da via projetada (nova) por meio do valor de STD e da irregularidade vertical (Tabela 2).

Tabela 2: Características operacionais e geométricas consideradas nas simulações.

Condições operacionais	Valores
Tráfego	08 trens/dia
Número de vagões	84 vagões
Peso (vagões/locomotivas)	25/195 ton
Velocidade Operacional	60 Km/h
Carga/eixo	32,5 ton/eixo
Raio da roda	482,6 mm
Centro de gravidade (veículo)	1,5 m

Condições Geométricas	Valor
Bitola	1600 mm
Raio	tangente
Superelevação	0,0 mm
STD – Vertical inicial	0,3 mm (*)

(*) valor relacionado a uma condição adequada para receber cargas da magnitude de 32,5 ton/eixo.

Condições Estruturais e Geotécnicas – quanto ao trilho, foi considerado o UIC 60 (*Hardening*) e para o dormente, o monobloco de concreto. Referente a degradação do lastro, de forma inicial, o valor de 0,1 (10% de degradação) foi considerado. Quanto ao subleito, considerou-se para representar a sua qualidade o módulo de reação de 100 MN/m^3 (K30), sendo este valor indicativo de subleito adequado (Tabela 3).

Tabela 3: Características operacionais, geométricas e geotécnicas consideradas nas simulações.

Característica do trilho	Valor
Ix (momento de inércia) – eixo x	3038,3 cm^4
Iy (momento de inércia) – eixo y	512,3 cm^4
Peso do trilho	60,21 kg/m
Área da seção	76,7 cm^2
Tensões de tração	1500 kgf/cm^2
Tensões de escoamento	840 MPa
Módulo da base da seção	333,60 cm^3
Rugosidade inicial	0,3 mm

Características do dormente	Valor
Dimensões	280x30x25 cm
Espaçamento (dormentes)	0,60 / 0,65 m
Resistência a flexão (+) / (-)	42,53 / 29,07 kN.m
Caract. do lastro/fundação	Valores
Kv (Coef. Vibração - lastro)	0.01 m/s^2/mm/(Km/h)
Coeficiente elasticidade - lastro	200 MN/m
Espessura do lastro	30 cm
Deterioração inicial - lastro	0,1
Módulo de reação -fundação (K_{30})	100 MN/m^3

Manutenção – foram consideradas ações de socaria e esmerilhamento sob a estratégia de manutenção ativa (valor fixo de MTBT para as realizações). A tabela 4 apresenta os dados de entrada referentes as manutenções.

Tabela 4: Características em termos de manutenção consideradas nas simulações.

Condição - Socaria	Valores
Taxa (eficiência) - recuperação	90%

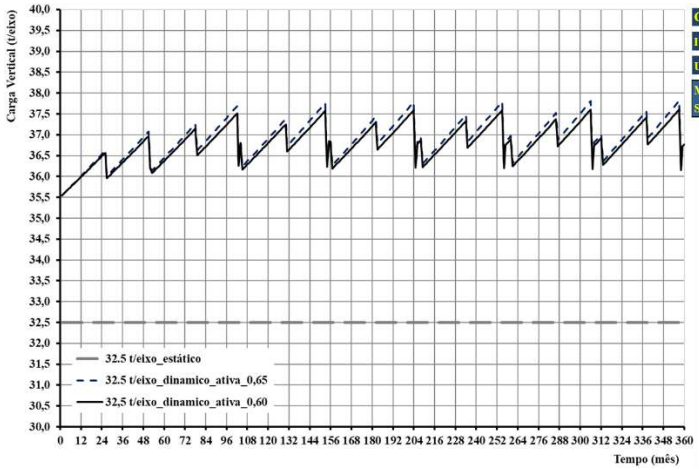
Condição - Esmerilhamento	Valores
Quantidade de remoção	0,5 mm

Taxa de degradação - cada soca	2%
Realização da socaria	Cada 100 MTBT

Limite de rugosidade	0,7 mm
Rugosidade inicial (nova)	0,2 mm
Realização do esmerilhamento	Cada 50 MTBT

5. RESULTADOS OBTIDOS

A simulações realizadas por meio do IMM-TRACK referem-se a dois casos com condições tais quais indicadas no capítulo 4 e tendo somente como diferença, o espaçamento entre dormentes (0,60 e 0,65 m). Os resultados são apresentados em termos de parâmetros estruturais (cargas, tensões e deformações) tendo a sua variação ao longo do período de simulação também avaliada por meio de uma avaliação estatística (STD). Em geral, os resultados indicam aumento dos valores dos parâmetros estruturais em função das cargas, degradações de materiais e perda da qualidade geométrica a cada loop de cálculo (mês). Por outro lado, as manutenções fornecem recuperação do comportamento mecânico (queda dos valores dos parâmetros estruturais) através da retificação da qualidade dos trilhos (esmerilhamento) e recuperação parcial da geometria da via (socaria). Assim, as cargas dinâmicas foram calculadas a partir das condições da via (Figura 3) para os casos avaliados.



Carga vertical				
Item	Ativo_0,60	Ativo_0,65	(Δ 0,60_0,65)	(Δ 0,60_0,65)
Unidade	t/eixo	t/eixo	%	t/eixo
Média	36,82	36,94	0,3	0,12
STD	0,35	0,38	10,1	

Figura 3: Valores de carga vertical ao longo do período de simulação considerando diferentes espaçamentos.

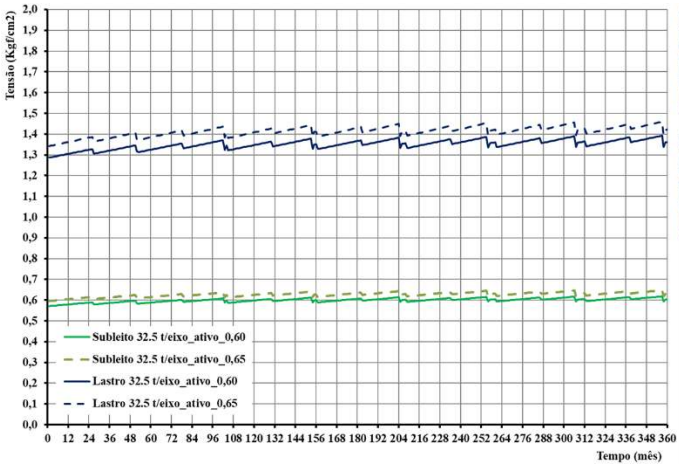
Os resultados indicam uma baixa diferença entre os valores das cargas obtidas. Para o espaçamento de 0,65 m, obtêm-se um aumento de carga da ordem 0,3% na média dos valores mensais e analisando-se a amplitude dos valores, observa-se que a consideração de espaçamento de 0,65 m ampliaria muito pouco o espectro de variação das cargas (área entre a linha de carga estática, 32,5 t/eixo e a linha de variação das cargas dinâmicas). A partir da definição das cargas verticais atuantes na estrutura da via férrea, foram determinadas as tensões tanto no lastro como na fundação (subleito). A Figura 4 apresenta os valores das tensões determinadas.

Referente às tensões no lastro, estas no caso do espaçamento de 0,65 m foram levemente superiores àqueles referentes ao espaçamento de 0,60 m, tendo média de valores mensais de cerca de 4,6% maior, sendo 1,35 Kgf/cm^2 (espaçamento de 0,60 cm) e 1,42 Kgf/cm^2 (espaçamento de 0,65 cm). Quanto as tensões no subleito, estas, mostraram um aumento de cerca de 4,6% no caso do espaçamento de 0,65 m. A média dos valores no caso do espaçamento de 0,60 m foi de aproximadamente 0,60 Kgf/cm^2 enquanto, no caso do espaçamento de 0,65 m, o valor médio foi de cerca de 0,63 Kgf/cm^2 (Δ=0,03 Kgf/cm^2). A partir das tensões, as deformações/recalques totais foram calculadas para os cenários simulados (Figura 5).

Comparando-se os valores das simulações, observa-se uma diferença na média dos valores de cerca de 14%, obtendo uma diferença do valor médio entre os casos avaliados de cerca de 0,026 mm. Quanto aos valores máximos, no caso do espaçamento de 0,60 m, foram obtidos valores de recalques máximos da ordem de 15,0 mm enquanto para o espaçamento dos dormentes com 0,65 m, este valor seria da ordem de cerca de 16,5 mm. Em geral, os resultados indicam a pouca diferença em termos estruturais quando da comparação dos espaçamentos entre dormente de 0,60 m e 0,65 m. Entretanto, alerta-se quanto aos seguintes:

- Os resultados são altamente influenciados pela estratégia de manutenção. Neste estudo, as manutenções são realizadas quando atingido o valor de 100 MTBT (socaria) e 50 MTBT (esmerilhamento). Entretanto, sob a ótica da estratégia reativa, onde são realizadas as manutenções quando do alcance de algum parâmetro pré-estabelecido (ex. STD da irregularidade vertical para a socaria), os resultados tendem a ser mais divergentes.
- Outro aspecto a ser considerados refere-se ao fato de que aumentando-se o espaçamento entre os dormentes, aumentam- se cargas, tensões, deformações e, por conseguinte, as degradações no lastro e perdas de geometria, tendendo a aumentar ainda o número de manutenções ao longo do tempo (médio-longo prazo).

Importante citar que neste artigo o objetivo foi de apresentar brevemente o modelo e fornecer um exemplo de aplicação. Assim, maiores conclusões a respeito desta simulação ainda estão em avaliação.



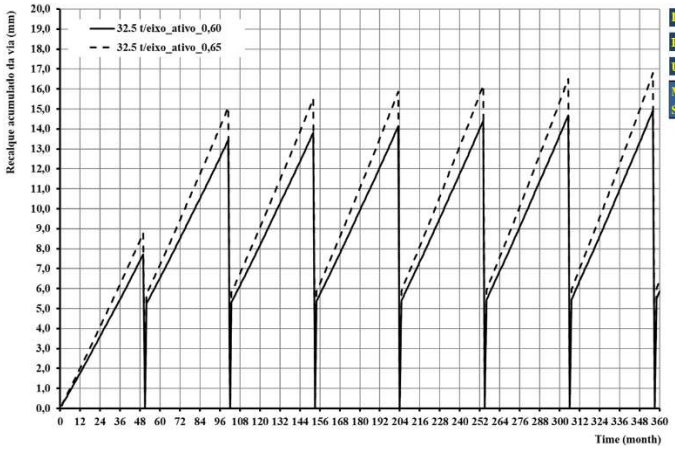
Tensão no Lastro

Parâmetro	Ativo_0,60	Ativo_0,65	(Δ 0,60_0,65)	(Δ 0,60_0,65)
Unidade	Kgf/cm2	Kgf/cm2	%	Kgf/cm2
Média	1,35	1,42	4,6	0,06
STD	0,02	0,02	10,7	

Tensão no Subleito

Parâmetro	Ativo_0,60	Ativo_0,65	(Δ 0,60_0,65)	(Δ 0,60_0,65)
Unidade	Kgf/cm2	Kgf/cm2	%	Kgf/cm2
Média	0,60	0,63	4,6	0,03
STD	0,01	0,01	10,7	

Figura 4: Valores de tensões no lastro/subleito ao longo do período de simulação para diferentes espaçamentos.



Deformações (recalques)

Parâmetro	Ativo_0,60	Ativo_0,65	(Δ 0,60_0,65)	(Δ 0,60_0,65)
Unidade	mm	mm	%	mm
Média	0,179	0,205	14,3	0,026
STD	0,20	0,22	8,9	

Figura 5: Valores das deformações acumuladas ao longo do tempo considerando diferentes espaçamentos.

6. CONCLUSÃO

Em geral, observando-se os valores dos parâmetros estruturais/geométricos, pode-se dizer que o modelo representou de forma adequada o comportamento da via submetida ao tráfego/manutenção considerando o aumento do espaçamento entre dormentes. Os resultados indicaram um baixo aumento das respostas estruturais (carga, tensão e deformação) em função do aumento do espaçamento para 0,65 m. Importante citar que os resultados podem variar mediante as variáveis consideradas em termos estruturais, geométricos e diretrizes de operação/manutenção. Reforça-se que para uma avaliação maior, outros aspectos devem ser avaliados como a degradação do lastro, trilhos e dormentes, além do aumento das manutenções ao longo da operação etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREA (1973) Manual of Recommended Practice. American Railway Engineering Association, USA

Esveld, C. (2001) *Modern railway track*. MRT-Productions, 2nd, Delft University of Technology.

IHHA (2009) Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: infrastructure, construction and maintenance issues. Int. Heavy Haul Association, D. & F. Scott Publishing Inc., USA.

Pires, J.J. (2016) Integrated maintenance model for heavy haul tracks. Doctoral Thesis, EPFL.

Shimatake, M. (1997) A track maintenance model for high-speed rail: a systems dynamics approach. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

Selig, E. T., e J. M. Waters (1994) *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford, London.

José João Pires de Oliveira Filho (jose.filho@egis-group.com) / Guilherme Castro (guilherme.castro@egis-group.com)
Egis Engenharia e Consultoria, Departamento de Projetos, São Paulo (SP)
Marta Pereira da Luz (marta.eng@pucgoias.edu.br)
Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO), Escola Politécnica e de Artes, Goiânia (GO)

USO DE GEOCÉLULAS NO REFORÇO DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO: CONTRASTE BIBLIOMÉTRICO COM A MODALIDADE RODOVIÁRIA

Alícia Caroline de Lima Silva, Rosângela dos Santos Motta
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO
O emprego de geocélulas no reforço de pavimentos, ainda que mais estabelecido no setor rodoviário, figura como uma alternativa de otimização da infraestrutura de ferrovias brasileiras, dado o aumento de cargas transportadas e a perspectiva de expansão da malha nacional. Portanto, este estudo objetiva mapear o estado da arte para compreender eventuais disparidades entre as pesquisas focadas no uso de geocélulas em pavimentos ferroviários e rodoviários por meio de uma revisão bibliométrica comparativa, utilizando-se da plataforma Scopus e do software Vosviewer. Foram desenvolvidas análises quanto ao contraste na evolução anual de publicações, foco metodológico, países destaque e redes de colaboração, bem como nas principais palavras-chave, mediante as quais se ratifica que no âmbito ferroviário o tema ainda está se consolidando mundialmente, aquém do rodoviário. As informações levantadas evidenciam tendências na área e direcionam novas pesquisas para ampliação do referencial teórico focado na aplicação do geossintético em ferrovias.

1. INTRODUÇÃO

Os geossintéticos são produtos com pelo menos um componente produzido a partir de um polímero (ABNT, 2021) e que podem ter diversas aplicações em obras de engenharia: separação entre camadas, proteção, filtração, drenagem, controle de erosão, reforço e impermeabilização (Vertermatti, 2015). Nas obras de infraestrutura de transportes, são empregados principalmente com a função de reforço para a melhoria da capacidade de carga de solos, sendo as geogrelhas e as geocélulas as soluções que mais se sobressaem. Contudo, o uso de geocélula oferece vantagens significativas em termos de rigidez, se comparada ao reforço planar com uso da geogrelha, por viabilizar o encapsulamento do solo granular devido à sua configuração tridimensional, o que promove confinamento do material e, por conseguinte, o aumento da coesão (Dash; Sireesh; Sitharam, 2003). Adicionalmente, como posto por Khan e Puppala (2023), a instalação da geocélula é rápida em comparação com outras formas de estabilização, uma vez que possui baixa complexidade técnica e não necessita de equipamento especializado.

A aplicação pioneira da geocélula foi conduzida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) (Webster, 1979) para possibilitar o trânsito de veículos militares sobre solos granulares e, após ter sido concebida para uma solução em rodovias, se estabeleceu como solução geotécnica para reforço de solos moles, adotada em obras para proteção de taludes e controle erosivo (Madhavi Latha; Rajagopal; Krishnaswamy, 2006; Wu; Austin, 1992). Para o setor de transportes, que consome um volume expressivo de material granular, as geocélulas podem oferecer eficiência econômico-ambiental por promoverem melhoria na capacidade de suporte com eventual redução de espessura das camadas de pavimento e por possibilitarem o aproveitamento de materiais não convencionais, a exemplo do *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) e resíduos de mineração (Khan; Puppala, 2023; Suresh; Chawla, 2022). Assim, em face da corrida mundial pela redução de impactos ambientais, é salutar que sejam direcionados esforços científicos para que esse geossintético seja utilizado de maneira otimizada no Brasil sobretudo em ferrovias, considerando o aumento de cargas transportadas ao longo das décadas e a consequente demanda por maior capacidade de suporte dos pavimentos existentes, bem como os projetos para expansão da malha ferroviária nacional que estão em andamento (ANTT, 2022).

O uso de geocélulas em ferrovias, embora promissor, possui especificidades distintas da aplicação em rodovias, visto que a magnitude e a natureza do carregamento desses dois modos de transporte são diferentes, o que faz com que as pesquisas voltadas a rodovias, ainda que mais consolidadas, não se estendam necessariamente ao contexto ferroviário e vice-versa Considerando esse cenário, é pertinente caracterizar o referencial teórico existente visando à compreensão de tendências de pesquisa e lacunas do conhecimento entre os dois setores para direcionar futuros estudos, principalmente no setor ferroviário. Assim, este trabalho tem o objetivo de mapear o estado da arte para compreender eventuais disparidades entre as pesquisas focadas no uso de geocélulas em pavimentos ferroviários e rodoviários por meio de uma revisão bibliométrica comparativa.

2. MÉTODO

A revisão bibliométrica desenvolvida neste estudo se dividiu em dois eixos — rodovias e ferrovias — com

critérios de seleção análogos. O levantamento de dados bibliométricos foi realizado a partir da busca de artigos científicos escritos em língua inglesa na plataforma Scopus, sem restrição de data de publicação, com as seguintes *strings* de busca: (i) para trabalhos referentes à utilização de geocélula em rodovias: geocell OR "cellular confinement" AND road* OR highway* OR pavement* e (ii) para trabalhos atrelados a ferrovias: geocell OR "cellular confinement" AND rail* OR train OR track OR ballast OR subballast. A busca retornou publicações em que os termos escolhidos apareciam no título, resumo ou entre as palavras-chave do artigo.

Em seguida, procedeu-se à verificação da aderência das publicações aos objetivos da revisão por meio da leitura dos resumos, de modo que aquelas que estavam fora do escopo foram desconsideradas. Ademais, fez-se a análise de duplicidades objetivando a identificação dos trabalhos que ocasionalmente atenderam a ambas as *strings* de busca. Nessa situação, realizou-se uma análise minuciosa para verificar se os trabalhos duplicados eram específicos de apenas um dos dois eixos, sendo excluídos do outro conjunto de dados, ou se de fato eram pertinentes para ambos, implicando em sua manutenção nos bancos de dados. Concomitantemente, foi realizada a classificação das publicações de acordo com a abordagem metodológica (execução de trabalho de campo, experimental em laboratório, modelagem numérica e utilização de materiais alternativos, assim como o agrupamento entre duas ou mais alternativas). Por fim, foram realizadas análises quantitativas relacionadas à evolução anual de publicações, o enfoque metodológico, os países que tratam sobre o tema e a existência de redes de colaboração, assim como principais palavras-chave, com a geração de mapas no *software* Vosviewer.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no número de publicações obtidas por meio das *strings* de busca na plataforma Scopus, confirma-se que há uma diferença significativa no volume de estudos voltados para cada um dos dois tipos de infraestrutura de transportes avaliados, como posto na Tabela 1. A princípio, foram encontrados 176 trabalhos relacionados à aplicação de geocélulas em rodovias, em contraste a 44 trabalhos direcionados a ferrovias. Após a revisão do banco de dados, com verificação de aderência ao tema e remoção de duplicidades dentre os 220 trabalhos, o número final de publicações em rodovias foi 136 (equivalente a uma redução de 22,7%) e em ferrovias, 31 (redução de 29,5%).

Tabela 1: Quantidade de publicações resultantes das etapas de mineração de dados.

Etapa	Número de publicações	
	Rodovias	Ferrovias
Levantamento na Scopus	176	44
Verificação de aderência e de duplicidade	136	31

Uma vez que a etapa de verificação foi concluída, foi realizada a análise da evolução temporal da quantidade de publicações, conforme ilustrado na Figura 1, em que a linha laranja indica o número total de publicações por ano, enquanto as barras representam a distribuição entre os dois tipos de infraestrutura. De uma forma geral, apesar de já haver registro de artigo datado de 1992, até 2009 o número de publicações variou entre uma ou nenhuma e só a partir de 2010 observou-se um crescimento gradual, com pico de 23 publicações no ano de 2024 (21 direcionadas a rodovias e 2 a ferrovias). Ressalta-se que para o ano de 2025 o resultado de 15 publicações é preliminar, contando apenas com os trabalhos publicados no primeiro semestre do ano, de modo que é possível que a tendência de crescimento se mantenha e este número supere o de 2024.

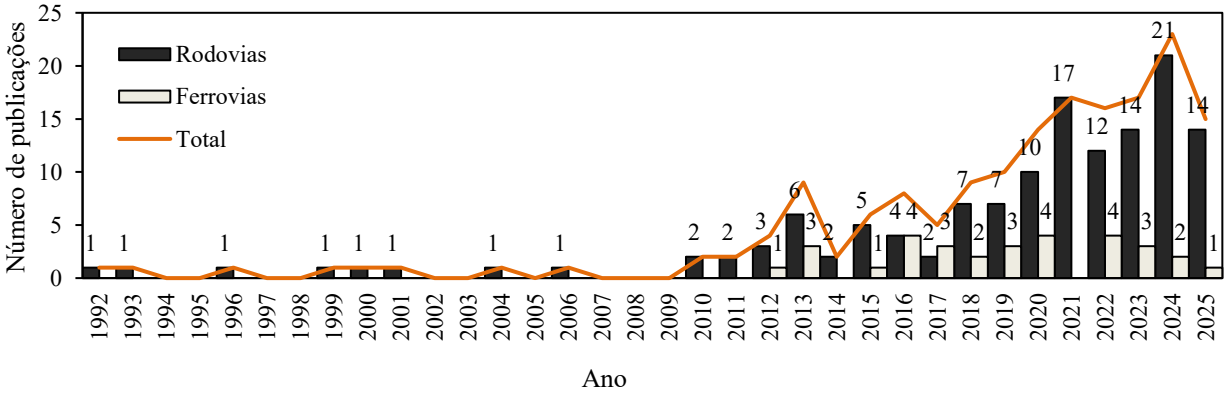


Figura 1: Evolução anual de publicações sobre geocélulas em pavimentos rodoviários *versus* ferroviários.

Ademais, nota-se que apesar de haver um interesse crescente na utilização de geocélulas em infraestrutura de transportes, os estudos sobre o seu uso no segmento ferroviário ainda são incipientes e não apresentam o mesmo nível de consolidação do setor rodoviário no cenário mundial. Esse fato é corroborado pelos resultados da análise dos trabalhos quanto à abordagem metodológica, expostos na Figura 2.

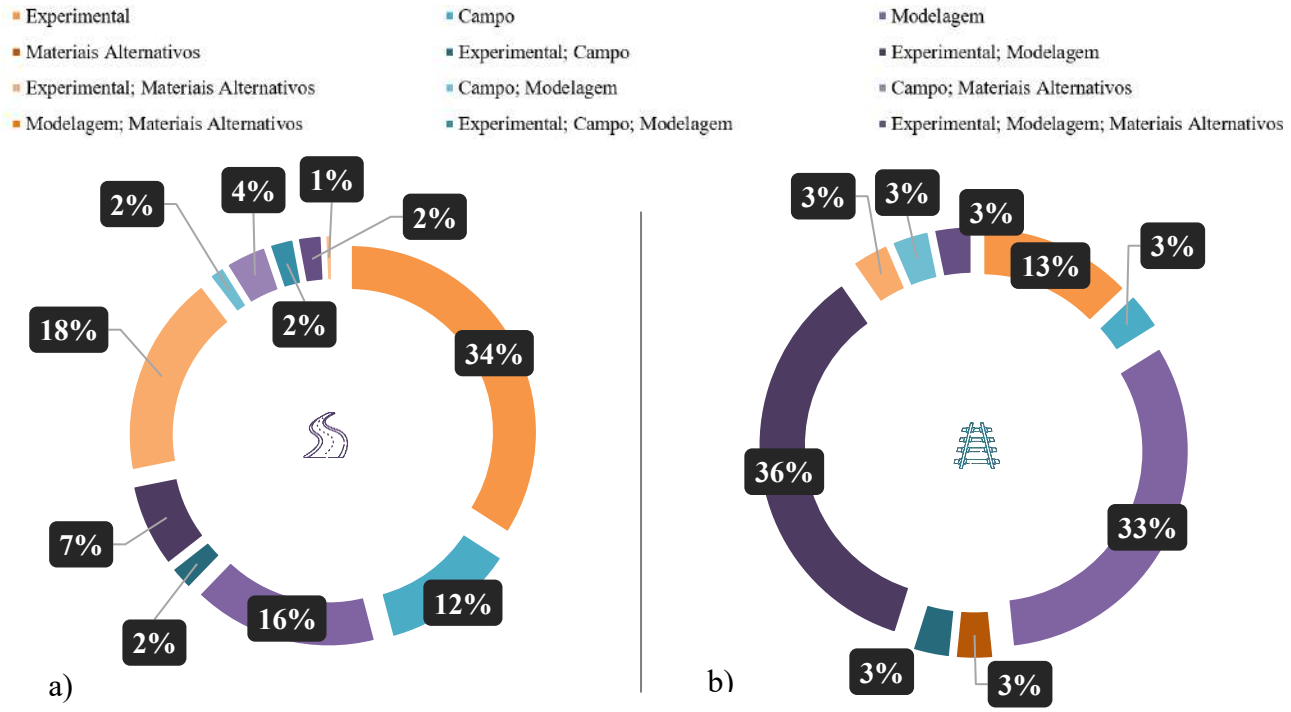


Figura 2: Distribuição das publicações quanto ao enfoque metodológico. a) Rodovias; b) Ferrovias.

No que se refere aos trabalhos sobre geocélula em pavimentos rodoviários, tem-se que 80% estão distribuídos entre estudo experimental em laboratório (34%), experimental com uso de materiais alternativos, seja no material de preenchimento ou de fabricação da geocélula (18%), modelagem (16%) e estudos de campo (12%). Na interface de ferrovias, 82% dos trabalhos estão distribuídos em estudo experimental atrelado a modelagem (35%), apenas de modelagem (31%) e puramente experimental em laboratório (16%). Esses dados mostram que há uma diversificação metodológica maior entre os trabalhos desenvolvidos em rodovias, que já tratam de maneira significativa sobre aspectos de sustentabilidade na utilização do geossintético, enquanto em ferrovias o tópico ainda está fortemente atrelado à execução de ensaios laboratoriais e validação através de modelagem. Essa assimetria pode estar relacionada ao fato de que o conhecimento do uso em ferrovias ainda está em consolidação, contudo, vale ressaltar que a operação ferroviária possui complexidade elevada e isso pode ser um fator dificultador da execução de aplicações em campo.

Os principais países que tratam sobre o tema estão expostos na Figura 3, que compara o número de publicações de cada nação e seu impacto relativo (quociente entre o total de artigos e o total de citações). No cenário de rodovias, há registro de 25 países, sendo apresentados aqui apenas os 10 primeiros em quantidade de publicações, com a Índia em destaque quanto à produtividade, porém com baixo impacto, à sombra de países de produção reduzida, a exemplo de Israel e Reino Unido. No segmento ferroviário, há publicações provenientes de apenas 8 países, dentre os quais a Austrália se destaca como referência nos estudos da área por possuir um número de citações por documento razoável, enquanto a Índia novamente se apresenta como o país que mais publica, ainda que pouco citado. Ademais, apesar de ser proeminente dentre os países da América do Sul nos dois cenários, o Brasil apresenta desempenho intermediário, com performance ligeiramente superior em rodovias, com 5 publicações e um índice de 22 citações/documento.

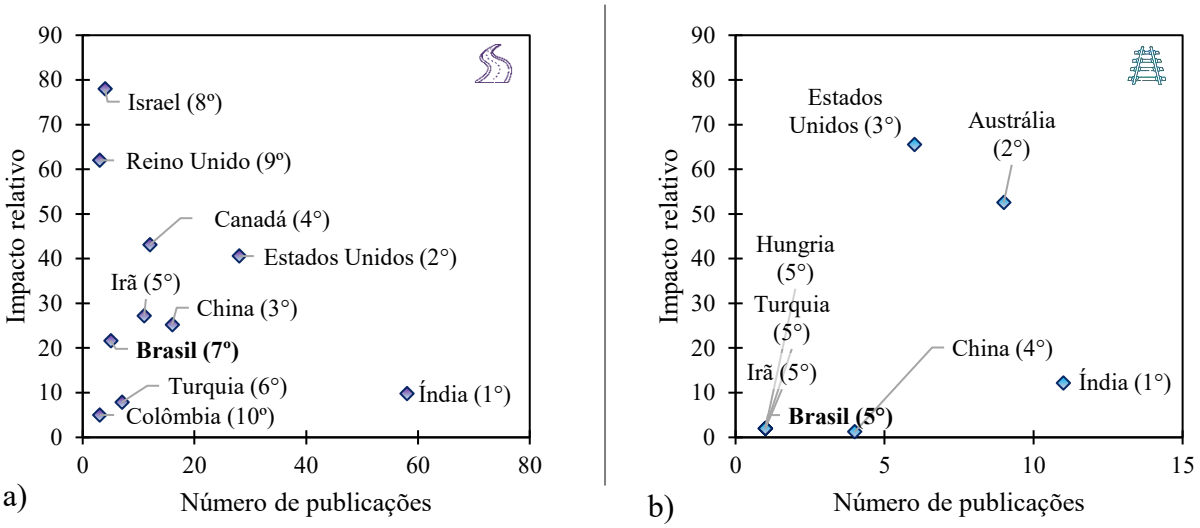


Figura 3: Comparação da produção acadêmica (documentos) e impacto relativo (citações/documento) entre os principais países que estudam o tema. a) Rodovias; b) Ferrovias.

Outro aspecto a ser considerado é a rede de colaboração entre países no desenvolvimento de artigos, que também evidencia estruturas bastante distintas entre os cenários rodoviário e ferroviário. Naturalmente, com um maior número de publicações, no âmbito de rodovias há uma malha densa e interconectada, com forte protagonismo indiano e estadunidense, enquanto no caso ferroviário não se verifica a formação de uma rede propriamente dita, figurando pouca articulação ou nenhuma, como é o caso do Brasil, por exemplo (Figura 4).

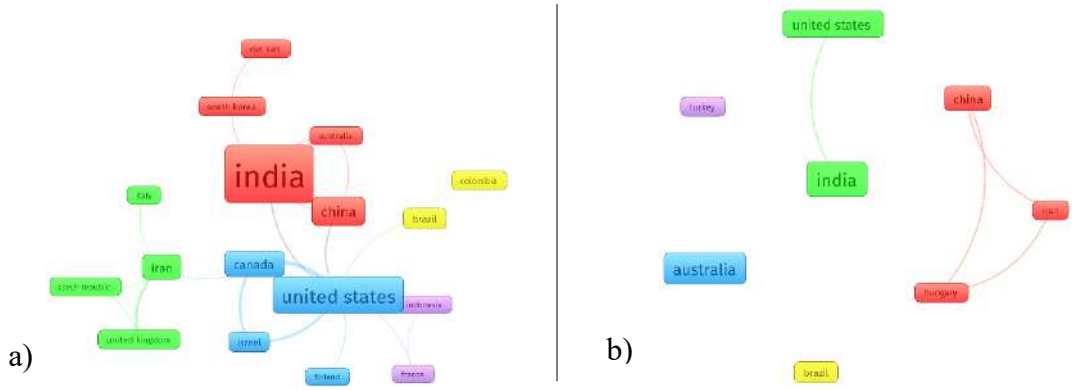


Figura 4: Mapa de colaboração entre países, obtido com auxílio do Vosviewer. a) Rodovias; b) Ferrovias.

Por fim, foi feita a análise de palavras-chave, por meio da qual foram selecionadas as 20 mais frequentes em cada grupo de publicações, ilustradas nos mapas da Figura 6. Em ambos os casos, o cerne das pesquisas são termos relacionados ao reforço com geocélula com as palavras *reinforcement* e *geocell(s)*, que aparecem como os maiores nós, e em nós menores vê-se a preocupação com a deformação (*deformation*, *permanent deformation*, *deformation mechanism*). Na Figura 6(a) destaca-se a ocorrência de palavras relacionadas à metodologia de ensaios de capacidade de carga (*load testing*, *plate load tests*) e fatores de melhora, assim como aquelas atreladas ao pavimento propriamente dito (*pavement*, *asphalt pavements*, *flexible pavements*) e à abrangência de rodovias não pavimentadas nos estudos (*unpaved roads*). Analogamente, do ponto de vista ferroviário presente na Figura 6(b), há também palavras relacionadas à constituição do pavimento (*railway*, *railroad*, *ballast*, *subballast* e *subgrade*) e ao carregamento (*cyclic loads* e *cyclic loading*), assim como ao aspecto metodológico, com maior ocorrência de termos atrelados a modelagem (*discrete element method*, *finite difference method*, *numerical model*, *computer simulation*), o que está alinhado aos dados apresentados na Figura 2.

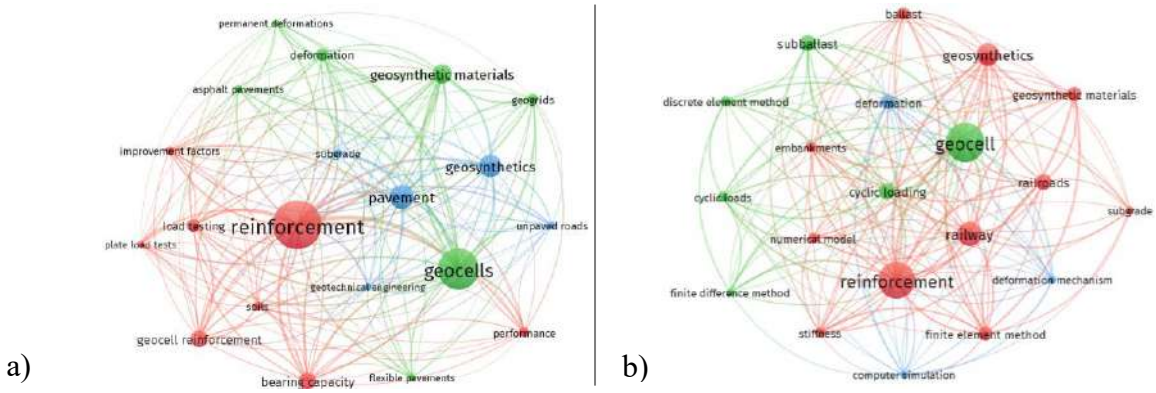


Figura 5: Mapa das 20 palavras-chave mais frequentes, obtido com auxílio do Vosviewer. a) Rodovias; b) Ferrovias.

4. CONCLUSÕES

Nesta revisão bibliométrica foram avaliadas 167 publicações focadas no uso de geocélulas em reforço de pavimentos rodoviários (136) ou ferroviários (31), a partir das quais destaca-se que a Índia é o país que mais produz artigos em ambos os setores, apesar de suas publicações possuírem um baixo impacto médio, e o Brasil tem um desempenho mediano, que pode ser aprimorado com aumento de publicações e colaborações com outros países. Além disso, enquanto os trabalhos rodoviários possuem abordagem metodológica mais variada, abordando materiais alternativos e sustentabilidade, no âmbito ferroviário os estudos possuem foco experimental em laboratório e de modelagem numérica, o que pode estar relacionado à complexidade da operação ferroviária para aplicações em campo. Assim, entende-se que apesar da geocélula ter sido usada pioneiramente na infraestrutura de transportes, este ainda é um tema pouco explorado em artigos científicos, sobretudo no setor ferroviário que se apresenta como um campo do conhecimento ainda em consolidação. Embora compartilhem de princípios fundamentais da mecânica dos pavimentos, cada modal apresenta suas particularidades, de modo que há demanda para aprofundamento nas pesquisas ferroviárias, inclusive para que as soluções sejam avaliadas quanto ao desempenho estrutural, custos e vida útil, ampliando o referencial teórico específico, uma vez que a revisão bibliométrica tem apenas cunho quantitativo e não qualitativo.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2021) NBR ISSO 10318-1: Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANTT (2022) Novos projetos ferroviários. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/novos-projetos-ferroviarios (acesso em 30/06/2025).

Dash, S. K.; S. Sireesh; T. G. Sitharam (2003) Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 21, n. 4, p. 197–219. DOI: 10.1016/S0266-1144(03)00017-7

Khan, M. A.; A. J. Puppala (2023) Sustainable pavement with geocell reinforced reclaimed-asphalt-pavement (RAP) base layer. *Journal of Cleaner Production*. v. 387, p. 135802. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135802

Latha, G. M.; K. Rajagopal; N. R. Krishnaswamy (2006) Experimental and theoretical investigations on geocell-supported embankments. *International Journal of Geomechanics*, v. 6, n. 1, p. 30–35. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:1(30)

Suresh, D.; S. Chawla (2022) Comparative life cycle assessment of railway subballast layer with natural and coal overburden aggregates in India. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 27, n. 5, p. 704–718. DOI: 10.1007/s11367-022-02060-x

Vertermatti, J. C. (2015) *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2. ed. São Paulo: Blucher.

Webster, S. L. (1979) *Investigation of beach sand trafficability using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts*. Report 1. Sand test sections 1 and 2. Vicksburg, U.S.: Army Engineer Waterways Experiment Station.

Wu, K. J.; D. N. Austin (1992) Three-dimensional polyethylene geocells for erosion control and channel linings. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 11, n. 4–6, p. 611–620. DOI: 10.1016/0266-1144(92)90035-9

Alícia Caroline de Lima Silva (alicia.silva@usp.br)
Rosângela dos Santos Motta (rosangela.motta@usp.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Professor Almeida Prado, Travessa do Biênio, No. 83 – São Paulo, SP, Brasil

Materiais Geotécnicos na Infraestrutura de Transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE CONSIDERANDO A SUCÇÃO APLICADOS A UM SUBLEITO

Lara Batista Ferreira de Lima[1], **Karolayne Peres de Melo**[1], **Lilian Ribeiro de Rezende**[1], **Gilson de F. N. Gitirana Jr.**[1]
[1]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
O pavimento é uma estrutura que atua sob a passagem dos veículos, que fornecem um carregamento cíclico, e sob efeitos climáticos, sendo a incidência pluviométrica um dos elementos atmosféricos que contribuem com o aumento da umidade e diminuição da sucção do pavimento, variáveis importantes no comportamento do subleito. Este estudo busca comparar os resultados de um solo de subleito definido como areia siltosa saprolítica, em três condições diferentes de umidade, a partir de dois modelos de regressão de deformação permanente. O primeiro modelo adotado, recomendados pela norma de deformação permanente, não considera a sucção do solo e o segundo modelo incorpora a sucção e a umidade do material. Os resultados indicam que uma variação de ±3% em torno da umidade ótima trouxe mudanças significativas no resultado de ensaio, o que demonstra a importância de considerar os efeitos da sucção, apesar do modelo de norma ter apresentado melhor ajuste estatístico.

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A infraestrutura rodoviária desempenha um papel essencial para o desenvolvimento econômico e social, tendo em vista a mobilidade de pessoas (95%) e mercadorias (65%) entre diferentes regiões do país, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT *et al.*, 2024). Dessa forma, uma das alternativas para melhorar a qualidade dos pavimentos é a partir da utilização de um método de dimensionamento que considera a mecânica dos pavimentos (CNT, 2017).

Neste contexto, o uso do *software* MeDiNa foi inserido como Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos asfálticos (DNIT, 2020). O dimensionamento mecanístico-empírico considera a deformação permanente como um dos parâmetros para determinar o comportamento e a resposta mecânica de materiais geotécnicos e do subleito de pavimentos asfálticos. Assim, a normativa de ensaio de deformação permanente IE 179 (DNIT, 2018) preconiza o modelo de regressão não linear para determinar os coeficientes de regressão, que por sua vez, indicam o comportamento do material dentro do software MeDiNa.

O pavimento é uma estrutura que atua sob a passagem dos veículos, que fornecem um carregamento cíclico, e sob efeitos climáticos. Dois elementos climáticos que influenciam o desempenho do pavimento são: incidência solar, que fornece energia térmica na camada de rolamento; e incidência pluviométrica, que promove variação de umidade proveniente da chuva, de percolação lateral de acostamentos permeáveis e elevação do lençol freático (Medina e Motta, 2015). Dessa forma, do ponto de vista da pavimentação, a umidade do subleito é um fator determinante para o desempenho estrutural do pavimento e do solo de fundação. Isso ocorre porque as variações de umidade influenciam em parâmetros de resiliência, capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento (Fredlund *et al.*, 2012).

Nas últimas décadas, o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como longos períodos de seca seguidos por chuvas intensas têm despertado atenção em relação a infraestrutura (Iñiguez-Gallardo *et al.*, 2023). Assim, a preocupação com os parâmetros de umidade e sucção do solo se tornam evidentes para o entendimento da deformação permanente de subleitos. Nesse contexto, Santos *et al.* (2024) propõem um modelo de regressão não linear que considera parâmetros como a variação de umidade em torno da umidade ótima e a sucção matricial de material geotécnico para pavimentação. Modelos que consideram a incorporação da sucção e da umidade do solo podem contribuir com a análise mecanicista dos pavimentos a partir da capacidade do modelo de representar o comportamento do solo em diferentes condições climáticas, frente a variações sazonais de umidade, bem como em situações pluviométricas extremas.

A partir disso, esta pesquisa tem como objetivo comparar os resultados do modelo definido pela norma de deformação permanente IE 179 (DNIT, 2018), que não considera a sucção dos solos, com os resultados obtidos pelo modelo de Santos *et al.* (2024), que considera sucção dos solos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesta pesquisa considera um solo saprolítico, subleito da GO-070, estudado por Freitas (2019) e por Cavalcante (2022), coletado próximo ao município de Goiás – GO e classificado, respectivamente, pela Classificação Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), a Classificação *Transportation Research Board* (TRB) e Classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) como SM (areia siltosa), A4, NS' (areia siltosa saprolítica). Segundo Freitas (2019), a caracterização do material é definida por: granulometria contendo 8,87% de pedregulho, 60,40% de areia, 30,73% de silte e 0,00% de argila; massa específica do grão de 2,660g/cm³; limite de liquidez e limite de plasticidade indefinidos e índice de plasticidade definido como não plástico. No estudo de Cavalcante (2022), foi definida energia de compactação normal, umidade ótima de 14,8% e massa específica aparente seca de 1,76g/cm³, considerando o cilindro tripartido usado em ensaio triaxial dinâmico conforme norma específica de ensaio de compactação ME 443 (DNIT, 2023).

O ensaio de deformação permanente realizado por Cavalcante (2022) seguiu a normativa IE 179 (DNIT, 2018), com uma frequência de 3hz com 100mil ciclos de carregamento, ou até chegar na ruptura do material, para 6 pares de tensão. O uso de 100mil ciclos de carregamento foi realizado de maneira a diminuir o tempo de ensaio, em função da frequência e sem prejuízos aos resultados obtidos, conforme indicado por Werkmeister *et al.* (2004) e Cao *et al.* (2020). A escolha dos 6 pares de tensão foi feita a partir do estudo de Lima (2020) que definiu como satisfatória a acurácia estatística para fins de deformação permanente com os seguintes pares de tensão: par 1 - 40/40, par 3 - 40/120, par 4 - 80/80, par 6 - 80/240, par 8 - 120/240, par 9 - 120/260, definidos por σ_3/σ_d, onde σ_3 é a tensão de confinamento e σ_d é a tensão desvio.

O solo foi compactado na umidade ótima e, posteriormente, submetido a molhagem ou secagem, de maneira a compor amostras em três condições de umidade para a realização do ensaio de deformação permanente: umidade ótima, umidade ótima + 3% e umidade ótima -3%, sendo identificados respectivamente por w_{ot}; w_{ot}+3; w_{ot}-3. O comportamento quanto a classificação *Shakedown* é apresentada na Tabela 1. A curva característica solo-água (CCSA) foi definida por Freitas *et al.* (2020) utilizando o modelo de ajuste de Fredlund e Xing (1994), conforme a Figura 1. A partir da CCSA, Cavalcante (2022) definiu a sucção em cada condição de umidade como sendo: w_{ot} com 11,2kPa, w_{ot}+3 com 1,12kPa e w_{ot}-3 com 50,12kPa.

Tabela 1: Classificação do solo saprolítico na umidade ótima da energia Proctor Normal quanto ao Shakedown para três condições de umidade: wot -3%, wot e wot + 3% (Cavalcante, 2022).

Umidade	Par 1 (40/40)	Par 3 (40/120)	Par 4 (80/80)	Par 6 (80/240)	Par 8 (120/240)	Par 9 (120/360)
w_{ot}-3	A	B	A	AB	B	C
w_{ot}	A	A	A	AB	AB	B
w_{ot}+3	A	AB	A	C	B	C

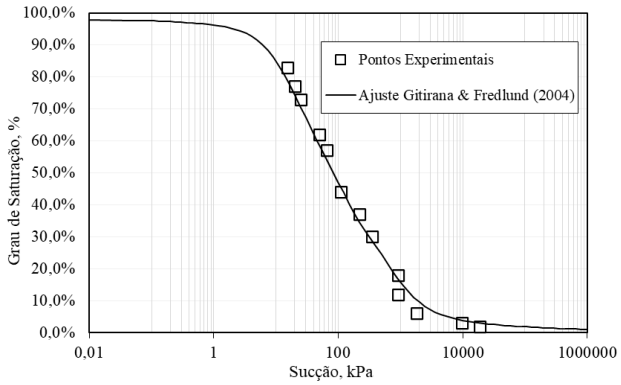


Figura 1: CCSA do solo, adaptado de Freitas *et al.* (2020).

A partir dos resultados de ensaio de deformação permanente, foram obtidas regressões não lineares considerando o modelo definido pela norma de deformação permanente IE 179 (DNIT, 2018), equação (1), e pelo modelo de Santos *et al.* (2024), equação (2). A comparação dos modelos se deu a partir do parâmetro estatístico de raiz quadrada do erro-médio, do inglês, *root mean squared error* (RMSE).

$$dp = \psi_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_0}\right)^{\psi_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_0}\right)^{\psi_3} N^{\psi_4} \quad (1)$$

$$dp = \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_1} \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_2} (N)^{\psi_3} \left(e^{\psi_4 - \psi_5 \cdot (w - w_{opt})}\right) \left(\frac{\psi_m}{\rho_0}\right)^{\psi_6} \quad (2)$$

Onde: dp = deformação permanente; ψ_1, ψ_2, ψ_3, ψ_4, ψ_5, ψ_6 = coeficientes de regressão, σ_3 = tensão confinante, σ_d = tensão desvio, N = número de ciclos, P_0 = pressão atmosférica de referência; $(w\text{-}w_{opt})$ = variação da umidade em relação à umidade ótima; ψm = sucção matricial; e = número de euler.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A regressão não linear dos modelos utilizados neste estudo obteve os seguintes resultados apresentados na Tabela 2. O resultado de deformação permanente para dados de ensaio, dados de regressão do modelo da norma do DNIT e dados de regressão do modelo que considera sucção são apresentados nas figuras: Figura 2 referente ao solo solo wot, Figura 3 referente ao solo solo wot+3 e Figura 4 referente ao solo solo wot-3. Na Figura 3 (par 6 e par 9) e na Figura 4 (par 9), percebe-se que os dados de LVDT não chegam até 100.000 ciclos em decorrência da ruptura do CP durante o ensaio. Este comportamento é representado na Tabela 1 como classificação C na teoria do Shakedown.

Tabela 2: Resultado de regressão não linear dos modelos propostos.

Modelo	Material	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4	ψ_5	ψ_6	RMSE
IE 179 (DNIT, 2018)	wot	0,4462	-0,5733	1,5159	0,0267	-	-	0,23
IE 179 (DNIT, 2018)	wot+3	1,5286	-0,5970	1,3819	0,0116	-	-	0,20
IE 179 (DNIT, 2018)	wot-3	0,5511	-1,4413	1,5177	0,0003	-	-	0,67
Santos *et al.* (2024)	Todos	-0,7262	1,4430	0,0160	-3,2860	61,3790	-1,2070	0,55

Onde: ψ_1, ψ_2, ψ_3, ψ_4, ψ_5, ψ_6 = coeficientes de regressão; RMSE = *root mean squared error.*

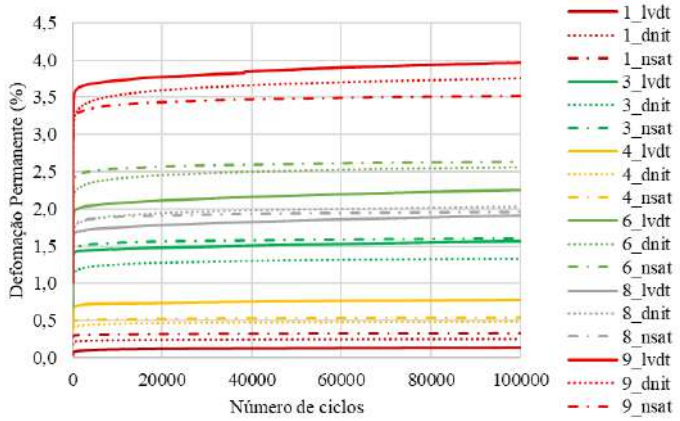


Figura 2: Gráfico que relaciona deformação permanente com o número de ciclos para o solo wot.

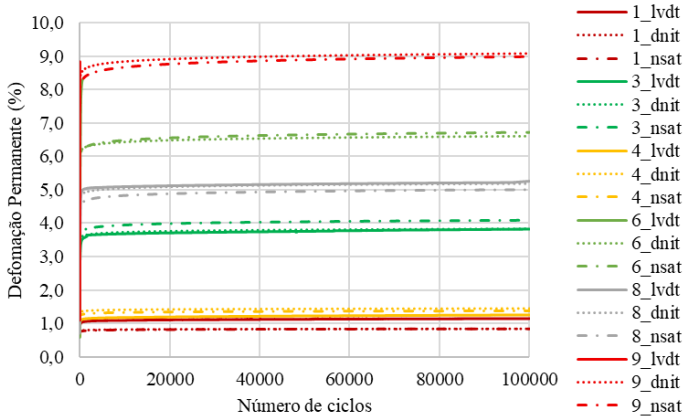


Figura 3: Gráfico que relaciona deformação permanente com o número de ciclos para o solo wot+3.

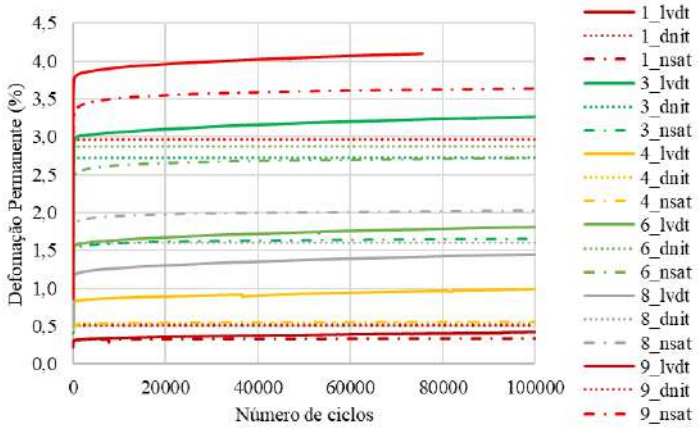


Figura 4: Gráfico que relaciona deformação permanente com o número de ciclos para o solo wot-3.

A comparação entre os modelos de regressão evidenciou diferenças no ajuste aos dados experimentais de deformação permanente do solo saprolítico em distintas condições de umidade. O modelo normativo IE 179 (DNIT, 2018) apresentou valores de RMSE mais baixos para as condições de umidade ótima (wot) e acima do ótimo (wot+3%), com 0,23 e 0,20, respectivamente, demonstrando um ajuste satisfatório nesses casos. No entanto, para a condição de umidade abaixo do ótimo (wot-3%), o RMSE foi de 0,67, podendo indicar uma redução na capacidade do modelo em representar o comportamento do solo mais seco. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que o modelo não incorpora o efeito da sucção, que influencia significativamente as propriedades mecânicas do solo em estados não saturados.

Em contrapartida, o modelo proposto por Santos *et al.* (2024), que considera tanto a variação de umidade quanto a sucção matricial, apresentou um RMSE global de 0,55 ao analisar todas as condições de umidade simultaneamente. Quando calculado do RMSE considerando a amostra individual de cada de umidade neste modelo, os resultados foram de 0,27, 0,26 e 0,84 para respectivamente wot, wot+3 e wot-3. Embora o valor do RMSE global e individual seja ligeiramente superior aos obtidos pelo modelo normativo em condições específicas, este modelo demonstrou maior versatilidade ao representar o comportamento do solo em uma faixa mais ampla de umidades.

Além disso, os gráficos apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 indicam que o modelo de Santos *et al.* (2024) produziu curvas com tendência contínua e suave, o que pode favorecer análises que busquem capturar variações graduais no comportamento do solo associadas às condições hidromecânicas. É possível perceber que a aproximação de curvas medidas e as curvas calculadas se diferenciam a depender do par de tensão, demonstrando que o modelo com melhor resultado de ajuste também está em função dos pares de tensão de cada material.

De forma geral, os resultados indicam que uma variação de ±3% em torno da umidade ótima trouxe mudanças significativas no resultado de ensaio, o que demonstra a importância de considerar os efeitos da variação de sucção após a compactação. Além disso, sugerem que, enquanto o modelo normativo é adequado para representar o comportamento do solo em situações próximas à umidade ótima, o modelo de Santos *et al.* (2024) amplia a capacidade de análise para diferentes estados de umidade, podendo contribuir para avaliações mais completas do desempenho de subleitos em contextos sujeitos a variações climáticas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma análise comparativa entre dois modelos de regressão não linear para avaliação da deformação permanente em um solo saprolítico de subleito, submetido a diferentes condições de umidade: o modelo normativo IE 179 (DNIT, 2018), que não considera os efeitos da sucção matricial, e o modelo proposto por Santos *et al.* (2024), que incorpora a sucção e a variação de umidade.

O trabalho reforça a importância de incorporar parâmetros relacionados à umidade e sucção para uma melhor

representação do comportamento mecânico dos solos em condições não saturadas, especialmente em regiões tropicais onde as variações climáticas impactam diretamente o desempenho estrutural dos pavimentos. A abordagem adotada contribui para o entendimento das limitações e potencialidades de cada modelo no contexto de dimensionamento mecanístico-empírico, oferecendo bases para a seleção de metodologias mais adequadas a diferentes cenários. Espera-se que os resultados apresentados incentivem novos estudos voltados à aplicação de modelos que considerem a condição de umidade e sucção em projetos de pavimentação, ampliando o conhecimento sobre o comportamento hidromecânico dos subleitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cao, Z., Zhang, Q., Cai, Y., Chen, J., Gu, C., & Wang, J. (2020). The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials. *Engineering Geology*, *276*, 105775. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105775

Cavalcante, D. R. (2022). *Influência da variação de umidade e da frequência de ensaio no módulo de resiliência e na deformação permanente de solos* [Dissertação de Mestrado em Geotecnia]. Universidade Federal de Goiás.

CNT, C. N. de T., SST, S. S. do T., SNAT, S. N. de A. do T., & ITL, I. de T. e L. (2024). *Pesquisa CNT de Rodovias 2024*. Cnt.

CNT, C. N. do T. (2017). Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? *Confederação Nacional do Transporte*, 160.

DNIT, D. N. de I. de T. (2018). *DNIT IE 179: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente* (Instrução de Ensaio N. 179).

DNIT, D. N. de I. de T. (2020). *Manual de Utilização do programa MeDiNa. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico—Empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* (Versão 1.1.5).

DNIT, D. N. de I. de T. (2023). *DNIT ME 443: Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos* (Método de ensaio N. 443).

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.

Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, *31*(4), 521–532. https://doi.org/10.1139/t94-061

Freitas, J. B. de, Rezende, L. R. de, & Gitirana Jr., G. de F. N. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*, *270*, 105580. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580

Freitas, J. B. D. (2019). *Análise de parâmetros para projetos mecanísticos-empíricos de pavimentos asfálticos em Goiás* [Dissertação de Mestrado em Geotecnia]. Universidade Federal de Goiás.

Iñiguez-Gallardo, V., Campbell, D., Castellanos, E. J., Haryanto, B., Tume, S. J. P., Rahman, M. S., Weber, E., Borghi, J., Garcia-Dorado, S. C., & Anton, B. (2023). Place-based capacity building to enhance resilience in tropical countries. *One Earth*, *6*(8), 935–938. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.012

Lima, C. D. A. de. (2020). *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas* [Tese de Doutorado em Engenharia Civil]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Medina, J. de, & Motta, L. M. G. da. (2015). *Mecânica dos pavimentos* (3ª). Editora Interciência.

Santos, T. A. D., Pinheiro, R. J. B., & Specht, L. P. (2024). Effects of moisture content and soil suction on the permanent deformation of tropical subgrade soils: Experimental investigations and modelling. *Road Materials and Pavement Design*, *25*(11), 2358–2381. https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2310823

Werkmeister, S., Dawson, A. R., & Wellner, F. (2004). Pavement Design Model for Unbound Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering*, *130*(5), 665–674. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:5(665)

Lara Batista Ferreira de Lima (lara.batista@ufg.br); *Karolayne Peres de Melo* (karolaynepm@ufg.br); *Lilian Ribeiro de Rezende* (lrezende@ufg.br); *Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior* (gilsongitirana@ufg.br).
Universidade Federal de Goiás (UFG). Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON).
Avenida Universitária, 1488, Qd. 86, Lt. Área, Setor Leste Universitário. CEP: 74605-220. Goiânia – GO. Brasil.

ANÁLISE DA RIGIDEZ DE SOLOS SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES ATRAVÉS DO ENSAIO TRIAXIAL DINÂMICO

Claudeny Santana[1], Alexandre Medeiros[1], Marcelino Aurelio Vieira da Silva[1], Daniel Anijar[2]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

RESUMO
Este estudo analisou a rigidez de três solos distintos (arenoso, siltoso e laterítico) submetidos a diferentes configurações do ensaio de Módulo de Resiliência (MR), conforme a DNIT 134/2018-ME. Foram avaliados corpos de prova compactados na energia intermediária, variando-se o teor de umidade (ramos seco, ótimo e úmido) e o posicionamento dos transdutores (terço médio e topo). As deformações resilientes variaram entre 0,02% e 0,35% no Solo 01 (arenoso), confirmando comportamento granular estável. No Solo 02 (siltoso), atingiram até 0,8%, revelando maior deformabilidade e sensibilidade à umidade. Já o Solo 03 (laterítico) apresentou valores entre 0,02% e 0,18%, mas superou 5% em umidade acima da ótima, inviabilizando o ensaio. Os resultados indicam maior potencial do Solo 01 para camadas estruturais, seguido do Solo 03, enquanto o Solo 02 demonstrou baixa adequação. As medições no terço médio refletiram de forma mais representativa o comportamento interno dos solos, minimizando efeitos de contato e atrito. Assim, o trabalho contribui para o aprimoramento dos critérios de seleção e uso de solos em pavimentação flexível.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A deformação resiliente representa a parcela elástica e recuperável da deformação que os solos sofrem sob cargas repetidas, sendo um parâmetro fundamental para estimar o desempenho estrutural de pavimentos flexíveis (Lekarp et al., 2000). Esse comportamento está diretamente associado ao Módulo de Resiliência (MR), que traduz a capacidade do solo em suportar esforços cíclicos sem acumular deformações permanentes excessivas. Valores elevados de MR indicam materiais com maior rigidez e, consequentemente, maior aptidão para utilização em camadas estruturais.

Estudos recentes em pavimentação evidenciam a importância da caracterização mecânica dos solos para prever sua resposta ao tráfego, considerando fatores como tensão confinante, tensão desvio e variações de umidade (Farias, Araújo e Rodrigues, 2023). Pesquisas apontam que diferentes tipos de solos e seus constituintes influenciam os valores de MR, pois apresentam comportamentos distintos quanto à deformação resiliente, implicando na necessidade de avaliações específicas para cada tipo de material.

Nesse contexto, o ensaio triaxial dinâmico, regulamentado por normas como a DNIT 134/2018-ME, tem se consolidado como método essencial para medir o módulo de resiliência e compreender o comportamento dos solos sob cargas repetidas. A utilização desse ensaio contribui significativamente para o dimensionamento mais seguro e econômico dos pavimentos, permitindo selecionar materiais que garantam maior vida útil às estruturas rodoviárias. Desta maneira, o objetivo desta pesquisa é analisar a rigidez de corpos de prova compactados na energia intermediária de 3 solos distintos: arenoso, siltoso e um solo laterítico (SAFL), bem como verificar sua adequabilidade para composição de camadas estruturantes para pavimentos flexíveis. Variando a umidade e o posicionamento dos transdutores de deslocamento a fim de verificar a influência do dispositivo de ensaio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os tipos de solos utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos adotados para a realização do ensaio de módulo de resiliência, para a determinação da rigidez do solo. Os solos foram advindos de diferentes regiões do Brasil, o Solo 01 foi um solo arenoso oriundo de jazida na cidade do Rio de Janeiro, o Solo 02 foi um solo siltoso coletado no município de Pinheiral (Rodovia Presidente Dutra) e o Solo 03 um solo arenoso fino laterítico (SAFL) da região de Bonito – MS.

Na Tabela 1 apresenta-se as principais informações sobre caracterização geotécnica destes solos, e que subsidiaram o planejamento para a execução dos ensaios dinâmicos.

Tabela 1: Caracterização geotécnica dos solos utilizados.

Solo	HRB	LL	LP	IP	MCT	γ (g/cm^3)	Wot (%)
1	A-2-4	NL	NP	-	-	2,250	9,4
2	A4	NL	NP	-	-	1,720	13,4
3	A-2-4	22,2	13,3	8,9	LA’	2,070	9,4

Os solos selecionados foram preparados, secos, destorroados, quarteados e compactados na energia intermediária, para a realização do ensaio de MR. Também, foram definidos faixas de umidades, a fim de verificar se há variação de deformação resiliente condicionada a quantidade de água homogeneizada para a compactação, dessa maneira variou-se entre percentuais de ±2% do teor de umidade para cada solo. Na Figura 1 são destacados os aspectos dos solos após a compactação na umidade ótima.



Solo 01 Solo 02 Solo 03

Figura 1: Aspecto pós-compactação das amostras

Para a execução do ensaio de módulo de resiliência adotou-se os procedimentos em conformidade com a norma DNIT 134/2018-ME Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio, configurando o ensaio de duas maneiras, conforme descrição das etapas:
1 – Montagem do aparato no terço médio do corpo de prova (v. Figura 2);

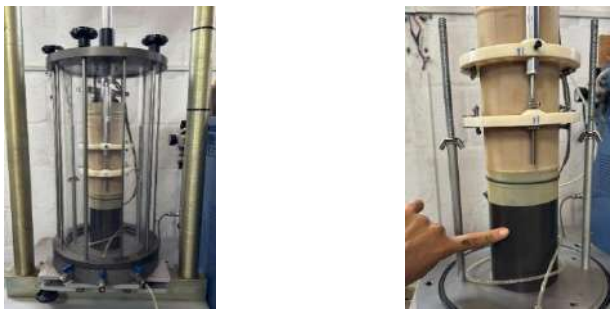


Figura 2: Montagem do aparato no terço médio e detalhamento da disposição dos LVDTs.

2 – Aplicação dos ciclos de condicionamento com frequência de 1Hz, 500 ciclos por sequência de pares de tensão;
3 – Aplicação da sequência dos 18 pares de tensões para a determinação do MR no terço médio, foram utilizados os pares de tensões para camadas de infraestrutura do pavimento;
4 – Desmontagem do aparato no terço médio e montagem do aparato no topo, no mesmo corpo de prova, aplicação dos mesmos pares de tensões anteriores, (v. Figura 3).

O procedimento de realização do ensaio no terço médio e topo, foi adotado a fim de verificar se as variações que ocorrem impactam no resultado e qual deles representa melhor a rigidez do solo.
Totalizou-se 09 corpos de prova ensaiados, uma amostra para cada umidade, assim, após a conclusão dos procedimentos do ensaio, os dados foram colhidos e tratados em ambiente Excel®, para o cálculo das deformações resilientes.



Figura 3: Montagem do aparato no topo e detalhamento da disposição dos LVDTs.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a aplicação da metodologia proposta, e dos cálculos realizados, apresenta-se os valores médios das deformações resilientes em cada sequência aplicada dos pares de tensões.

A Figura 4 ilustra em gráfico de coluna os valores percentuais das deformações resilientes obtidas nos ensaios relativos ao Solo 01. As faixas de deformações evoluíram até aproximadamente 0,35% com crescimento não contínuo ao longo dos ciclos, caracterizado por flutuações, possivelmente causadas pela variação na compactação e rigidez superficial devido aos vazios entre os grãos de areia, além disto as barras do topo (SI(2) Wot) apresentam maiores deformações que as do terço médio.

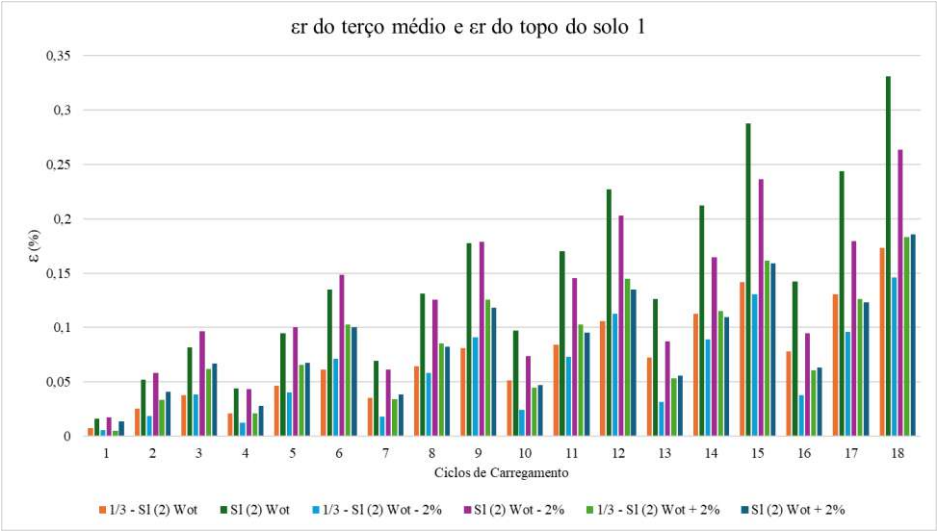


Figura 4: Deformações resilientes obtidas para o Solo 01.

Pode-se inferir que houve um comportamento resiliente estável, pois para solos granulares espera-se baixo deformação resiliente. Concentrando-se entre deformações 0,05% e 0,25%. Outro ponto destaque é que as leituras no topo foram maiores e isso pode ter sido causado por efeito de concentração de tensões e a atrito entre a base e o top cap. Com relação a umidade, verificou-se que, o acréscimo de umidade acima da ótima, tanto para o terço médio como para o topo, os valores de deformações resiliente foram próximos, o que sugere a pouca influência da disposição do ensaio quando este solo é ensaiado em umidades mais elevadas. Abaixo da ótima as deformações diminuem de maneira discreta.

A Figura 5 ilustra em gráfico de coluna os valores percentuais das deformações resilientes obtidas nos ensaios relativos ao Solo 02. Neste solo as faixas de deformações foram maiores em comparação ao Solo 01, até 0,8%, configurando um crescimento quase linear ao longo dos ciclos, com tendência acumulativa, isso implica maior risco de deformações permanentes e necessidade de estabilização se usado em sub-base.

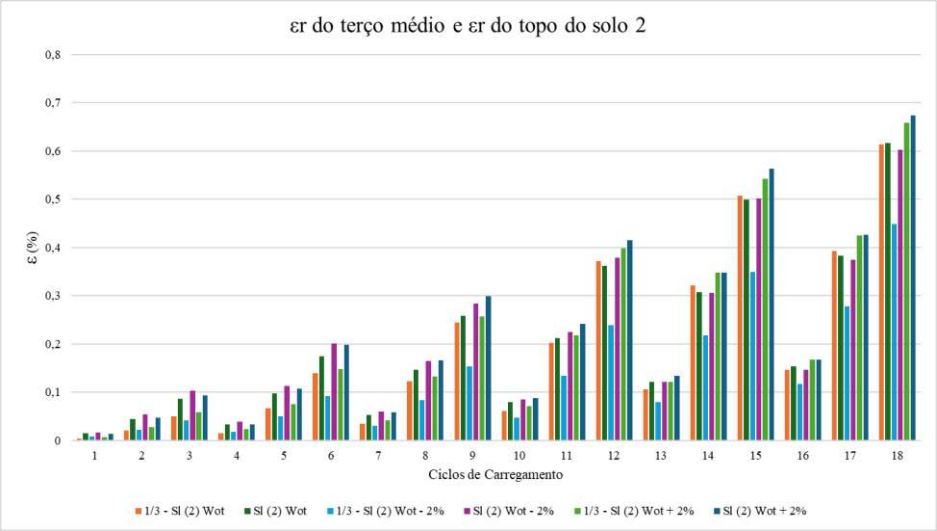


Figura 5: Deformações resilientes obtidas para o Solo 02.

Uma diferença notável foi de os resultados no topo serem maiores que no terço médio, acompanhando da variação de umidade, pois os ensaios com umidade acima da ótima obtiveram maiores deformações resilientes. Esse comportamento deformável é esperado para siltes, pois apresentam maior compressibilidade e são mais sensíveis à variação da umidade. Portanto este solo é menos apto para camadas de pavimento sem estabilização, com baixa rigidez, o que pode caracterizar risco de deformações permanentes.

Por fim, ilustra-se na Figura 6 ilustra em gráfico de coluna os valores percentuais das deformações resilientes obtidas nos ensaios relativos ao Solo 03.

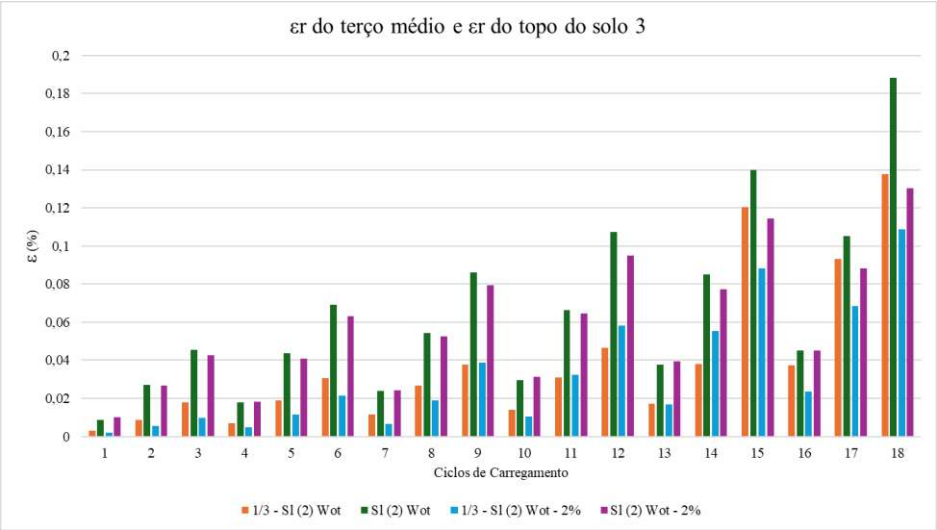


Figura 6: Deformações resilientes obtidas para o Solo 03.

O Solo 03 apresentou deformações resilientes mais baixas, com valores de até 0,22%, e um crescimento moderado ao longo dos ciclos. Acima da umidade ótima, as deformações superaram 5%, levando à interrupção e desconsideração do ensaio, conforme a norma DNIT 134/2018. A diferença entre as deformações nos ramos seco e ótimo foi menor em comparação ao Solo 02, com uma tendência menos linear. O comportamento rígido do solo, característico de solos lateríticos, pode ser atribuído à cimentação natural de seus constituintes. A diferença entre o terço médio e o topo, embora menos pronunciada que nos outros solos, sugere maior homogeneidade estrutural e menor efeito de atrito, possivelmente devido à maior coesão superficial.

A análise comparativa entre as leituras no terço médio e no topo revelou diferenças significativas para cada tipo de solo. No Solo 01, as deformações no topo foram, em média, 40% a 47% superiores às do terço médio.

Essa diferença foi ainda mais acentuada no Solo 02, atingindo até 100%. Já no Solo 03, a diferença variou entre 30% e 45%, similar ao Solo 01, mas com deformações absolutas mais baixas.

Observou-se que a deformação resiliente medida no terço médio dos cps é sistematicamente menor do que a registrada no topo. Esse comportamento está diretamente relacionado tanto à quantidade de material que efetivamente contribui para a deformação na região, quanto às características do estado de tensões. Observou-se que no terço médio, a leitura tende a refletir, de forma mais fiel, a deformação interna do material, minimizando os efeitos de contato, atrito e restrição nas placas de carregamento (base/top cap), que afetam as medições realizadas no topo.

No entanto, destaca-se que para a determinação do MR, com base na deformação medida no terço médio, é necessário que se conheça o estado de tensões (tensões principais σ_1, σ_2, σ_3) atuantes na região do corpo de prova. Isso porque a formulação do MR depende da diferença entre a tensão desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$) e da tensão de confinamento (σ_3), conforme o modelo clássico da mecânica dos pavimentos (Medina e Motta, 2015).

4. CONCLUSÃO

A pesquisa analisou a deformação resiliente de solos compactados na energia intermediária, variando teor de umidade e posição do aparato de ensaio, em conformidade com a DNIT 134/2018-ME. Os resultados mostraram que as leituras no terço médio representam de forma mais fiel o comportamento interno dos corpos de prova, minimizando efeitos de atrito e restrição observados no topo.

O Solo 01 apresentou maior potencial para uso em camadas de base e sub-base, devido à sua estabilidade e menor sensibilidade à umidade. O Solo 03, embora mais rígido, revelou limitações sob teores de umidade acima da ótima, enquanto o Solo 02 demonstrou elevada deformabilidade e forte dependência hídrica, restringindo sua aplicação em camadas estruturais.

Destaca-se que o estado de tensões ao longo do corpo de prova não é homogêneo, sendo o terço médio a região mais representativa, embora ainda exija validação por modelagem numérica ou instrumentação avançada. Para trabalhos futuros, recomenda-se a inversão do aparato (leituras iniciadas no topo e, posteriormente, no terço médio), de modo a avaliar se a sequência de medições em um mesmo corpo de prova influencia os resultados. Além disso, sugere-se ampliar as análises por simulação computacional e investigar outras tipologias de solos, consolidando critérios mais robustos para seleção de materiais em pavimentação.

Assim, reforça-se a priorização da instrumentação no terço médio, garantindo maior confiabilidade dos valores de MR aplicados em projetos mecanístico-empíricos e favorecendo dimensionamentos mais seguros, econômicos e duráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNIT (2018) Norma DNIT 134/2018 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design. 2. ed. Pearson.

Lekarp, F.; Isacsson, U.; Dawson, A. (2000). State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates. Journal of Transportation Engineering, v. 126, n. 1, p. 66-75. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66).

Medina, J. de; Motta, L. M. G. da. (2015). Mecânica dos pavimentos – 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 638 p.

Werkmeister, S.; Dawson, A. R.; Wellner, F. (2004) Pavement Design Model for Unbound Granular Materials. Journal of Transportation Engineering. Vol. 130, No. 5, September, 2004. ©ASCE, ISSN 0733-947X/2004/5- 665–674/$18.00. doi: 10.1061/~ASCE!0733-947X~2004!130:5~665. 2004.

Farias, M. L. A. e; Araújo, H. A. O.; Rodrigues, J. K. G. (2023). Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos. Transportes, v. 31, n. 1, p. 17-27, 2023. DOI: 10.58922/transportes.v31i1.27501.

Claudeny Santana, *Alexandre Medeiros* (claudeny.santana@pet.coppe.ufrj.br, alexandre.simas@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, PET, CT Bl H, sala 111, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ
Marcelino Aurelio Vieira da Silva, *Daniel Anijar* (marcelino@pet.coppe.ufrj.br, daniel.matos@ufms.br)
Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, PET. Professor, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, LATRAN, Engenharia Civil.

AVALIAÇÃO DE UM SOLO ARENO SILTOSO PARA USO COMO SUBLEITO DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Adrielle Nascimento Brito, Victor Henrique Pedreira Mascarenhas Pamponet, Bianca Costa Soares, Caroline Dias Amancio de Lima
Universidade Federal da Bahia

RESUMO
O presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de um solo como subleito para pavimentos flexíveis. O material, classificado como areno siltoso, é proveniente da cidade de Salvador/BA. A caracterização foi realizada por meio de ensaios laboratoriais tradicionais e de MR, conforme as normas do DNIT. O solo atendeu aos critérios de aceitação e foi utilizado no dimensionamento de uma estrutura de pavimento com base no método DNIT, que adota o índice ISC como parâmetro de suporte, sendo os demais dados referentes a materiais da própria região. Posteriormente, o solo foi submetido a análises de tensões e deformações utilizando o *software* AEMC, com base na quantidade de camadas e espessuras resultante do dimensionamento, variando-se os materiais utilizados nas camadas de revestimento, base e sub-base. O subleito foi analisado em quatro diferentes profundidades. O solo mostrou-se adequado para subleito e apresentou algumas tendências de desempenho mecânico.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O pavimento é uma estrutura formada por múltiplas camadas, tendo o subleito como sua fundação, geralmente constituído pelo material proveniente das operações de terraplenagem. Salienta-se que, assim como realizar a seleção adequada dos materiais das camadas é uma atividade essencial, também é importante fazer a devida caracterização e análise do material do subleito, que dará subsídio para as demais tomadas de decisões com relação ao restante da estrutura que virá sob ele. Todo esse processo de caracterização e análise visa garantir a estabilidade da estrutura pavimento e o seu bom desempenho ao longo do tempo.

Nesse contexto, destaca-se que manuais e normativas possuem indicações de ensaios e critérios a serem atendidos, bem como será necessário intervenções no subleito em situações mais complexas. Estes materiais técnicos, em especial do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), tem passado por atualizações ao longo dos últimos dez anos, como é possível observar no acervo disponível no site deles. Bernucci *et al.* (2009) comenta que os estudos geotécnicos desempenham um papel crucial na segurança e nas análises de capacidade de suporte das rodovias, possibilitando a identificação e classificação preliminar dos materiais disponíveis na região.

Dentre os métodos que são amplamente utilizados para determinar capacidade de suporte dos materiais para pavimentos diante às solicitações do tráfego, estão Índice de Suporte Califórnia (ISC) / *California Bearing Ratio* (CBR). Segundo Roza *et al.* (2018), o parâmetro ISC é utilizado no método de dimensionamento brasileiro desde a década de 1960, porém o mesmo critério descarta alguns solos tropicais, que geralmente consistem em materiais de textura fina e comumente são classificados como de comportamento sofrível a mau para camadas de pavimentos devido ao Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP).

Ainda no tocante à caracterização mecânica, além do ISC, é necessário realizar a caracterização das propriedades elásticas e plásticas, que tem sido realizada por meio de ensaios dinâmicos em equipamentos triaxiais de cargas repetidas que visam simular a repetição das forças de carregamento aplicadas pelo tráfego. O parâmetro de deformabilidade elástica que vem sendo utilizado é o Módulo de Resiliência (MR) que descreve a relação tensão-deformação do material sob aplicações cíclicas de carga (ROZA *et al.*, 2018). A importância de ensaios submetidos ao triaxial de cargas repetidas está relacionada à sua capacidade de viabilizar análises mecanísticas que simulam o comportamento dos materiais sob diferentes estados de tensão, tornando a simulação mais representativa das condições reais de campo.

Em resumo, como mencionado anteriormente, os principais sistemas tradicionais de classificação de solos baseiam-se na análise granulométrica e nos limites de plasticidade (limites de Atterberg), sem considerar as particularidades dos solos de regiões tropicais. Diante disso, foi desenvolvida a Classificação Miniatura, Compactada, Tropical (MCT), que fornece um embasamento mais adequado para a seleção de materiais nessas condições. Além disso, ressalta-se a crescente evolução e disseminação das análises de tensões e deformações em pavimentos. Ou seja, tanto a classificação e caracterização dos solos quanto essas análises

são essenciais para garantir que a estrutura do pavimento suporte adequadamente as cargas aplicadas e se comporte de forma eficiente diante das condições específicas do local.

Vale destacar que, mesmo antes do desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) pelo DNIT, que é mecanístico-empírico, já se reconhecia a importância de considerar a estrutura do pavimento de forma integrada. Essa abordagem envolve a análise dos diferentes materiais com base no MR, indo além do dimensionamento tradicional baseado no ISC. Assim, já se exigia em algumas ocasiões a realização de análises complementares, considerando as tensões e deformações resultantes da combinação entre os materiais e as espessuras adotadas em cada camada do pavimento.

Diversos estudos acadêmicos ainda se concentram nessa região da estrutura voltados para diferentes tipos de infraestrutura de transportes e analisando distintas variáveis, como os de: Campos *et al.* (2019) para ferrovia, Lima *et al.* (2022) para rodovias e Almeida *et al.* (2024) para aeroportos. Lima *et al*. (2022), por exemplo, concluíram, por meio de ensaios laboratoriais, de campo e simulações no programa Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que o subleito exerce influência significativa na estrutura do pavimento, reforçando a importância de não se ignorar suas propriedades.

Alinhado às ideias apresentadas, o presente estudo tem como objetivo central realizar a caracterização tradicional e mecânica, além da análise de tensões e deformações, de um solo da cidade de Salvador/BA, avaliando sua aptidão para uso como subleito de pavimento. Ademais, verificar sua influência a partir de simulações no programa AEMC, a partir de um dimensionamento prévio realizado com a metodologia DNER/DNIT que toma como base ainda o ISC.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em três etapas principais: (i) coleta de amostra e realização de ensaios laboratoriais; (ii) dimensionamento da estrutura pelo método DNER/DNIT, utilizando o ISC; e (iii) simulações computacionais no *software* AEMC para análises de tensão e deformação.

2.1. Programa experimental

As amostras de solo analisadas foram coletadas no município de Salvador, Bahia. A preparação do material seguiu as diretrizes das normas DNER 041/64 e NBR 6457:2016. Em seguida, as amostras foram separadas e preparadas conforme as normas técnicas vigentes para os ensaios de caracterização, listadas na Tabela 1, que também apresenta os respectivos resultados e as classificações dos solos (Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS, *Transportation Research Board* – TRB e MCT). Na Tabela 2 estão as informações provenientes do ensaio de MR.

Complementarmente, a Figura 1 apresenta a tabela e o gráfico da curva granulométrica, enquanto a Figura 2 exibe as curvas de compactação obtidas com base em duas normativas distintas (DNIT 164/2013 e DNIT 443/2023). Já a Figura 3 mostra registros fotográficos dos ensaios durante sua execução.

Tabela 1: Resultados da caracterização tradicional e classificação do solo deste estudo

Ensaio	Norma	Resultado
Limite de Liquidez (LL)	DER 122/94	36%
Limite de Plasticidade (LP)	DER 082/94	26%
Ensaio de Compactação Proctor	DNIT 164/2013	Wot = 14,2%, γd = 1,82 N/cm³
Índice Suporte Califórnia (ISC/CBR)	DNIT 172/2016	20%
Expansão	DNIT 172/2016	0,1%
Ensaio de Compactação em Tripartidos	DNIT 443/2023	Wot = 14,7%, γd = 1,90 N/cm³
Classificação SUCS	-	SM
Classificação TRB	-	A-2-4
Classificação MCT	DNIT 259/2023	NS’

Tabela 2: Resultados do MR médio e os parâmetros dos modelos de regressão simples e composto

MR Médio	$MR = k1.\sigma3^{k2}$ [MPa]			$MR = k1.\sigma d^{k2}$ [MPa]			$MR = k1.\sigma3^{k2}.\sigma d^{k3}$ [MPa]			
(MPa)	k1	k2	R^2	k1	k2	R^2	k1	k2	k3	R^2
139	271,91	0,24	0,55	165,22	0,09	0,10	313,71	0,48	-0,24	0,81

Fração do material		ABNT	ASTM
Pedregulho		9	3
Areia	Grossa	3	6
	Média	23	43
	Fina	33	20
Silte		9	15
Argila		23	13

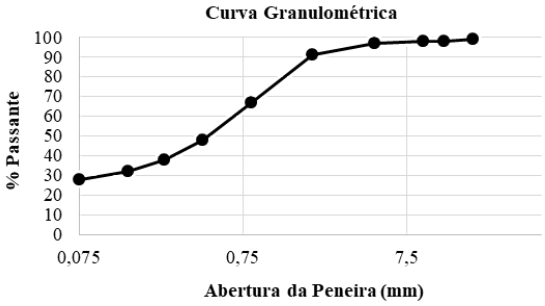


Figura 1: Composição granulométrica, pela ABNT e ASTM, e curva granulométrica do solo deste estudo

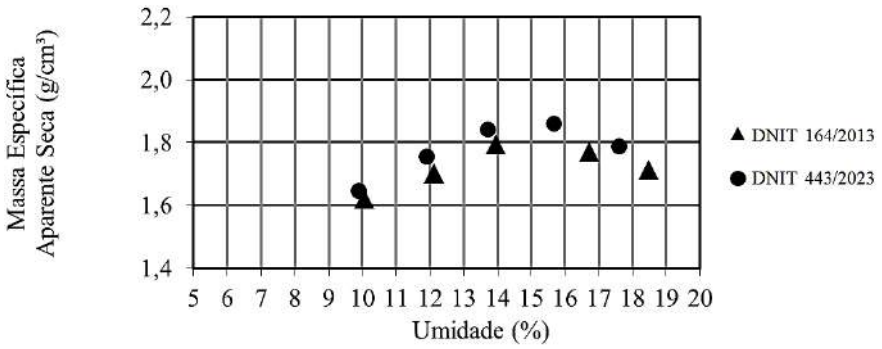


Figura 2: Curvas de compactação por duas normativas distintas (DNIT 164/2013 e DNIT 443/2023)

A realização de mais de um tipo de curva de compactação deveu-se ao fato de que a DNIT 164/2013 é voltada para obtenção de parâmetros utilizados no ensaio ISC, utilizando apenas a fração passante na peneira nº 10. Por outro lado, a DNIT 443/2023 se aplica aos ensaios em molde cilíndrico tripartido, que para este solo totalmente passante na peneira de 1" foi o de dimensões de 10 x 20 cm, permitindo a utilização de todo o material sem separação prévia. Para este material, os resultados de umidade ótima e massa específica aparente seca foram próximos. Todas as compactações foram realizadas com energia normal e os corpos de prova destinados aos ensaios de ISC e MR apresentaram variações de umidade de até ±0,3% em relação à umidade ótima determinada. Foram realizados dois ensaios de MR para obtenção dos valores deste trabalho.



Figura 3: Registros fotográficos dos ensaios realizados com o solo deste estudo

2.2. Dimensiomanto com ISC e simulações no AEMC

Para o dimensionamento, foi idealizada uma estrutura composta pelo subleito formado pelo solo aqui apresentado, uma sub-base de solo granular com ISC de 30%, uma base de material granular (BGS) e revestimento em concreto asfáltico. Considerou-se, ainda, uma taxa de crescimento anual do tráfego de 3,0% e uma vida útil de projeto de 10 anos, tendo o N equivalente a $N = 2{,}12 \times 10^7$.

A partir da estrutura obtida no dimensionamento, realizaram-se simulações no *software* AEMC (v.2.4.6), utilizando o MR no modo de comportamento linear, a fim de observar o desempenho do material como se tivesse aplicado em campo. Para cada camada, foram considerados dois tipos de materiais, mantendo-se o

subleito fixo e tráfego. As tensões resultantes no subleito foram avaliadas em quatro profundidades distintas, medidas a partir do topo do subleito: 0,50 m, 0,75 m, 1,00 m e 1,50 m. O objetivo foi analisar como diferentes materiais, caracterizados a partir do MR, influenciam o desempenho estrutural ao longo da profundidade do subleito, especialmente no solo utilizado neste estudo, mantendo as mesmas espessuras para comparação. Ao todo, foram realizadas oito simulações distintas, conforme apresentado na Tabela 3.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A amostra de solo foi classificada como SM (areia siltosa) segundo o sistema SUCS, e como A-2-4 pelo sistema HRB/TRB/AASHTO. A combinação dessas duas classificações (SM e A-2-4) converge para a conclusão de que o solo apresenta um comportamento bom como subleito em obras de pavimentação, conforme corroborado por Souza *et al.* (2021). Os demais resultados de caracterização, como MR de 139 MPa, estão condizentes com resultados na literatura para este tipo de solo (Lima, 2020), e as demais propriedades estão dentro dos critérios de aplicabilidade para subleito.

O dimensionamento com ISC resultou em revestimento, base e sub-base com as respectivas espessuras: 10, 15 e 15 cm. A Tabela 3 apresenta as soluções analisadas no AEMC, incluindo os valores de tensões, obtidos para as diferentes profundidades avaliadas no subleito. No gráfico da Figura 4 estão os resultados das deformações para as oito simulações.

Tabela 3: Tensões atuantes no centro do carregamento de um eixo padrão rodoviário para quatro profundidades do subleito (0,50 m, 0,75 m, 1,00 m e 1,50 m a partir do início da camada de subleito)

	Simulação	90 cm		115 cm		140 cm		190 cm	
		σ_d (MPa)	σ_c (MPa)	σ_d (MPa)	σ_c (MPa)	σ_d (MPa)	σ_c (MPa)	σ_d (MPa)	σ_c (MPa)
1	Revest. 1 Base 1 Sub-base 1	0,0341	0,0038	0,0217	0,0011	0,0146	0,0003	0,0075	0,000028
2	Revest. 1 Base 2 Sub-base 1	0,0341	0,0038	0,0217	0,0011	0,0146	0,0003	0,0075	0,000029
3	Revest. 1 Base 2 Sub-base 2	0,0340	0,0038	0,0217	0,0011	0,0146	0,0003	0,0075	0,000029
4	Revest. 1 Base 1 Sub-base 2	0,0340	0,0038	0,0217	0,0011	0,0145	0,0003	0,0075	0,000028
5	Revest. 2 Base 2 Sub-base 2	0,0387	0,0034	0,0237	0,0008	0,0155	0,0001	0,0077	0,00008
6	Revest. 2 Base 2 Sub-base 1	0,0387	0,0033	0,0237	0,0008	0,0155	0,0001	0,0077	0,00008
7	Revest. 2 Base 1 Sub-base 2	0,0384	0,0034	0,0236	0,0008	0,0154	0,0001	0,0077	0,00008
8	Revest. 2 Base 1 Sub-base 1	0,0384	0,0034	0,0236	0,0008	0,0154	0,0001	0,0077	0,00007

MR das camadas: Revestimento 1 = 6.000 MPa, Revestimento 2 = 3.000 MPa, Base 1 = 350 MPa, Base 2 = 250 MPa, Sub-base 1 = 200 MPa, Sub-base 2 = 180 MPa.

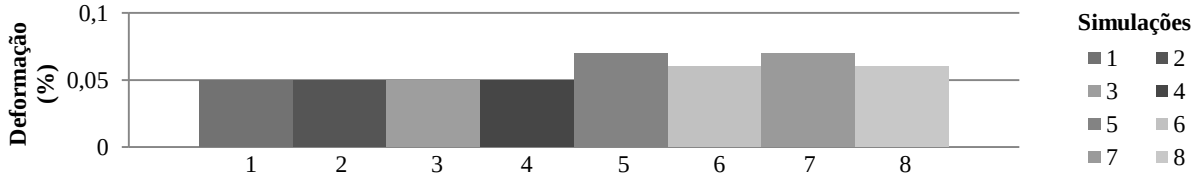


Figura 4: Deformações específicas principais (%) no topo do subleito (40 cm de profundidade)

Na Tabela 3 é possível identificar que tensões desviadoras e confinantes apresentaram redução à medida que a profundidade no subleito aumentava, sendo as maiores variações das tensão desvio observada nos primeiros 50 cm. Outro fato é que as simulações que utilizaram materiais com maiores valores de MR nas

camadas superiores apresentaram as menores tensões atuantes no subleito, enquanto aquelas com materiais de menor rigidez resultaram em maiores tensões nessa região. Esse tipo de tendência era esperada.

Cabe ressaltar que, para as soluções com mesmo MR de revestimento, as variações foram mínimas, concentrando-se na quarta casa decimal. Na maioria dos casos, as diferenças ocorreram apenas a partir da quinta casa decimal, com exceção da tensão confinante mais profunda, cujas variações se iniciaram a partir da sexta casa. Esses resultados indicam que, mesmo com alterações nas demais camadas, o revestimento, com MR de 3000 e 6000 MPa e espesssura de 10 cm, exerce papel significativo no desempenho da estrutura.

Com relação às deformações, conforme apresentado na Figura 4, verificou-se que praticamente não houveram variações. O aumento das deformações foi observado apenas nos cenários com redução da capacidade de suporte do revestimento, destacando-se as simulações 5 e 7, em que a sub-base possuía um MR de 180 MPa. Dessa forma, neste estudo de caso, a redução de 100 MPa no MR da base, quando comparada à sub-base com variação de MR de 20 MPa, teve impacto pouco significativo.

Embora os ensaios de ISC e MR indiquem desempenho satisfatório para uso em subleito, solos classificados como NS' ainda são pouco recomendados para pavimentação. Segundo a metodologia MCT, seu uso exige análise criteriosa, apresentando péssimo posicionamento no ranqueamento entre as classes de solo, que está vinculado ao risco de comportamento expansivo e comportamento sensível a locais sem a devida drenagem, sendo considerado inadequado/não recomendado para base e revestimento primário.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo com a análise de apenas um tipo de solo, o estudo destacou a importância da realização de ensaios mecânicos, como MR, para todos os materiais que compõem a estrutura do pavimento. As simulações, embora tenham apresentado valores baixos de tensões e deformações, evidenciaram que a profundidade e as propriedades dos materiais das camadas superiores influenciam diretamente as tensões atuantes no subleito.

De modo geral, o solo apresentou desempenho satisfatório nos ensaios e simulações, atendendo aos critérios de seleção, mesmo com compactação na energia normal. Apesar de classificado como NS', sua maior quantidade de argila comparado ao silte pode ser uma das justificativas do bom comportamento, sendo recomendadas análises complementares com o MeDiNa, como dimensionamento considerando MR e deformação permanente, e atenção no tipo de aplicação.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Chamada INCT 58/2022 (INCT-Infra).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, L. C. de; M. de O. Serafim e F. H. L. de Oliveria (2024) Comparação entre modelos 3D e 3D axissimétrico na análise de deformação vertical do subleito sob carga aeroportuária. In Anais XXVI Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) XLIX Reunião Anual de Pavimentação (RAPv).

Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta; J. A. P. Ceratti e J. B. Soares (2009) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros* (2ª. ed.). Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda.

Campos, P. C. O.; B. A. Silva e M. E. S. Marques (2019) Caracterização geotécnica dos solos de subleito ferroviário: investigações de campo e laboratoriais. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.6, p.178-193. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0016

Lima C. D. A. (2020) *Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas.* Tese (Doutorado). COPPE Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Lima, C. D. A.; M. O. Ubaldo; L. M. G. Motta e F. A. C. P. Franco (2022) Análise de módulo de resiliência de solos finos tropicais para avaliação e dimensionamento de pavimentos. In Anais XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG).

Roza, A. E. D.; C. D. A. Lima e L. M. G. Motta (2018) Avaliação da correlação entre o módulo de resiliência e a classificação MCT de solos finos argilosos. In Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET (Gramado, RS). Rio de Janeiro: ANPET.

Souza, R. M. de; S. C. A. Souza e C. H. C. Zanetti (2021). Avaliação de misturas asfálticas com diferentes teores de ligante betuminoso. Conhecimento em Construção, v. 2, n. 1, p. 85-100, 2021.

adrielle.brito@ufba.br; vhenrique@ufba.br; biacsoares2000@gmail.com; carolinedal@ufba.br

CARACTERIZAÇÃO DA DEFORMABILIDADE DE UM SOLO DE SUBLEITO DA BR-280/SC COM APLICAÇÃO DO MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO – MeDiNa

Guilherme Zoellmer Padza[1], **Adriana Goulart dos Santos**[2]
[1,2]Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

RESUMO
Este artigo tem o objetivo de avaliar as características da deformabilidade de um solo tropical da região sul do Brasil, bem como o acomodamento do material frente à teoria de *shakedown*. Adicionalmente, foram realizadas simulações de dimensionamento com esse solo no *software MeDiNa*, com o objetivo de compreender sua influência no afundamento por trilha de roda (ATR) e na determinação da espessura da camada de revestimento asfáltico. A amostra de solo foi classificada segundo a metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) como um Não Laterítico Argiloso (NG'). Através do dimensionamento de três seções tipos de pavimentos, verificou-se que este solo de subleito teve pouca contribuição para minimizar os danos por ATR. Neste sentido, o dimensionamento foi fortemente condicionado pela necessidade de um revestimento asfáltico robusto, capaz de suportar as elevadas solicitações de tráfego existentes na região.

1. INTRODUÇÃO

Os projetos de pavimentação rodoviária no Brasil ainda são, em grande parte, elaborados com base em métodos empíricos de dimensionamento, que utilizam como principal referência os resultados do ensaio CBR (*California Bearing Ratio*). Contudo, há um entendimento consolidado na literatura técnica de que tais métodos não refletem adequadamente as condições reais das solicitações dinâmicas impostas pelo tráfego, além de desconsiderarem o comportamento mecânico integrado das camadas do pavimento. Essa limitação compromete a vida útil das estruturas e acaba gerando custos extras com intervenções como restauração, reforço ou reconstrução (Guabiroba *et al*., 2023). Diante desse cenário, Medina e Motta (2015) destacam que a tendência dos principais centros de pesquisas em infraestrutura viária é adotar métodos mecanísticos-empíricos de dimensionamento, fundamentados em bases analíticas e experimentais consistentes, com foco na análise mecânica dos materiais.

Nesse contexto, destaca-se o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), atualmente em consolidação no Brasil. Este método fundamenta-se na determinação dos materiais e das espessuras ideais para cada camada do pavimento, considerando as características de tensão-deformação dos materiais, as quais são avaliadas a partir de modelos de desempenho. Após a definição da estrutura do pavimento e do tráfego, o sistema realiza os cálculos e avalia os danos acumulados ao longo do período de projeto da via, determinando o afundamento de trilha de roda (ATR) de todas as camadas granulares e a porcentagem de área trincada do revestimento (Franco e Motta, 2020).

É importante destacar que a ação das cargas de tráfego sobre o pavimento gera dois tipos de deformações: as permanentes, de natureza plástica, e as recuperáveis, de natureza elástica. A previsão dessas deformações em materiais granulares é realizada com base em modelos matemáticos de módulo de resiliência e de deformação permanente, determinados experimentalmente por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas (Medina e Motta, 2015). Especificamente, em relação ao solo de subleito, Norback (2018) aponta que, alguns solos brasileiros, embora apresentem baixos valores de CBR, revela materiais adequados para a pavimentação quando analisados pelo módulo de resiliência e pela deformação permanente.

Um outro conceito crucial no contexto do comportamento mecânico de solos e demais materiais granulares é o acomodamento plástico, também conhecido como *shakedown*. Guimarães (2009) abordou esse conceito em sua tese de doutorado, na qual avaliou esse comportamento para 14 tipos de solos tropicais. O autor explica que o estudo desse fenômeno é de grande importância para a engenharia rodoviária visto que, quando o pavimento entra em *shakedown*, ele possui uma condição estável às deformações permanentes, estabilizando os danos por ATR.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe avaliar a deformabilidade elástica e plástica de um solo de subleito, por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, em um trecho da duplicação da rodovia BR-280/SC. Adicionalmente, serão realizadas simulações de dimensionamento com esse solo no *software MeDiNa*, com o objetivo de compreender sua influência no afundamento por trilha de roda (ATR) e na determinação da

espessura da camada de revestimento asfáltico. Este estudo pretende contribuir para o enriquecimento do banco de dados nacional do *software* MeDiNa, ampliando o conhecimento sobre o comportamento de solos tropicais da região litorânea de Santa Catarina.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O solo utilizado neste estudo foi coletado no quilômetro 40 da BR-280/SC, no município de Araquari, Santa Catarina, e foi caracterizado fisicamente seguindo as normas vigentes. Para a determinação do módulo de resiliência foi seguida a norma DNIT 134/2018. A frequência aplicada foi de 1 Hz corresponde a duração do pulso de carga e é o que a norma supracitada indica. A amostra passou pela fase de condicionamento e, posteriormente, foram aplicados 18 pares de tensões com repetição de 10 ciclos de carga em cada par de tensões.

A partir disso, avaliou-se a relação entre o módulo de resiliência e as tensões aplicadas ao solo utilizando quatro modelos matemáticos. A análise estatística foi conduzida com o auxílio dos programas *Microsoft Excel* e *OriginPro 2025*, sendo este último usado para a análise de regressão não linear, que resultou na geração de uma superfície tridimensional representativa do comportamento resiliente do solo.

Para a determinação da deformação permanente foi seguida a norma DNIT 179/2018. A frequência aplicada foi de 2 Hz corresponde a duração do pulso de carga e é o que a norma supracitada indica. Foram ensaiados nove corpos de prova, sendo que cada um foi submetido a 150.000 ciclos de aplicação de carga para cada par de tensão, conforme também é indicado pela norma. Para a análise dos resultados, utilizou-se o modelo matemático proposto por Guimarães (2009), para descrever o comportamento da deformação permanente do solo. Os coeficientes de regressão foram obtidos por meio de regressão não linear múltipla, com o auxílio do *software OriginPro 2025.*A análise do *Shakedown* foi feita por meio da taxa de crescimento de deformação permanente, conforme a aplicação dos ciclos de carga, e foi realizada após a realização do ensaio de deformação permanente. Desse modo, foram plotados gráficos que demonstraram o comportamento do material quanto a sua deformabilidade, podendo ser identificada ou não a ocorrência de *Shakedown*.

O dimensionamento mecanístico-empírico foi realizado por meio do *software MeDiNa* com a finalidade de avaliar a contribuição do solo de subleito da BR 280/SC, quando parte da estrutura de pavimentos, na redução dos danos por ATR. A fim de efetuar uma análise comparativa dos danos por ATR, foram simuladas 3 seções-tipo de estruturas de pavimentos com materiais para as camadas de revestimento, base e sub-base fixas, cujas características físicas e de comportamento mecânicos foram extraídos dos estudos de Chiarello (2020). Já para o subleito, foram consideradas as características físicas e mecânicas do solo estudado nesta pesquisa, como também um solo de reforço de subleito do tipo solo NG' com adição 5% de cal do estudo de Medeiros (2017) e um solo laterítico argiloso (LG') do estudo de Veloso (2020). O número N calculado foi de $8{,}69 \times 10^7$, com base em dados de volume de tráfego da região de implantação da rodovia.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com relação à caracterização do solo, a análise granulométrica apresentou coeficiente de uniformidade mediana de 7,6. A massa específica real dos grãos de 2,98 g/cm^3. O limite de liquidez de 55%, limite de plasticidade de 34% e um índice de plasticidade de 21. A umidade foi de 29,35% e a massa específica aparente seca máxima de 1,60 g/cm^3, valores obtidos na energia modificada de compactação. O solo foi classificado como um A-7-5 através da classificação TRB e como um Não Laterítico Argiloso (NG') através da classificação MCT.

Ao analisar os dados da Tabela 1, verifica-se que o modelo Arenoso-Argiloso (em função da tensão desvio) e o Modelo Composto (em função das tensões desvio e confinante) apresentaram os melhores coeficientes de determinação (R^2) para a previsão do módulo de resiliência, evidenciando que a tensão desvio exerceu significativa influência sobre o comportamento resiliente deste solo.

Tabela 1: Valores do coeficiente de regressão para o módulo de resiliência

Modelo	k1	k2	k3	R^2
Arenoso (σ_3)	41,199	-0,2021	-	0,30

Arenoso-Argiloso (σ_d)	40,001	-0,2617	-	0,92
Arenoso-Argiloso (θ)	50,229	-0,2796	-	0,62
Composto (σ_3; σ_d)	61,923	0,1296	-0,2677	0,98

A Figura 1 apresenta o gráfico tridimensional gerado por meio de regressão não linear, realizada no *software OriginPro 2025*, em que MR corresponde ao módulo de resiliência, TC à tensão confinante e TD à tensão desviadora. Foram obtidos valores de módulo de resiliência variando entre um máximo de 123,2 MPa, um mínimo de 56,3 MPa e uma média de 77,2 MPa.

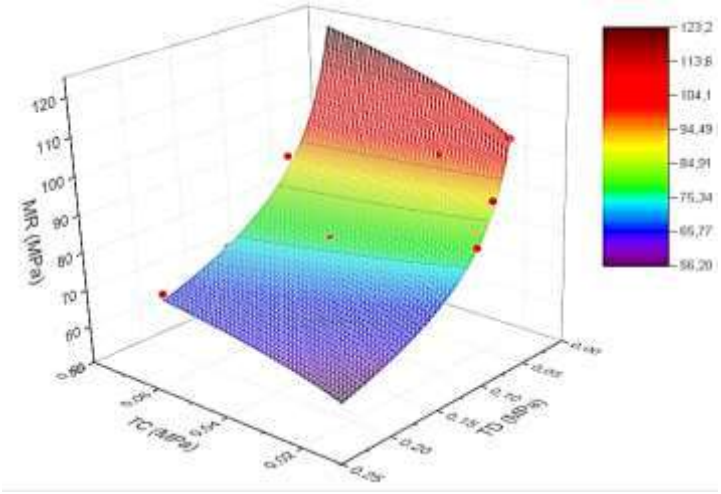


Figura 1: Representação gráfica do modelo composto para a determinação do comportamento resiliente do solo

A Figura 2 ilustra as curvas determinadas para os 9 corpos de prova ensaiados, onde o eixo das abscissas representa o número de ciclos (até 150 mil ciclos) e o eixo das ordenadas representa a deformação permanente em porcentagem.

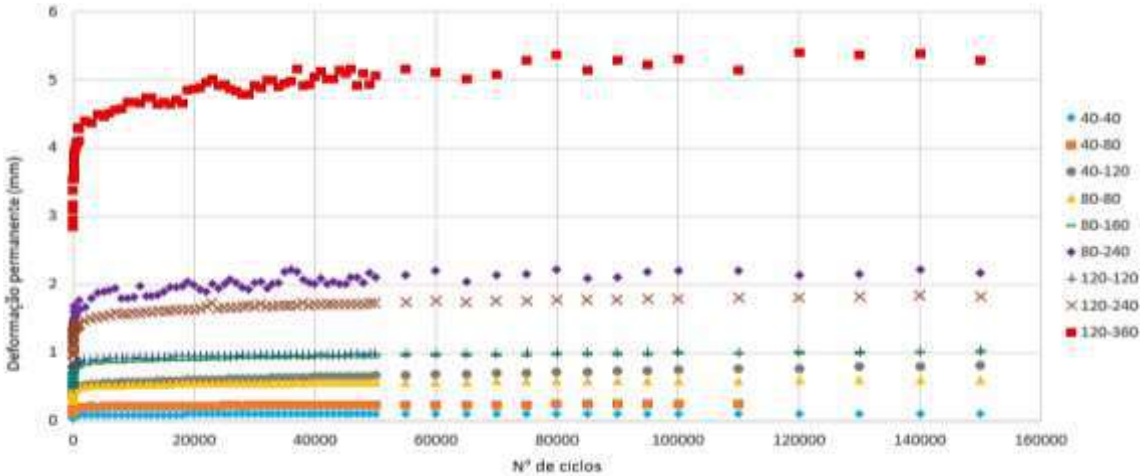


Figura 2: Resultado do ensaio de Deformação Permanente

A partir do modelo proposto por Guimarães (2009), obteve-se os coeficientes de regressão, conforme apresentados na Tabela 2, com um coeficiente de determinação de 0,97.

Tabela 2: Valores do coeficiente de regressão para DP

Modelo	**ψ1**	**ψ2**	**ψ3**	**ψ4**	**R²**
Guimarães (2009)	10,339	-0,04939	2,0606	0,04829	0,97

Em relação a ocorrência do *shakedown*, na Figura 3, são apresentadas as taxas de crescimento da DP do solo. Observa-se que, apenas o primeiro par de tensões (40-40) apresenta uma taxa de acréscimo da deformação permanente na ordem de 10^{-7} metros por ciclo de carga, caracterizando, portanto, a ocorrência efetiva do *shakedown*, classificado como tipo A conforme a descreve norma DNIT 179/2018. Verifica-se ainda que, os pares de tensões 40-80, 80-80, 80-160, 120-120 e 120-240, com base na tendência das curvas, também tendem a entrar em estado de acomodação plástica. No entanto, para os pares 40-120, 80-240 e 120-360, seria necessário prolongar o número de ciclos do ensaio além dos 150 mil realizados, possivelmente até 200 mil ciclos, para confirmar a estabilização, sendo necessária, portanto, a repetição do ensaio para maior segurança nos resultados.

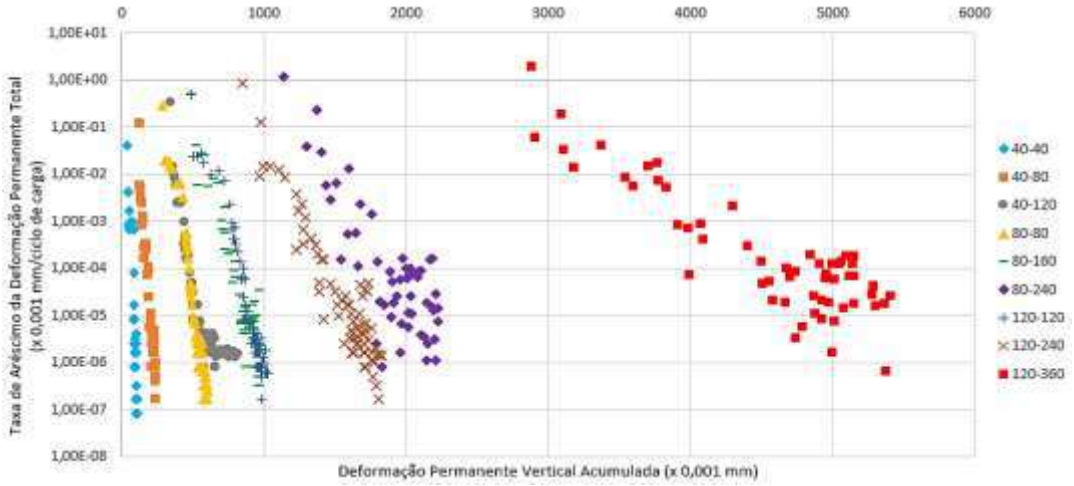


Figura 3: Análise da ocorrência de *shakedown*

A tabela 3 apresenta a espessura das camadas de revestimento e danos por ATR para as três seções-tipos propostas para a análise de dimensionamento. Concluiu-se que a camada de reforço do subleito com a utilização de solo-cal apenas reduziu em 0,43 mm o afundamento por trilha de roda (ATR) em comparação com o solo NG' desta pesquisa, o que não foi suficiente para a diminuição da espessura do revestimento. Já com a utilização do solo LG', praticamente não teve influência no ATR em comparação com o solo NG' e a espessura do revestimento foi reduzida em apenas 4,1 cm, uma diferença considerada muito pequena.

Tabela 3: Resumo dos resultados do dimensionamento para as três seções-tipo

Característica	Aterro de solo NG' (solo desta pesquisa)	Reforço com solo NG'+ 5% cal (Medeiros, 2017)	Aterro de Solo LG' (Veloso, 2020)
Espessura do revestimento asfáltico (cm)	12,60	12,60	8,50
Espessura do revestimento asfáltico (cm)	15,00	15,00	15,00
Afundamento de trilha de roda do subleito (mm)	3,12	2,69	3,06

4. CONCLUSÃO

Foram realizadas análises de deformabilidade elástica e plástica de um solo tropical da região sul do Brasil classificado como um solo NG'. O MR médio foi de 72,2 MPa. Em relação a DP, foi observado uma deformação máxima foi menor que 6 mm (para o par de tensões 120-360), considerada admissível para projetos de pavimentos, uma vez que está dentro dos limites estabelecidos para o afundamento por trilha de roda.

A análise do *shakedown* revelou que o solo apresentou, principalmente, comportamento "B", com taxas de crescimento de deformação permanente entre 10^{-6} e 10^{-7}, o que indica que neste ensaio, 8 CP's não apresentaram acomodamento das deformações e que se o ensaio tivesse continuado, a chance de estabilização

seria grande, tendo em vista o comportamento deformacional do solo. Apenas 1 CP apresentou acomodamento das deformações.

Através do dimensionamento das três seções tipos de pavimentos, verificou-se que o solo de subleito teve pouca contribuição para minimizar os danos por ATR. Neste sentido, o dimensionamento foi fortemente condicionado pela necessidade de um revestimento asfáltico de maior espessura, capaz de suportar as elevadas solicitações do tráfego muito pesado existentes na região. Por fim, este estudo contribuiu significativamente para o conhecimento do comportamento tensão-deformação do solo estudado, fornecendo informações valiosas para o projeto e a construção de pavimentos mais duráveis e seguros na região sul do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNIT (2018) Norma DNIT 134/2018 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNIT (2018) Norma DNIT 179/2018 – IE: Pavimentação – Solos – Determinação de deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Chiarello, G. P.; Pascoal, P. T.; Santos, T. A.; Pereira, D. S.; Baroni, M.; Gering, R. P. (2020) Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do DNER (1981) e MeDiNa (2019): estudo de caso da duplicação da BR-287 – trecho Santa Cruz do Sul a Tabaí/RS. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341654525. (Acesso em: 02/04/2025).

Franco, F. A. C. P.; Motta, L. M. G. (2020). Manual para utilização do Método Mecanístico- Emprírico MeDiNa Apresentação dos programas. Rio de Janeiro: UFRJ; DNIT.

Guabiroba, J. V. O.; Rezende, L. R.; Barroso, L. X.; Silva, J. P. S. (2023) Estudo da fadiga e da deformação permanente de misturas asfálticas produzidas em Goiás. Matéria (Rio de Janeiro), v. 28, n. 1, e1332, 2023. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/RDFynNhwtBB8RkQPS8R9NMh/. (Acesso em: 27/04/2025).

Guimarães, A. C. R. (2009). *Um método Mecanístico-Empirico para previsão de deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

Medeiros, A. A. L. (2017) *Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-08082018-170427 (Acesso em: 08/06/2025).

Medina, J.; Motta, L. M. G. (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 620 p.

Norback, C. (2018) *Caracterização do módulo de resiliência e da deformação de três solos e misturas solo-brita*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

Veloso, R. A. S. (2020) Avaliação de solos tropicais para uso em pavimentos com base nos parâmetros mecanísticos. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 77121–77139. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/14230/11846 (Acesso em: 01/05 2025)

Guilherme Zoellmer Padza (guilherme.pazda@edu.udesc.br)
Adriana Goulart dos Santos (adriana.santos@udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil.
Rua Paulo Malschitzki, 200, Zona Industrial Norte, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

COMPORTAMENTO NÃO-RECUPERÁVEL DE TRÊS SOLOS DE GOIÁS: UM ESTUDO BASEADO NA CLASSIFICAÇÃO MCT E EM CURVAS MESTRAS

Bruno Cavalcante Mota[1], Lara Batista Ferreira de Lima[2], Karolayne Peres de Melo[2], Mariluce de Oliveira Ubaldo[1], Lilian Ribeiro de Rezende[2]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Este artigo avaliou três solos do estado de Goiás quanto à deformação permanente (DP), empregando o método otimizado DP S, que utiliza curvas mestras com número reduzido de ciclos para sua previsão. O objetivo geral foi verificar a aplicabilidade do método DP S e a correlação com a classificação MCT. Os materiais também foram classificados segundo o regime de *shakedown*. Os resultados indicaram que solos classificados como arenosos apresentaram melhor desempenho, enquanto a elevada porcentagem de silte esteve associada ao aumento da DP. Observou-se ainda tendência ao acomodamento nos materiais estudados, com valores de DP inferiores a 5%, demonstrando a possibilidade de uso em camadas granulares de pavimentos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil, com dimensões continentais, apresenta grande diversidade pedológica. Devido ao clima tropical, muitos solos possuem comportamento laterítico, o que limita a aplicabilidade das classificações tradicionais como a da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Para suprir essa limitação, foi desenvolvida a metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), proposta por Nogami e Villibor (1991). No entanto, a classificação geotécnica isolada não é suficiente para definir a viabilidade de aplicação de solos e materiais granulares em camadas de pavimentos. Por isso, o Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) recomenda a realização de ensaios triaxiais, como o Módulo de Resiliência (MR) e a Deformação Permanente (DP). A DP é usualmente avaliada por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, considerando tensões de confinamento e teores de umidade específicos. Esses ensaios subsidiam o desenvolvimento de modelos constitutivos para previsão do comportamento dos materiais. A resposta à DP depende de múltiplas variáveis, como estado de tensões, número de ciclos, reorientação das tensões principais, umidade, distribuição granulométrica e grau de compactação (Lekarp et al., 2000). No Brasil, a norma IE 179 (DNIT, 2018a) estabelece a realização de nove pares de tensões com até 150.000 ciclos por par, adotando o modelo de Guimarães (2009), implementado em softwares como MeDiNa e FlexPaveBR.

Apesar de sua relevância, o programa experimental é demorado, podendo demandar cerca de 10 dias por material (a 2 Hz). Lima (2020) propôs a redução para seis pares de tensões em materiais pouco deformáveis. Cabral et al. (2021) observaram o comportamento de materiais que se acomodaram antes de 10.000 ciclos. Silva et al. (2021) identificaram que, em certos casos, 90% da deformação plástica total ocorre até os 50.000 ciclos. Com base nesses estudos, Mota et al. (2024) desenvolveram um protocolo otimizado, com uso de curvas mestras e redução para 10.000 ciclos por par de tensões, excetuando-se o mais severo, mantido até 150.000 ciclos. A proposta resultou em até 70% de economia de tempo, sem prejuízo de acurácia. Contudo, ainda é necessário investigar a aplicabilidade em diferentes tipos de solos. Diante dessa necessidade, este estudo, investiga o comportamento não-recuperável de três solos com diferentes características, oriundos do estado de Goiás, relacionando os resultados com suas classificações MCT.

2. MÉTODO DE PESQUISA

Para esta pesquisa, foram analisados 3 materiais do estado de Goiás com distintas características físicas e mecânicas. A Figura 1 mostra a localização dos três solos. A Tabela 1 apresenta as informações sobre granulometria, umidade ótima ($h_{ót}$), energia de compactação, MR médio e massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$), assim como os trabalhos de referência que realizaram a caracterização dos materiais. Os ensaios de MR e DP foram desenvolvidos no contexto da tese em andamento de Mota (2025) e utilizaram um equipamento de carga triaxial repetida seguindo as normas brasileiras ME 134 (DNIT, 2018b) e IE 179 (DNIT, 2018a), respectivamente. No ensaio de DP, os corpos de prova produzidos no teor de umidade ótima foram submetidos a uma frequência de 2 Hz (120 ciclos por minuto, com pulso de 0,1 s e repouso de 0,4 s) e um mínimo de 10.000 ciclos para cada estado de tensão, com exceção do mais severo, que foi conduzido até 150.000 ciclos, conforme proposto por Mota et al. (2024).

Tabela 1: Características dos materiais

ID	Ref.	Granulometria (%) Argila/Silte/Areia/ Pedregulho	$MR_{médio}$ (MPa)	Classificação MCT	Classificação AASHTO	$MEAS_{máx}$ (g/cm³)	$h_{ót}$(%)	Energia de compactação
S1N	Freitas et al. (2020)	0/21/70/9	110,00	NS'	A-4	1,80	13,4	Normal
S2I	Lima et al. (2023)	14/8/33/45	164,00	LA'	A-2-6	1,97	11,5	Intermediária
S3N	Lima (2025)	42/31/25/2	191,00	LG'	A-4	1,42	26,0	Normal

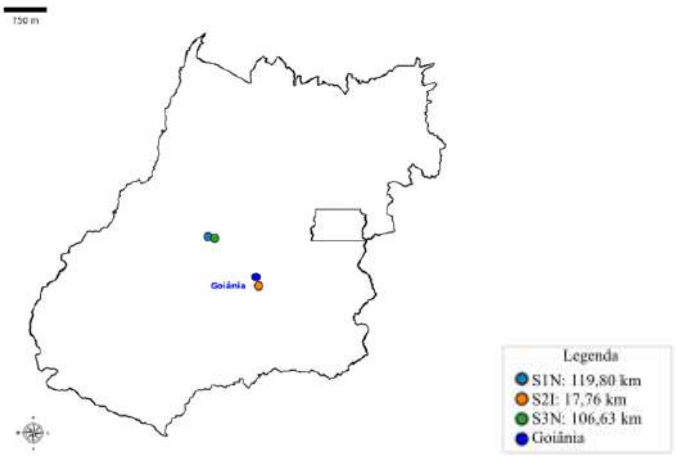


Figura 1: Localização e distância dos solos até Goiânia

2.1. Método otimizado DP S

O método DP S se baseia na redução de ciclos, mas principalmente na superposição de número de ciclos com a severidade do ensaio (par de tensões). Ou seja, na observação do comportamento de solos e materiais granulares, um material submetido a um estado de tensões mais severo apresentará o mesmo comportamento observado sob um estado menos severo, desde que o número de ciclos seja proporcionalmente reduzido, e inversamente. A partir disso, se observou que os ensaios propostos estavam superpostos numa curva mestra, o que permitiu ajustar número de ciclos de modo a remover a superposição, mantendo apenas a condição mais severa com 150.000 ciclos e as demais com menos repetições, uma vez que os resultados transladam para compor a curva. A Equação 1 apresenta a formulação adotada para o cálculo do parâmetro S, onde σ_3 é a tensão confinante e σ_d é a tensão desvio. Nela, a tensão confinante é dividida pela menor tensão aplicada (40 kPa), sendo o resultado elevado ao coeficiente de regressão, s_1. Em seguida, a razão entre as tensões desvio e confinante é elevada ao coeficiente s_2. Com isso, a DP pode ser estimada pela Equação 2. Os coeficientes s_1, s_2, a_1, a_2 e a_3 são obtidos via método iterativo, utilizando o *solver* do Excel para minimizar o erro quadrático entre os valores experimentais e os calculados. Essa etapa antecede a construção da curva mestra. O número de ciclos (N) também é considerado. O modelo foi implementado em uma planilha Excel composta por quatro abas: (i) cálculo da DP S; (ii) curva mestra de referência; (iii) curvas mestras para todos os pares; e (iv) modelo de Guimarães.

$$S = \left(\frac{\sigma_3}{0{,}4}\right)^{s_1} \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3}\right)^{s_2} \quad (1)$$

$$DP\ S = a_1 \times S^{a_2} \times N^{a_3} \quad (2)$$

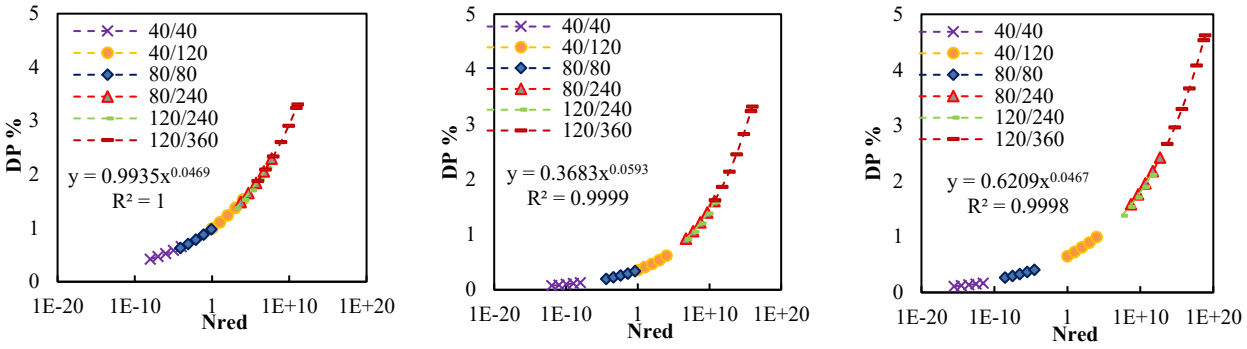
Na primeira aba, alimenta-se a planilha com os dados do ensaio triaxial. A partir disso, são calculados os valores de S e DP S. O solver é acionado para ajustar os coeficientes de forma que os resultados do modelo se aproximem dos experimentais, obtendo-se também o coeficiente de determinação (R^2). Na segunda aba, os coeficientes otimizados são utilizados para transladar os pares de tensões, atribuindo fator de translação (FT) igual a 1 para o par de referência e valores ajustados para os demais. Assim, obtém-se a curva mestra em torno do par de referência 40/120. Com isso, calcula-se o número de ciclos reduzidos (N_{red}) pela Equação 3, em função dos FTs e do número de ciclos aplicados. Finalmente, as DP extraídas das curvas mestras são transferidas para a aba do modelo de Guimarães. O solver é novamente utilizado para ajustar os coeficientes do modelo, com base nos valores previstos pelas curvas mestras, otimizando a representação da deformação

permanente em diferentes condições de carregamento.

$$N_{red} = N \times FT \quad (3)$$

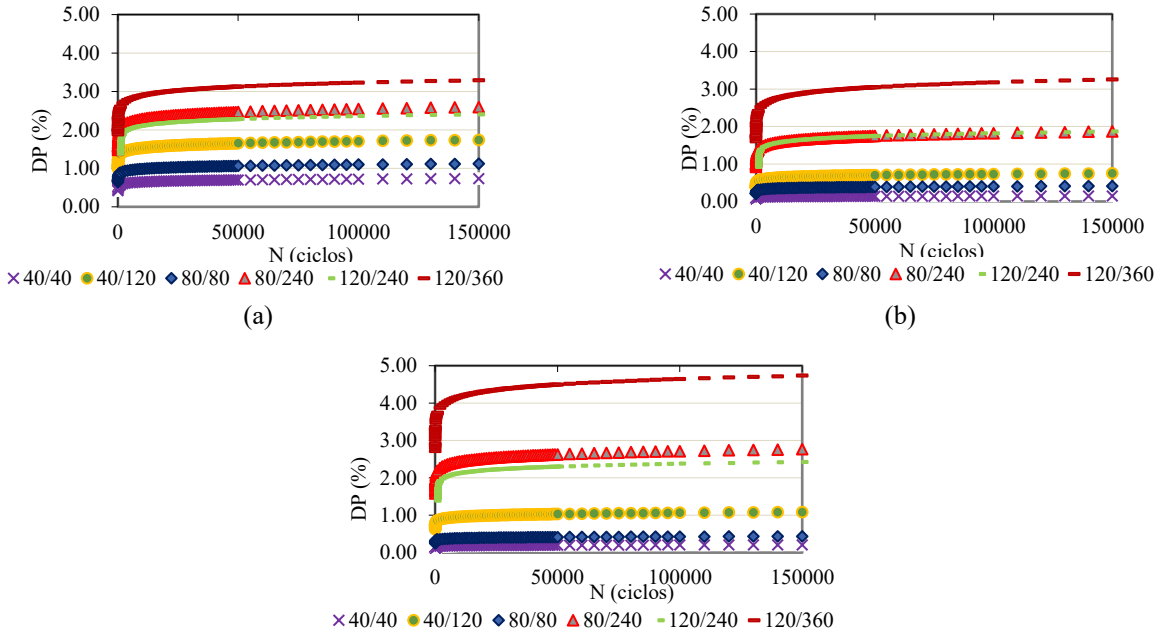
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios triaxiais de DP, foram geradas as curvas mestras, conforme descrito na seção de métodos, considerando o par 40/120 como referência. A Figura 2 apresenta as curvas mestras de referência para cada solo testado. Com a curva mestra de referência, foram obtidos os FTs da demais curvas e, na sequência, obtidos os parâmetros do modelo de Guimarães (2009). A Figura 3 apresenta as DPs preditas pelas curvas mestras para os pares de tensões ensaiados. A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos para o modelo de DP considerado.



(a) (b) (c)

Figura 2: Curvas mestras para o par de referência 40/120 para os materiais (a) S1N, (b) S2I e (c) S3N



(a) (b)

(c)

Figura 3: DP prevista para os materiais (a) S1N, (b) S2I e (c) S3N

Tabela 2: Parâmetros do modelo de Guimarães (2009) para a DP dos solos ensaiados

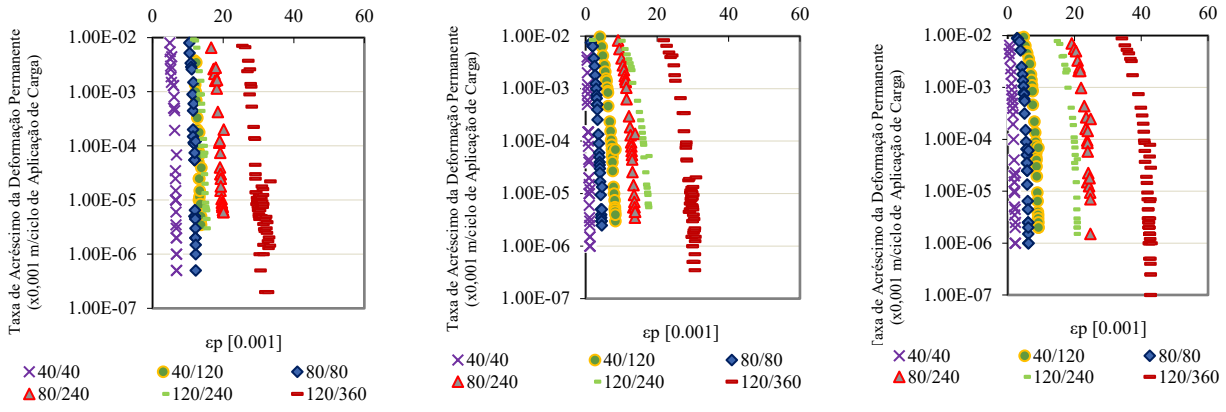
Parâmetro	S1N	S2I	S3N
ψ_1	0,7228	0,2751	0,3454
ψ_2	-0,1902	-0,0220	-0,3198
ψ_3	0,7734	1,3793	1,6547
ψ_4	0,0469	0,0593	0,0467
R^2	0,92	0,97	0,98

O material granular S2I apresentou o melhor desempenho em termos de DP, contribuído pela energia de compactação superior à aplicada aos materiais S1N e S3N. Destacou-se também por sua maior suscetibilidade

ao tráfego, evidenciada pelo parâmetro ψ_4 do modelo de Guimarães (2009). Observou-se ainda que, diferentemente dos demais materiais, a aplicação de baixas tensões confinantes não resultou em aumentos significativos da deformação permanente, comportamento atribuído à granulometria mais graúda do solo. O material S1N, embora tenha apresentado baixo valor médio de MR, não desenvolveu deformações permanentes expressivas. Já o material S3N apresentou os maiores coeficientes de sensibilidade às tensões confinante e desvio, além dos maiores valores de DP entre os materiais analisados. Sua curva mestra indicou um espectro mais amplo de N_{red}, sugerindo maior variação da DP em função da razão de tensões aplicadas. A Figura 2 apresenta as curvas mestras de referência para cada solo testado. Com a curva mestra de referência, foram obtidos os FTs da demais curvas e, na sequência, obtidos os parâmetros do modelo de Guimarães (2009). A Figura 3 apresenta as DPs preditas pelas curvas mestras para os pares de tensões ensaiados. A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos para o modelo de DP considerado.

Ao analisar a classificação MCT dos materiais, observa-se que o solo S2I, classificado como LA', apresentou o melhor desempenho. Resultados semelhantes foram identificados por Lima et al. (2025), que investigaram a deformação permanente de 11 solos e materiais granulares e constataram que os dois materiais classificados como LA' apresentaram os menores valores de deformação permanente, corroborando os achados do presente estudo. Ubaldo et al. (2018) monitoraram o desempenho de trechos experimentais em uma rodovia de baixo volume de tráfego e observaram que as estruturas de pavimento construídas com solo arenoso laterítico apresentaram baixas deformações permanentes.

O material de pior desempenho foi o S3N, classificado como LG'. Apesar de apresentar comportamento laterítico, esse solo possui um teor de silte superior ao do S1N (NS'), com 31% contra 21%, respectivamente. O silte é constituído por partículas finas com baixa coesão e reduzida resistência ao cisalhamento, o que favorece a reorientação das partículas sob carregamentos repetidos. Como resultado, solos com maior teor de silte tendem a não apresentar acomodação (*shakedown*) em ensaios triaxiais de carga repetida, acumulando deformações permanentes ao longo dos ciclos. Nesse contexto, a Figura 4 apresenta as curvas de *shakedown* obtidas para os três solos avaliados.



(a) (b) (c)

Figura 4: Curvas de *shakedown* para os materiais (a) S1N, (b) S2I e (c) S3N

Observa-se que os três materiais apresentam comportamento de *shakedown* classificado como tipo A, B e AB. Embora o solo S3N atinja o regime de *shakedown*, os valores de deformação permanente acumulada são superiores aos dos demais solos. O material com maior suscetibilidade a não atingir o *shakedown* foi o S1N, especialmente no par de tensões 120/360, em que não se verifica um paralelismo completo em relação ao eixo da taxa de acréscimo da deformação permanente. Com base nos ensaios realizados, o ranqueamento dos materiais quanto à classificação MCT é: LA' > NA' > LG', o que está de acordo com Ubaldo et al. (2018) e Lima et al. (2025). Ressalta-se que as energias de compactação aplicadas diferiram entre os materiais, sendo o solo S2I compactado com energia superior por ser utilizado como sub-base, enquanto os demais foram avaliados como materiais de subleito, considerando que maiores energias de compactação podem contribuir para maior estabilidade do material.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou três solos do estado de Goiás, com distintas características granulométricas, quanto à deformação permanente, regime de *shakedown* e classificação segundo a metodologia MCT. Verificou-se que o solo classificado como LA' compactado com energia intermediária, com maior teor de pedregulho, apresentou os menores valores de deformação permanente. Entre os solos compactados com energia normal, aquele com maior porcentagem de silte e classificado como LG' demonstrou o pior desempenho. Ainda assim, todos os materiais analisados apresentaram deformações permanentes inferiores a 5% da altura do corpo de prova, atendendo aos critérios normativos brasileiros para aplicação em camadas granulares de pavimentos. As curvas mestras indicaram, pelo espectro de N_{red}, que o solo S3N apresentou maior variabilidade na resposta de deformação permanente.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Chamada Universal 01/2023, da Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio da Fapesp, processo n° 2024/11269-5 e do Cenpes/Petrobras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cabral, W. S.; Barroso, S. H. A.; Silva, S. A. T. (2021) Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos. Matéria, v. 26, n. 4, pp. 1-15.

DNIT (2018) 179/2018-IE Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.

DNIT (2018) 134/2018 - ME: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR

Freitas, J. B.; Rezende, L. R.; Gitirana Jr., G. F. N. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. Engineering Geology, v. 270, p. 105580. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580.

Guimarães, A. CR. (2009) Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Lekarp, F.; Isacsson U.; Dawson, A. (2000) State of the art. II: permanent strain response of unbound aggregates. Journal of Transportation Engineering, v. 126, n. 1, pp. 76-83.

Lima, C.D.A. (2020) Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Lima, C.D.A.; Motta, L.M.G.; Guimarães, A.C.R.; Mota, B.C.; Aragão, F.T.S. (2025) Investigation of the Deformability of Sandy Soils for Pavement Layers under Repeated Load Triaxial Tests. Construction and Building Materials, v. 477, p. 141367.

Lima, L. B. F.; Silva, J. P. S.; Rezende, L. R. (2023). Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Geotechnics, v. 43, p. 101103. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101103

Lima, L. B. F. (2025). Estudo do Efeito de Flutuações de Umidade e Sucção no Módulo de Resiliência e na Deformação Permanente de Materiais Tropicais de Subleito. Tese de Doutorado (em andamento). Universidade Federal de Goiás.

Mota, B.C.; Ubaldo, M.O.; Lima, C.D.A.; Nascimento, L.A.H.; Aragão, F.T.S. (2024) Optimized characterization of the permanent deformation of unbound soils and granular materials considering the master curve concept. Transportation Geotechnics, v. 47, p. 101291.

Mota, B. C. (2025) Comprehensive Modeling of Permanent Deformation in Soils and Granular Materials. Tese de Doutorado (em andamento). Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Nogami, J. S., Villibor, D. F. (1991) Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses. Geotechnical And Geological Engineering, v. 9, n. 3-4, pp. 167-182.

Silva, M. F.; Ribeiro, M. M. P.; Furlan, A. P.; Fabbri, G. T. P. (2021) Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. Transportation Geotechnics, v. 26, p. 100443.

Ubaldo, M.O.; Motta, L.M.G.; Fritzen, M.A., Franco, F.A.C.P. (2018) Comparação entre avaliação de campo e o método de dimensionamento nacional em relação à deformação permanente. Revista Estradas, v. 23, pp. 29-37.

bruno.mota@coc.ufrj.br; lara.batista@ufg.br; karolaynepm@ufg.br; mariluce_ubaldo@yahoo.com.br; lrezende@ufg.br

DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLO LATERÍTICO ESTABILIZADO COM CAL HIDRATADA E RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO

Manoel Leandro Araújo e Farias, John Kennedy Guedes Rodrigues, Ana Letícia Feitosa de Macêdo, Arthur dos Santos Souza, Felipe Borges de Oliveira, Arthur Nóbrega de Sousa, João Pedro Silveira Salustiano, Paulo Germano Tavares Marinho Filho, Jonny Dantas Patrício, Pedro Raimundo Santana Junior
Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO
Este estudo avaliou a estabilização de um solo laterítico com cal hidratada e resíduo de polimento de porcelanato (RPP) para aplicação em pavimentos sustentáveis. Métodos incluíram ensaios de compactação Proctor, resistência à compressão simples (RCS) e tração indireta (RTCD), com corpos de prova curados por 7 dias. A cal promoveu ganhos superiores de resistência devido a reações químicas efetivas, enquanto o RPP ofereceu melhorias parciais, atuando predominantemente por redistribuição física de partículas. Ambos os aditivos alteraram as propriedades de compactação do solo. O RPP destacou-se como alternativa viável ambientalmente, transformando resíduos industriais em recursos para obras geotécnicas. Conclui-se que, embora menos eficaz que a cal, o RPP apresenta potencial estratégico sustentável, demandando estudos com cura prolongada para otimização.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os pavimentos asfálticos são formados por quatro camadas, sendo base, sub-base e reforço do subleito responsáveis pela dissipação das tensões do tráfego e exigindo bom desempenho mecânico (Bernucci *et al.*, 2010). Solos naturais como os lateríticos, embora abundantes (cerca de 19% da superfície terrestre — Farias, 2023), apresentam alta plasticidade, baixa resistência e difícil compactação, limitando seu uso direto (Portelinha *et al.*, 2012; Amadi, 2012). Nesse contexto, sua estabilização representa uma alternativa viável.

A cal hidratada é amplamente empregada para melhorar as propriedades desses solos, promovendo reações pozolânicas que aumentam a resistência, rigidez e durabilidade, e reduzem a retração (Farias, 2023). Paralelamente, o uso de resíduos industriais como estabilizantes alternativos tem ganhado destaque por seu potencial sustentável (Baldovino *et al.*, 2020).

Dentre os resíduos avaliados, o resíduo de polimento de porcelanato (RPP) destaca-se no Brasil — terceiro maior produtor de cerâmica — com geração anual de cerca de 74 mil toneladas (ANFACER, 2022; Matos *et al.*, 2018). Seu descarte inadequado pode causar impactos ambientais (Mota, 1999), o que tem motivado estudos sobre sua aplicação na estabilização de solos (Farias, 2023; Arruda, 2025).

Diante desse cenário, este trabalho visa avaliar o desempenho mecânico de um solo laterítico natural e estabilizado com cal e com RPP, com foco na resistência à compressão e resistência à tração.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

O material utilizado nesta pesquisa é um solo laterítico fino (SLF), coletado no estado de Pernambuco. As propriedades e classificações do material estão sintetizadas na Tabela 1. Sua fração argilosa é predominantemente constituída por caulinita, com elevados teores de óxidos de ferro e alumínio (Figura 1).

Tabela 1: Propriedades do solo laterítico estudado

Parâmetros	Norma	SLF
Densidade real dos grãos (g/cm³)	ABNT NBR 6458	2,71
Limite de Liquidez (%)	ABNT NBR 6459	42
Limite de Plasticidade (%)	ABNT NBR 7180	26
Índice de Plasticidade (%)		16
% pedregulho (> 2,0 mm)	ABNT NBR 7181	2,2
% areia grossa (0,6 mm – 2,0 mm)		16,4
% areia média (0,2 mm – 0,6 mm)		13,1
% areia fina (0,06 mm – 0,2 mm)		10,9
% silte (2 μm – 0,06 mm) e % argila (< 2 μm)		57,4
Classificação TRB		A-7-6
Classificação MCT; G-MCT	DNIT-CLA 444; 259	LG’

Óxido	%
SiO_2	39,89
Al_2O_3	35,39
Fe_2O_3	6,77
TiO_2	1,00
K_2O	1,32
MgO	1,18
ZrO_2	0,09
CaO	0,00
SO_3	0,18
BaO	0,00
MnO	0,03
Outros	0,01
Perda ao Fogo	14,14

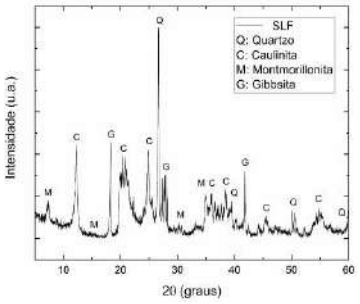


Figura 1: FRX e DRX do SLF

Utilizou-se Cal Hidratada CH-I (<10% de óxidos hidratados) como estabilizante convencional (Farias, 2023) e resíduo de polimento de porcelanato (RPP), da indústria cerâmica, como alternativa sustentável (Tabela 2). A Figura 2, com resultados de DRX e FRX, mostra no RPP predominância de quartzo, mulita, albita e carbeto de silício, além de elevada concentração de SiO_2 e Al_2O_3 e baixos teores de Fe_2O_3 e SO_3, indicando matriz silicatada com potencial pozolânico e estabilidade química favorável à estabilização de solos.

Tabela 2: Propriedades do RPP

Parâmetros	Norma	RPP
Densidade real dos grãos (g/cm³)	ABNT NBR 6458	2,55
Limite de Liquidez (%)	ABNT NBR 6459	31
Limite de Plasticidade (%)	ABNT NBR 7180	27
Índice de Plasticidade (%)		4
% pedregulho (> 2,0 mm)	ABNT NBR 7181	0,0
% areia grossa (0,6 mm – 2,0 mm)		0,0
% areia média (0,2 mm – 0,6 mm)		0,0
% areia fina (0,06 mm – 0,2 mm)		1,0
% silte (2 µm – 0,06 mm) e % argila (< 2 µm)		99,0

Óxido	%
SiO_2	67,48
Al_2O_3	17,91
Fe_2O_3	1,01
CaO (%)	3,32
TiO2 (%)	0,33
MgO (%)	3,60
K_2O (%)	3,55
NaO_2 (%)	2,00
SO_3 (%)	0,11
Outros	0,69

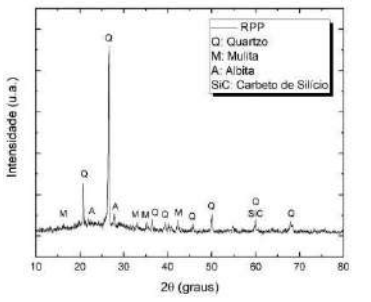


Figura 2: FRX e DRX do RPP

2.2. Dosagem do teor de estabilizante

O teor mínimo de cal foi definido segundo DNIT-ME 419/2019, com pH ≥ 12,4 indicando ativação pozolânica. Para o RPP, adotou-se 10% em massa seca, baseado em estudos prévios (Araújo, 2016; Silva, 2016; Silva, 2023).

2.3. Ensaio de compactação

Seguiu-se o método Proctor Intermediário (DNIT-ME 164/2013). Amostras secas ao ar foram peneiradas em malha 19 mm e compactadas em cinco camadas com 26 golpes cada. Nas misturas estabilizadas, solo e aditivo foram homogeneizados a seco e umedecidos até pasta uniforme para compactação.

2.4. Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados com controle rigoroso (± 0,5% umidade; 98–102% grau de compactação) e curados por 7 dias em câmara a 23 ± 2 °C e umidade relativa > 95%.

2.5. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS) e à tração por compressão diametral (RTCD)

Corpos de prova cilíndricos (100 × 200 mm) foram moldados com energia equivalente ao Proctor Intermediário. A resistência à compressão simples (RCS) foi determinada segundo a ABNT NBR 12025/2012. Para a resistência à tração por compressão diametral (RTCD), os corpos de prova foram serrados conforme especificações adaptadas do DNIT-ME 181/1994. Todos os ensaios foram conduzidos com taxa de deformação de 1 mm/min. A configuração dos ensaios é ilustrada na Figura 3.



Figura 3: Ensaio de RCS e de RTCD

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Dosagem do teor de estabilizante

Conforme apresentado na Figura 4, a adição de apenas 2% de cal ao solo laterítico fino foi suficiente para elevar o pH acima de 12,4 — valor de referência estabelecido pela norma. Dessa forma, adotou-se esse teor (2%), com base na massa seca do solo, como adequado para a estabilização.

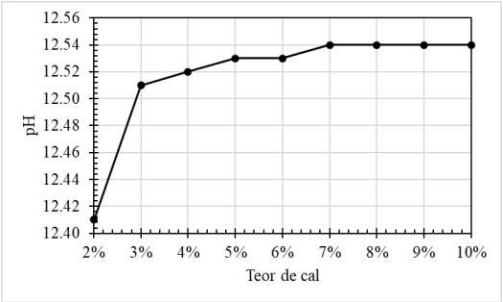


Figura 4: Determinação do teor de cal

3.2. Ensaio de compactação

Ensaios de compactação com energia Proctor Intermediária foram realizados para determinar o teor de umidade ideal e o peso unitário seco máximo de cada mistura. Os resultados dos ensaios de compactação são apresentados na Figura 5.

Solo	$\rho_{dmáxima}$ (g/cm³)	1,717
	$W_{ótima}$ (%)	20,12
Solo-Cal	$\rho_{dmáxima}$ (g/cm³)	1,662
	$W_{ótima}$ (%)	22,01
Solo-Cal-RPP	$\rho_{dmáxima}$ (g/cm³)	1,609
	$W_{ótima}$ (%)	21,00

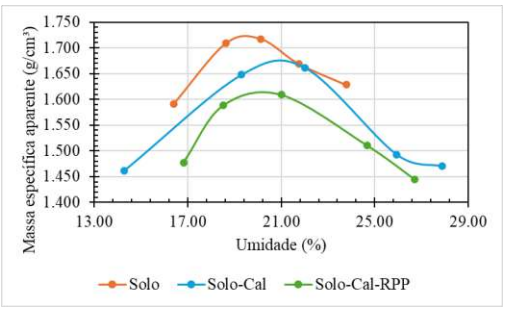


Figura 5: Resultados do ensaio de compactação

A redução da densidade seca máxima com a adição de cal está associada à floculação das partículas e ao aumento dos vazios. A diminuição adicional da $\rho_{dmáx}$ com RPP pode ser atribuída à maior presença de finos e à baixa densidade relativa do resíduo. A umidade ótima aumentada com cal reflete a demanda de água para ativar as reações pozolânicas. A redução da umidade ótima com RPP pode estar relacionada à sua capacidade

de retenção hídrica limitada, ou à absorção inicial rápida, que pode concentrar a umidade na fase inicial do ensaio. Esses resultados estão de acordo com os achados de Pei *et al.* (2015) e Farias (2023).

3.3. RCS e RTCD

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e à tração por compressão diametral (RTCD) estão apresentados na Figura 6 e Tabela 3.

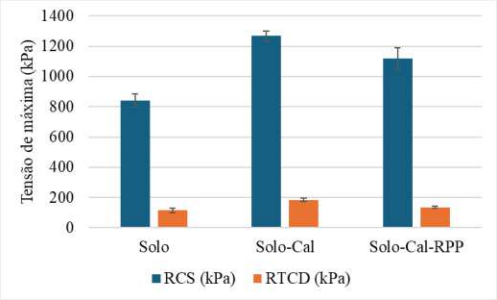


Figura 6: Resultados de RCS e RTCD

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos e influência dos estabilizantes

Mistura	RCS Média (kPa)	Em relação ao solo natural	RTCD Média (kPa)	Em relação ao solo natural
Solo	841,67	—	115,33	—
Solo-Cal	1268,00	↑ 426,33 kPa (↑ 50,6%)	184,67	↑ 69,34 kPa (↑ 60,1%)
Solo-Cal-RPP	1116,67	↑ 275,00 kPa (↑ 32,7%)	135,00	↑ 19,67 kPa (↑ 17,1%)

A estabilização com cal proporcionou os maiores ganhos de resistência, tanto à compressão simples quanto à tração por compressão diametral, confirmando a eficácia das reações pozolânicas. A adição de RPP também elevou a resistência à compressão simples, embora seu efeito na tração tenha sido mais discreto, sugerindo atuação principalmente física, pela redistribuição granulométrica e aumento da fração de finos. Apesar do desempenho inferior à cal, o RPP apresenta valor ambiental relevante, promovendo o reaproveitamento de resíduos industriais e práticas geotécnicas sustentáveis. Os resultados referem-se a curtos períodos de cura, sendo possível que ganhos adicionais ocorram com tempo prolongado, como indicado por Araújo (2016) e Silva (2023).

Com base na correlação entre RCS e *CBR* (Índice de Suporte Califórnia) de Saputra & Putra (2020) (CBR = 0,2416·RCS + 1,2389), os valores estimados foram: solo natural 40,6%, solo-cal 58,6% e solo-cal-RPP 52,3%. De acordo com a EMURB (ES-EE/00/5T-020), a mistura solo-cal aproxima-se do mínimo exigido para base (≥60%), enquanto o solo-cal-RPP e o solo natural atendem aos critérios para sub-base (≥30%), sendo a cal indicada para bases e o RPP para sub-bases, conciliando desempenho e sustentabilidade.

4. CONCLUSÕES

A estabilização do solo laterítico com cal hidratada mostrou eficácia superior, com ganhos significativos na resistência mecânica por reações pozolânicas. O RPP apresentou desempenho mais discreto, com efeito físico predominante e reatividade química limitada a curto prazo. Ambos os aditivos influenciaram a compactação, reduzindo a densidade seca máxima e alterando a umidade ótima. Apesar do desempenho inferior à cal, o RPP representa alternativa sustentável viável. Estudos futuros devem explorar tempos de cura mais longos e combinações sinérgicas para ampliar seu potencial reativo e estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amadi, A. A. (2012) Utilisation of fly ash to improve the engineering properties of lateritic soil. International Journal of Materials Engineering Innovation, v. 3, n. 1, p. 78. DOI: http://dx.doi.org/10.1504/ijmatei.2012.044451.

ANFACER (2022) Setor de cerâmica. Panorama 2022: Produção brasileira de revestimentos cerâmicos. Disponível em: https://www.anfacer.org.br/ (acesso em 06 abr. 2025).

Araújo, S. C. J. F. N. (2016) Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Arruda, A. M. (2025) Análise do comportamento à fadiga de solo laterítico fino estabilizado com cal e polímero. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina

Grande, PB.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) ABNT NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT.
Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT.
Baldovino, J. J. A.; R. L. S. Izzo; M. D. Pereira; E. V. de G. Rocha; J. L. Rose e V. R. Bordignon (2020) Equations controlling tensile and compressive strength ratio of sedimentary soil–cement mixtures under optimal compaction conditions. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, n. 1, p. 04019320.
Bernucci, L. B.; L. M. G. Motta e J. A. P. Ceratti (2010) Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. 4. ed., v. 1. Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA.
Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) DNER-ME 181: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. DNIT.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013) DNIT-ME 164: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. DNIT.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019) DNIT-ME 419: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio. DNIT.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) DNIT-CLA 259: Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Brasília: DNIT.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) DNIT-CLA 444: Classificação de solos tropicais de granulação grossa – Classificação. Brasília: DNIT.
EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO. EMURB ES-EE/00/5T-020: Especificação de Serviços e Materiais para Execução de Sub-base e Base de Solo-Cal. São Paulo.
Farias, M. L. A. (2023) Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, PB.
Matos, P. R.; L. R. Prudêncio; A. L. Oliveira; F. Pelisser e P. J. P. Gleize (2018) Use of porcelain polishing residue as a supplementary cimentitious material in self-compacting concrete. Construction and Building Materials, v. 193, p. 623–630.
Mota, S. (1999) Urbanização e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: ABES.
Pei, X.; F. Zhang; W. Wu e S. Liang (2015) Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles. Applied Clay Science, v. 114, p. 77–84. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.007.
Portelinha, F. H. M.; D. C. Lima; M. P. F. Fontes e C. A. B. Carvalho (2012) Modification of a Lateritic Soil with Lime and Cement: An Economical Alternative for Flexible Pavement Layers. Soils and Rocks, v. 35, n. 1, p. 51–63. DOI: http://dx.doi.org/10.28927/sr.351051.
Silva, F. B. S. (2016) Avaliação de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato para emprego em obras rodoviárias. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
Silva, J. D. J. (2023) Suscetibilidade à liquefação dinâmica de uma areia eólica pura e estabilizada com resíduo de polimento de porcelanato e cal. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, PB.
Saputra, N. A. e R. Putra (2020) IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., v. 469, 012093. DOI: 10.1088/1755 1315/469/1/012093.

Manoel Leandro Araújo e Farias (mlaf.engcivil@gmail.com)
John Kennedy Guedes Rodrigues (profkennedy@hotmail.com)
Ana Letícia Feitosa de Macêdo (leticiamacedo.engcivil@gmail.com)
Arthur dos Santos Souza (arthurdossantossouza5@gmail.com)
Felipe Borges de Oliveira (felipe.borges@estudante.ufcg.edu.br)
Arthur Nóbrega de Sousa (arthur_nobregas@hotmail.com)
João Pedro Silveira Salustiano (joao.silveira@estudante.ufcg.edu.br)
Paulo Germano Tavares Marinho Filho (marinho.paulo05@gmail.com)
Jonny Dantas Patricio (jonny_dantas@gmail.com)
Pedro Raimundo Santana Junior (engpejota@gmail.com)
UFCG, CTRN, Engenharia Civil, Rua Aprigio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, Brasil.

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ROTINA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM REFORÇO DE GEOSSINTÉTICOS

Antonio Peroba de Oliveira Teodoro, João Pedro de Oliveira Alves Neto, Nicole Hansen, Raimundo Nonato da Costa Neto, Jefferson Lins da Silva
Universidade de São Paulo (USP)

RESUMO
Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma rotina computacional capaz de dimensionar pavimentos flexíveis com reforço de geossintéticos. Esses materiais são excelentes soluções para o reforço das camadas de base de pavimentos em regiões com ocorrência de solos com baixa capacidade de suporte. Contudo, essa alternativa ainda é utilizada aquém de seu potencial, devido às limitações teóricas e práticas para o dimensionamento desses pavimentos. Assim, a criação de ferramentas de projeto que incorporem esses elementos é essencial para promover seu uso. Para tanto, a metodologia adotada neste trabalho é baseada em 3 etapas: i) estudo de uma técnica de dimensionamento; ii) desenvolvimento da rotina em *Python*; e iii) aplicação em cenários propostos. Os resultados obtidos são comparados em situações com e sem o emprego de geossintéticos. Nas análises, o uso de geossintéticos mostrou-se capaz de reduzir a espessura das camadas do pavimento, demostrando os benefícios da aplicação em obras rodoviárias.

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária brasileira enfrenta desafios significativos. Atualmente, apenas 12,4% das rodovias do país são pavimentadas e, entre os 111 mil km analisados, 67% apresentam condições classificadas como regulares, ruins ou péssimas (CNT, 2024). Esses dados evidenciam a necessidade de investimentos em soluções que tornem a construção de pavimentos mais eficiente e capaz de atender à demanda por melhoria da malha rodoviária nacional.

Nesse contexto, os geossintéticos têm se destacado como uma alternativa viável e eficaz. Quando corretamente especificados e instalados, contribuem para a melhoria do desempenho estrutural e da durabilidade dos pavimentos, de forma economicamente vantajosa (Palmeira, 2007). Seu uso em obras de pavimentação proporciona benefícios como o reforço das camadas de base em solos com baixa resistência, através do aumento de capacidade de carga, restrição do deslocamento lateral dos agregados e da proteção contra o bombeamento de finos (Vertematti, 2015).

Embora vários estudos comprovem a eficácia do uso de geossintéticos, o dimensionamento de pavimentos flexíveis reforçados com esses materiais ainda demanda mais pesquisas para aprimorar a acurácia dos métodos existentes (Palmeira, 2018), o que traz a necessidade de definição de parâmetros e a criação de ferramentas que auxiliem o projeto desses pavimentos. Assim, pesquisas como as desenvolvidas por Zadehmohamad et al. (2022), Pedroso e Lins da Silva (2021), e Neves et al. (2016), analisam numericamente o comportamento estrutural de pavimentos reforçados com geossintéticos dos tipos geogrelhas e geotêxteis, destacando a resposta de diferentes configurações e arranjos quanto à transferência de carga e ao controle do afundamento superficial dos pavimentos estudados.

Diante dessa necessidade, este trabalho possui o objetivo de desenvolver uma rotina computacional para auxiliar o dimensionamento de pavimentos flexíveis reforçados com geossintéticos em solos com baixa capacidade de suporte. Para tanto, a metodologia adotada é estruturada em 3 etapas: i) estudo de uma técnica de dimensionamento de pavimentos flexíveis com reforço de geossintéticos, abordado na seção 2; ii) desenvolvimento da rotina em *Python*, apresentado na seção 3; e iii) aplicação da rotina em cenários propostos para a avaliação do efeito dos geossintéticos como reforço, presente na seção 4.

2. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM REFORÇO DE GEOSSINTÉTICOS

O "Manual Brasileiro de Geossintéticos" (Vertematti, 2015) apresenta uma metodologia para o dimensionamento de pavimentos flexíveis reforçados com geossintéticos, fundamentada no conceito de Taxa de Benefício de Tráfego (*Traffic Benefit Ratio*- TBR), representado na Equação 1.

$$\mathrm{TBR} = \frac{\mathrm{N}_r}{\mathrm{N}} \tag{1}$$

Na qual N é o número de repetições previstas de um eixo padrão de 82 kN e N_r é o número dessas repetições

com o uso de reforço de geossintéticos. Baseados em análises numéricas, Zadehmohamad et al. (2022) determinaram que os valores de TBR podem variar entre 1,91 e 8,90 para geogrelhas e 1,71 e 5,92 para geotêxteis, de acordo com a rigidez, a disposição dos materiais e os critérios de deformação do pavimento. Valores de TBR superiores a 8 foram associados a condições específicas, como elevada rigidez dos geossintéticos empregados, maior profundidade de trilha de roda considerada e utilização de camadas duplas de geogrelhas.

Além disso, a metodologia emprega o método de dimensionamento de pavimentos AASHTO 93, desenvolvido pelo Associação Americana de Autoridades Rodoviárias e de Transporte (AASHTO, 1993), conforme a Equação 2.

$$\log \mathrm{N} = \mathrm{Z_R S_0} + 9{,}36 \log(SN+1) - 0{,}20 + \frac{\frac{p_0 - p_f}{p_0 - 1{,}5}}{0{,}4 + \frac{1.094}{(SN+1)^{5{,}19}}} + 2{,}32 \log(M_R) - 8{,}07 \qquad (2)$$

Onde Z_R é uma variável dependente do nível de confiança do projeto e S_0 é o desvio padrão das variáveis utilizadas; p_0 e p_f correspondem, respectivamente, aos índices de serventia inicial e final do pavimento; M_R (em psi) é o módulo de resiliência das camadas do pavimento e SN é o número estrutural, que representa a capacidade de suporte dessas camadas.

Para os casos em que há reforço de geossintéticos, pode-se reduzir as espessuras das camadas do pavimento ao ajustar N por meio da Equação 3.

$$\mathrm{N}' = \frac{\mathrm{N}}{TBR} \qquad (3)$$

De forma que o dimensionamento passa a considerar um número reduzido de repetições do eixo padrão na via, N', o que corresponde à melhoria estrutural proporcionada pelo reforço.

O número estrutural sobre uma camada do pavimento pode ser determinado numericamente como uma raiz da Equação 2, ou, alternativamente, a partir das contribuições estruturais das camadas superiores do pavimento até a camada i, ΔSN_i, como mostra a Equação 4.

$$SN = \Delta SN_1 + \Delta SN_2 + \cdots + \Delta SN_i \qquad (4)$$

Em que ΔSN_i é função do coeficiente estrutural, a_i, de drenagem, m_i, e da espessura da camada, D_i (cm), expressa pela Equação 5.

$$\Delta SN_i = a_i m_i \frac{D_i}{2{,}54} \qquad (5)$$

Assim, é possível calcular as espessuras das camadas dos pavimentos de forma iterativa a partir do M_R e das espessuras pré-definidas das camadas, quando disponíveis.

3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Com o objetivo de automatizar o projeto de pavimentos flexíveis reforçados com geossintéticos, é realizada a implementação computacional da metodologia apresentada através de uma rotina computacional de dimensionamento desenvolvida em *Python*.

O algoritmo da rotina inicia-se com a entrada manual dos dados necessários ao projeto: N, Z_R, S_0, p_0, p_f e TBR, além das propriedades das camadas do pavimento: M_R, a_i e m_i. Com esses dados, calcula-se o SN_i sobre cada camada do pavimento, conforme a Equação 2, com N ajustado de acordo com a Equação 3. A partir do SN sobre a primeira camada, que é igual a ΔSN_1, calcula-se a espessura D_1 pela Equação 5. Para as camadas com espessuras previamente definidas, suas ΔSN_i são calculadas utilizando a mesma equação.

Em seguida, calcula-se ΔSN_i das demais camadas por meio da Equação 4, o que possibilita determinar suas respectivas espessuras D_i pela Equação 5. O funcionamento da rotina é apresentado no algoritmo ilustrado na Figura 1.

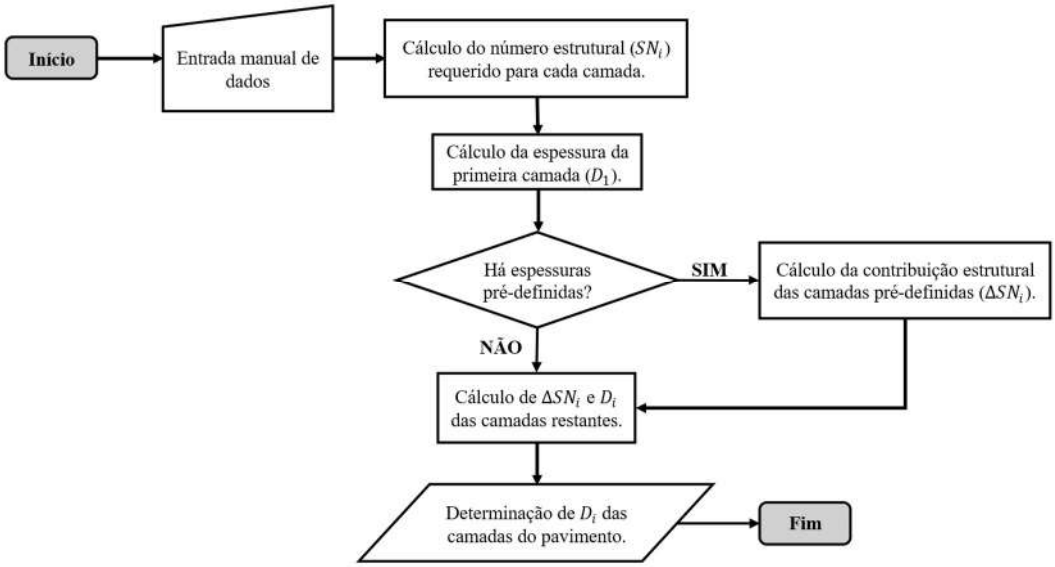


Figura 1: Algoritmo da rotina computacional desenvolvida.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Cenário proposto

Para avaliar os benefícios do reforço das camadas de base e sub-base com o uso de geossintéticos, a rotina desenvolvida é aplicada em uma estrutura de pavimento composta por revestimento, base e sub-base, considerando um Indice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio- CBR*) do subleito igual a 3%. A estrutura é reforçada com geogrelhas entre a sub-base e o subleito, como ilustra a Figura 2.

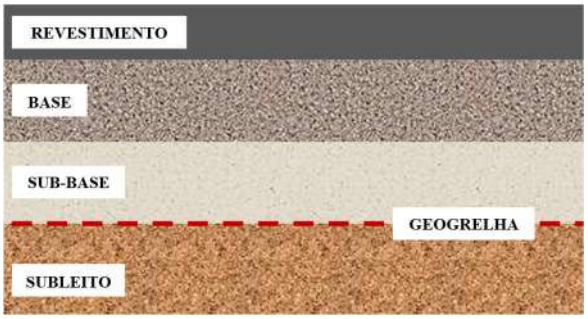


Figura 2: Representação da estrutura do pavimento projetado.

Foram analisadas as variações das espessuras das camadas de base e sub-base em função da variação da TBR do geossintético, considerando valores entre 1 (pavimento sem reforço) e 8. Adicionalmente, a espessura da camada de sub-base é avaliada de acordo com o CBR do subleito, variando entre 2%, 3% e 4%. O CBR, por sua vez, pode ser relacionado ao módulo de resiliência do subleito ($M_{R,subleito}$, em psi), conforme a Equação 6 (AASHTO, 1993).

$$M_{R,subleito} = 1.500 \cdot CBR \tag{6}$$

Os demais dados utilizados para o dimensionamento são selecionados a partir das instruções previstas em AASHTO (1993) para uma autoestrada rural. Os parâmetros gerais do projeto estão resumidos na Tabela 1, enquanto os parâmetros das camadas são apresentados na Tabela 2. Neste estudo, a espessura da camada de revestimento foi mantida constante, a fim de atender a espessura mínima necessária para o nível de tráfego considerado, conforme as recomendações da AASHTO.

Tabela 1: Parâmetros gerais para o projeto de pavimento flexível com reforço de geossintético.

Número de repetições	TBR	Nível de confiança	Desvio padrão	Serventia inicial	Serventia final
3.500.000	1 a 8	90% (Z_R = -1,282)	0,45	4,2	2,2

Tabela 2: Parâmetros de dimensionamento das camadas do pavimento.

Camada	Índice	Material	Módulo de resiliência (psi)	Coeficiente estrutural	Coeficiente de drenagem	Espessura (cm)
Revestimento	1	CBUQ[1]	-	0,44	1	5
Base	2	BGS[2]	42.850	0,14	1,1	Não definida
Sub-base	3	Macadame seco	21.335	0,14	1	Não definida
Subleito	-	-	3.000 a 6.000	-	-	-

[1]Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)
[2]Brita Graduada Simples (BGS)

4.2. Análise dos resultados

Os resultados obtidos com a rotina computacional demonstram a eficácia dos geossintéticos como elementos de reforço das camadas de base do pavimento. No cenário sem reforço, as espessuras calculadas da base e da sub-base valem 35,26 cm e 36,70 cm, respectivamente. Com uma TBR igual a 8, a espessura da camada de base é reduzida em 41,24% e a de sub-base, em 23,02%, como mostra o gráfico da Figura 3. Ressalta-se, ainda, que as maiores reduções ocorrem para valores mais baixos de TBR, o que apresenta a natureza não linear dessa relação. Esse comportamento é consistente com os resultados observados por Zadehmohamad et al. (2022).

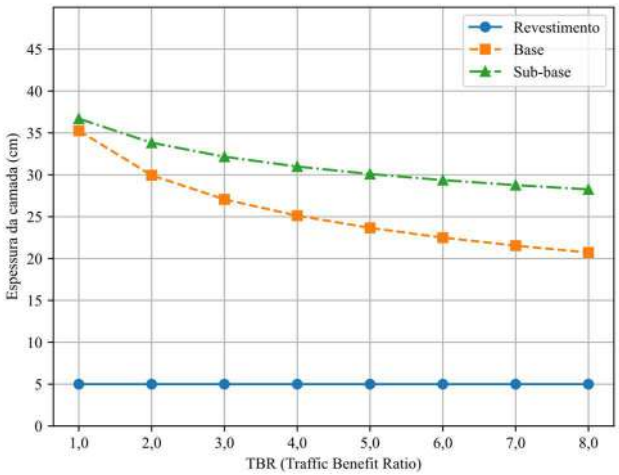


Figura 3: Variação das espessuras das camadas do pavimento em função da TBR para um subleito com CBR de 3%.

Por fim, a espessura da sub-base é avaliada considerando diferentes valores de CBR do subleito (2%, 3% e 4%), conforme a Figura 4. Percebe-se que, quanto menor o CBR do subleito, maior a espessura da camada de sub-base. Observa-se, também, que a variação na redução das espessuras em função da TBR é semelhante entre os três casos, apresentando valores de 21,70%, 22,23% e 23,89%, para subleitos com CBR de 2%, 3% e 4%, respectivamente. Destaca-se que as espessuras das camadas superiores do pavimento não variam com o CBR do subleito, pois a contribuição estrutural de uma camada inferior é ajustada de modo a manter constante

a soma das contribuições estruturais das camadas superiores, como mostram as equações 4 e 5.

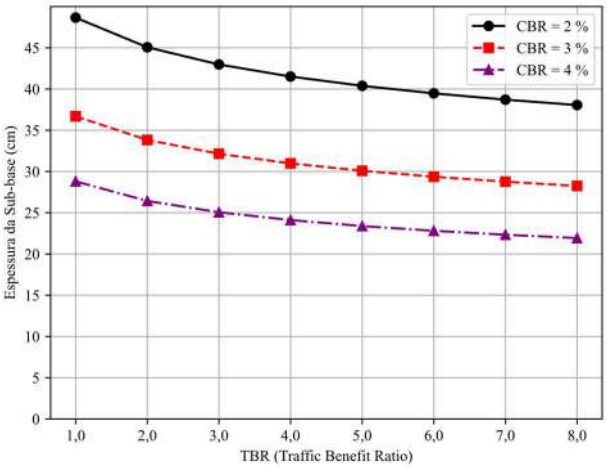


Figura 4: Variação da espessura da Sub-base em função do CBR do subleito e da TBR.

5. CONCLUSÃO

A aplicação da rotina computacional demonstrou que o uso de geossintéticos como reforço das camadas de base e sub-base permite reduzir significativamente as espessuras do pavimento, com diminuições de até 41,24% na base e 23,02% na sub-base para uma TBR igual a 8. A redução da sub-base com o aumento da TBR, considerando a variação do CBR do subleito, manteve-se constante em torno de 22%. Assim, a rotina desenvolvida mostrou-se capaz de dimensionar pavimentos flexíveis reforçados de forma coerente com a TBR, contribuindo de forma prática para os projetos de pavimentação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelas bolsas e pelo apoio financeiro à pesquisa (CNPq/FNDCT/MCTI: Processo 405594/2022-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials.

CNT. (2024). Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Disponível em: https://cnt.org.br/documento/cbf59b9e-fd1a-41fc-b230-172c4dc42100 (acesso em: 17/06/2025).

Neves, J.; H. Lima e M. Gonçalves. (2016). A Numerical Study on the Implications of Subgrade Reinforcement with Geosynthetics in Pavement Design. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 888–895. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.151

Palmeira, E. M. (2007). Geosynthetics in Road Engineering. *International Geosynthetics Society (IGS)*. Disponível em: https://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/2014/10/GeosyntheticsinRoadEngineering_English.pdf (acesso em: 17/06/2025).

Palmeira, E. M. (2018). *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. São Paulo: Oficina de Textos.

Pedroso, G. O. M. e J. Lins da Silva. (2021). Avaliação numérica da influência da geogrelha no desempenho de pavimentos flexíveis. *TRANSPORTES*, v. 29, n. 1, p. 264–279. DOI: 10.14295/transportes.v29i1.2366

Vertematti, J. C. (2015). *Manual brasileiro de Geossintéticos* (2ª. ed.). São Paulo: Editora Blucher.

Zadehmohamad, M.; N. Luo; M. Abu-Farsakh e G. Voyiadjis. (2022). Evaluating long-term benefits of geosynthetics in flexible pavements built over weak subgrades by finite element and Mechanistic-Empirical analyses. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 50, p. 455–469. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2022.01.004

Antonio Peroba de Oliveira Teodoro (antonio.teodoro@usp.br)
João Pedro de Oliveira Alves Neto (jpalvesneto@usp.br)
Nicole Hansen (nikehansen123@gmail.com.br)
Raimundo Nonato da Costa Neto (raimundoneto25@usp.br)
Jefferson Lins da Silva (jefferson@sc.usp.br)

Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO SUBLEITO NA ESTIMATIVA MECANÍSTICO-EMPÍRICA DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Nádgyla Layana Tófolo Silva[2], Mario Sergio de Souza Almeida[1, 2, 4], Isabela de Jesus Santos[2], Paulo Ricardo Lemos de Santana[2], Elane Donato Santos[2], Vanessa Rebouças Santana[3], Weiner Gustavo Silva Costa[1]

[1]Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, [2]Universidade Estadual de Feira de Santana, [3]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [4]Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

RESUMO

Um dos desafios da engenharia rodoviária na atualidade é aumentar a vida útil de pavimentos asfálticos, racionalizando a demanda por materiais de construção, com reflexos diretos no custo e na preservação ambiental. Este estudo teve como objetivo avaliar como o aumento da energia de compactação do solo de subleito pode influenciar nas suas características de rigidez e deformação permanente, bem como no desempenho do pavimento. O programa experimental consistiu em realizar a caracterização do solo, incluindo ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, em amostras compactadas com diferentes energias. Para estimar o efeito da densificação no desempenho do pavimento, foram realizadas análises mecanístico-empíricas em dois pavimentos de referência. Os resultados indicaram que embora o aumento da energia de compactação tenha proporcionado significativo ganho de rigidez do solo, isso não se refletiu em ganhos substanciais de desempenho dos pavimentos para o horizonte de projeto de 10 anos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a infraestrutura rodoviária o processo de compactação é indispensável nas obras de terraplenagem e pavimentação, pois melhora propriedades essenciais do solo, com destaque para o comportamento tensão-deformação (Kodikara *et al.*, 2018). Segundo Pinto (2006), a compactação visa aumentar o contato entre os grãos, tornando a camada mais homogênea. Esse processo consiste na aplicação de energia mecânica para densificar o material pela diminuição dos vazios (Soltani *et al.*, 2023), resultando na redução do índice de vazios do solo, com consequente aumento da densidade, o que está intrinsecamente relacionado à umidade do solo. Diferentes autores vêm buscando investigar a eficácia do uso de diferentes energias de compactação na alteração do comportamento mecânico de solos (Zica, 2010; Pimentel, 2023). Carvalho *et al.* (2020) avaliaram o impacto do aumento da energia de compactação na densificação do solo de subleito e na previsão de desempenho e vida útil de um pavimento asfáltico. As análises consideraram as energias de compactação variando entre 6 kgf.cm.cm^{-3} até 60 kgf.cm.cm^{-3}, correspondendo à 12, 26, 55, 70, 83, 100 e 120 golpes aplicados por camada. Os resultados mostraram que no dimensionamento da estrutura do pavimento na energia intermediária (26 golpes), as espessuras aumentaram em 12% na camada de revestimento, 33% na base e 33% de sub-base, em relação a estrutura de referência, projetada considerando o subleito compactado com 70 golpes. O estudo mostrou que a utilização de energias mais elevadas no subleito levou a um melhor desempenho estrutural do pavimento flexível.

Pascoal *et al.* (2023) estudaram o comportamento resiliente, a deformação permanente e as características de *shakedown* de um solo tropical laterítico do Rio Grande do Sul. O material foi compactado em laboratório utilizando energias do Proctor normal, intermediário e modificado, com resultados comparados com amostras extraídas da camada superior do aterro. Eles concluíram que à medida que a energia de compactação aumenta, há um ganho no valor de módulo de resiliência (MR) e uma redução na deformação permanente (DP), demonstrando que a utilização de energias mais elevadas tende a otimizar projetos de pavimentos, desde que observadas as limitações de compactação em campo e os custos financeiros que requerem análises específicas. Portanto, os resultados desses trabalhos indicam que a definição da energia de compactação adequada para ser utilizada nos materiais granulares em diferentes camadas pode ser uma boa estratégia para melhoraria de desempenho de longo prazo de pavimentos asfálticos, com a possibilidade de utilização de solos locais, sobretudo quando esse procedimento é aplicado a camada de subleito.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de um solo de subleito compactado em diferentes energias, bem como a influência na deformabilidade do material e na estimativa de desempenho de pavimentos de referência, utilizando a modelagem do método mecanístico-empírico brasileiro de dimensionamento de pavimentos asfálticos (MeDiNa), versão 1.1.9 de 2023.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o programa experimental foram utilizadas amostras de um solo latossolo amarelo distrocoeso, típico de camadas de subleito da malha rodoviária da região do Recôncavo do estado da Bahia, para realização dos ensaios de caracterização geotécnica, módulo de resiliência e deformação permanente. Com os resultados de rigidez e deformabilidade foi possível estimar a evolução do afundamento na trilha de rodas (ATR) do pavimento de referência idealizado por Carvalho *et al.* (2020).

2.1. Caracterização dos materiais geotécnicos

Para o desenvolvimento dos ensaios de caracterização do solo de subleito foram realizados ensaios de granulometria por sedimentação e peneiramento, limite de liquidez, limite de plasticidade e densidade real dos grãos. Adicionalmente, foram realizados ensaios de perda de massa por imersão (PI) e Mini-MCV para a classificação do solo de acordo com a metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical).

Em seguida, foram determinadas curvas de compactação do solo de subleito, utilizando o molde tripartido de 100 x 200 mm, ME DNIT 443 (DNIT, 2023), com o soquete grande, de massa de 4,536 kg e altura de queda de 45,72 cm, para compactação em dez camadas, para as energias de 6, 13, 27, 35, 41, 50 e 60 kgf.cm.cm^{-3}, correspondentes à 5, 10, 21, 26, 31, 38 e 45 golpes por camada. De posse dos parâmetros ótimos de compactação para cada energia testada ($\rho_{dmáx}$ e $w_{ót}$), foi possível realizar os ensaios de MR e DP para o subleito, associados a cada energia.

Os ensaios de MR foram realizados de acordo com o método de ensaio ME DNIT 134 (DNIT, 2018a), considerando, como previsto na referida norma para o subleito, o uso de apenas uma fase de condicionamento da amostra seguida da aplicação de 12 pares de tensões. Os ensaios de deformação permanente, nas diferentes energias de compactação, foram realizados com aplicação da técnica de multiestágios, prescrita na norma AG:PT/T053 (AUSTROADS, 2006), com uso de 3 corpos de prova ao invés de 9 e com aplicação de 50.000 ciclos ao invés de 150.000 ciclos, previstos na IE DNIT 179 (DNIT, 2018b), para cada um dos 9 pares de tensões ensaiados, também previstos na IE DNIT 179 (DNIT, 2018b), conforme adotado por Caetano (2024).

2.2. Estimativa de desempenho de longo prazo de pavimentos asfálticos de referência

Para estimativa de desempenho de longo prazo foram dimensionados dois pavimentos asfálticos de referência (Figura 1), idealizados para dois níveis de tráfego (leve e pesado), correspondentes à $N_{projeto}$ (USACE) de 1,0 x 10^6 e 1,0 x 10^7, estimados para o horizonte de 10 anos, utilizando para isso o MR do subleito compactado na energia do Proctor normal (6 kgf.cm.cm^{-3}). A evolução da área trincada (AT) foi estimada com aplicação da modelagem adotada no método mecanístico-empírico brasileiro (MeDiNa), versão 1.1.9, conforme as Equações de 1 a 7.

$$AT = \frac{e^{-A} - e^{-B}}{1 - e^{-B}} \tag{1}$$

$$A = \left(\frac{N^{'} - 1}{Z - 1}\right)^{n} \tag{2}$$

$$B = \left(\frac{-1}{Z - 1}\right)^{n} \tag{3}$$

$$N^{'} = \mathrm{N}.fs.10^{-10} \tag{4}$$

$$fs = 1993{,}7.(D_{médio})^{0{,}3737} \tag{5}$$

$$D_{médio} = \frac{1}{20}\sum\frac{1}{N_{ef}} \tag{6}$$

$$N_{ef} = k_1\left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k2} \tag{7}$$

Onde:
AT é a área trincada estimada (%);
Z e n são parâmetros de ajuste da função sigmoidal (Z = 0,25 e n = 5);
N' é o número equivalente ajustado;
fs é o fator campo-laboratório (*shift fator*) ou função de transferência (Fritzen *et al.*, 2019);
$D_{médio}$ representa o dano a que uma determinada camada asfáltica estará submetida, considerando 20 pontos de análise, sendo 10 na fibra superior e 10 na inferior;
N_{ef} é o número de solicitações admissíveis determinado a partir da curva de fadiga obtida em laboratório;
k_1 e k_2 são parâmetros de ajuste da curva de fadiga.



(a) $N_{projeto} = 1 \times 10^6$ (b) $N_{projeto} = 1 \times 10^7$

Figura 1: Pavimentos de referência.

Para permitir a análise mecanistico-empírica proposta foi necessário projetar um concreto asfáltico (CA) em laboratório, com CAP 50/70, na faixa C da ES DNIT 031 (DNIT, 2024), para determinação da resistência à tração indireta, ME DNIT 136 (DNIT, 2018c), módulo de resiliência, ME DNIT 135 (DNIT, 2018d) e curva de fadiga, ME DNIT 183 (DNIT, 2018e). Para a camada de base em brita graduada simples (BGS), compactada na energia do Proctor modificado (27 kgf.cm.cm^{-3}), foram realizados ensaios de MR e DP. De posse dos dados de caracterização das camadas granulares e asfáltica foi possível estimar, portanto, a evolução de AT para o horizonte de projeto de 10 anos, considerando as diferentes energias de compactação aplicadas no subleito.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização do subleito

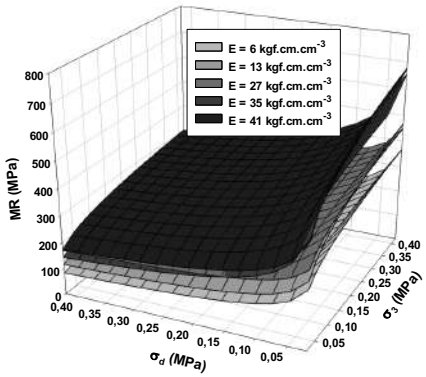
As características do solo de subleito estão apresentadas na Tabela 1, com destaque para a granulometria, limites de consistência, parâmetros e compactação para as diferentes energias adotadas e a classificação MCT. Cabe salientar que nas energias de compactação referentes à 50 e 60 kgf.cm.cm^{-3} houve diminuição da massa específica seca máxima, indicando que a capacidade de carga do solo foi atingida com a energia de 41 kgf.cm.cm^{-3}, motivo pelo qual os ensaios mecânicos foram realizados até esse patamar.

Tabela 1: Caracterização do solo de subleito

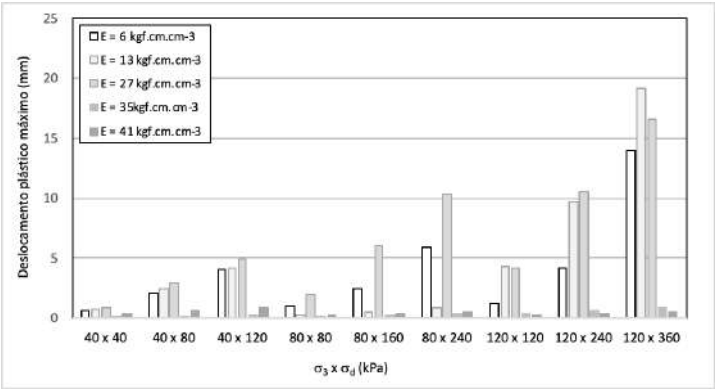
Atributo	Energia (kgf.cm.cm^{-3})	Parâmetro	Resultado
Granulometria		Pedregulho (%)	0,4
		Areia (%)	51,2
		Silte (%)	14,2
		Argila (%)	34,2
Limites de Consistência		LL (%)	27
		IP (%)	6
		Classificação MCT	LA’
Compactação	6	$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	1,681
		w_{ot} (%)	14,09
	13	$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	1,797
		w_{ot} (%)	13,78
	27	$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	1,889
		w_{ot} (%)	13,56
	35	$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	1,941
		w_{ot} (%)	12,52
	41	$\rho_{dmáx}$ (g/cm³)	1,959
		w_{ot} (%)	12,22

3.2. Módulo de resiliência e deformação permanente

Os resultados de MR mostram um aumento da rigidez do solo de subleito com o aumento da energia de compactação empregada, conforme pode ser visualizado na Figura 2a. O módulo de resiliência médio da BGS foi de 238 MPa. Para facilitar a avaliação comparativa da variação da deformação permanente do solo do subleito, em função da energia de compactação e para os diferentes pares de tensões testados no ensaio de multiestágios, estes dados estão apresentados na Figura 2b, em termos de deslocamento permanente máximo. Estes resultados indicam que houve aumento da DP com o aumento da energia de compactação para praticamente todas as energias e níveis de tensões, comportamento que carece ser melhor investigado.



(a) Módulo de resiliência em função da energia de compactação e tensões confinante e desvio

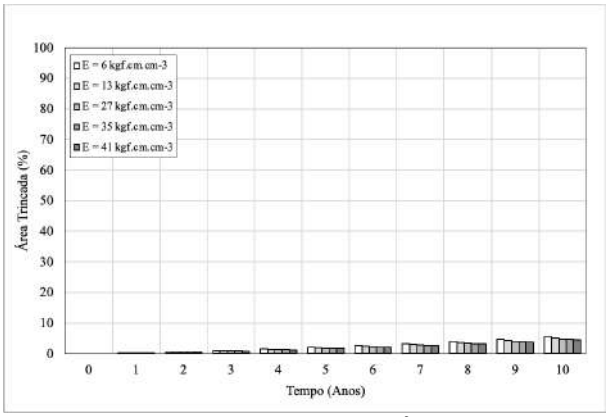


(b) Deslocamento plástico máximo em função da energia de compactação e pares de tensões

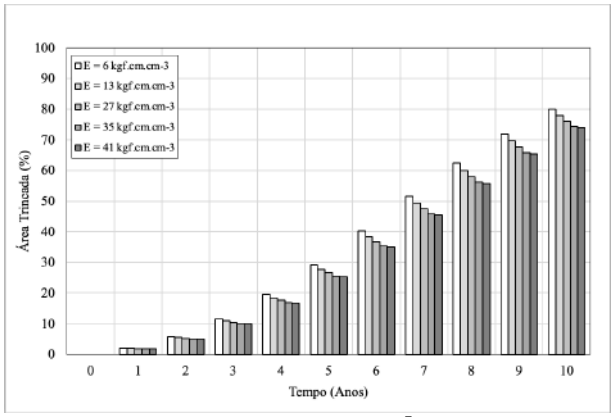
Figura 2: Variação de MR e DP com a energia de compactação para os diferentes pares de tensão ensaiados (σ_3 e σ_d).

3.3. Estimativa de AT de longo prazo para as diferentes energias de compactação do subleito

Com o MR e a curva de fadiga da camada de revestimento asfáltico definidos em 7502 MPa, $k_1 = 7 \times 10^{-12}$ e $k_2 = 3{,}423$, respectivamente, bem como o MR da base em BGS (238 MPa), foi possível aplicar a modelagem mecanístico-empírica do MeDiNa, versão 1.1.9, para estimar a evolução de AT (Figura 3), considerando as diferentes energias de compactação aplicadas no subleito. Nestas análises foram adotados para as camadas os valores de coeficientes de Poisson sugeridos na IP-DE-P00/001 do DER-SP (2024). Apesar da grande influência observada da energia de compactação na rigidez do solo de subleito (Figura 2), a evolução de AT estimada (Figura 3) indica que esse comportamento não se refletiu em ganho substancial de desempenho de longo prazo dos pavimentos (10 anos), evidenciando que na modelagem da versão 1.1.9 do MeDiNa, o comportamento à fadiga da mistura asfáltica é quase exclusivamente função das características desse material, não influenciando muito a rigidez das camadas geotécnicas de apoio. Nesse contexto, investir no aumento da energia de compactação em campo, com consequente aumento de custo, não se mostra uma alternativa viável.



(a) $N_{projeto} = 1 \times 10^6$



(b) $N_{projeto} = 1 \times 10^7$

Figura 3: Evolução da AT, considerando as diferentes energias de compactação do subleito.

4. CONCLUSÕES

A estabilização mecânica, aplicada no solo de subleito com o aumento da energia de compactação, demonstrou grande capacidade de melhorar o comportamento mecânico do material, com aumento de rigidez. A pequena influência dessa característica do solo de fundação observada no comportamento à fadiga do pavimento para os diferentes níveis de tráfego avaliados, pode não estar refletindo adequadamente o que realmente acontece em campo e aponta para a necessidade de aprofundamento de estudos nessa linha de pesquisa, sobretudo em seções experimentais construídas e monitoradas para este fim.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Austroads (2006) AG:PT/T053 – Determination of permanent deformation and resilient modulus characteristics of unbound granular materials under drained conditions. Sydney: Austroads.

Caetano, M. R. (2024) Estudo do comportamento mecânico de solos tropicais e materiais britados de pavimentos rodoviários do Distrito Federal e do Estado de Roraima. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, DF.

Carvalho, A. I. S.; Almeida, M. S. S.; Pedreira, W. J. P.; Costa, W. G. S. e São Mateus, M. S. C. (2020) Influência da densificação do solo de subleito no desempenho de pavimentos flexíveis. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 43, n. 4, p. 253–262.

DER-SP (2024) Norma DER-SP DE-P00/001/2024 – IP: Projeto de Pavimentação. Instrução de projeto. São Paulo. Departamento de Estradas de Rodagem.

DNIT (2018a) Norma DNIT 134/2018 – ME (2018a): Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2018b) Norma DNIT 179/2018 – IE: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente. Instrução de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DNIT (2018c) Norma DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DNIT (2018d) Norma DNIT 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DNIT (2018e) Norma DNIT 183/2018 – ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ.

DNIT (2023) Norma DNIT 443/2023 – ME: Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio. Brasília/DF: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT (2023) Norma DNIT 031/2024 – ME: Pavimentação – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Brasília/DF.

Fritzen, M. A.; F. A. C. P. Franco; L. M. G. Motta e M. O. Ubaldo (2019) Atualização da função transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa MeDiNa. In Anais do 9º Congresso Rodoviário Português. Lisboa.

Kodikara, J.; T. Islam e A. Sounthararajah (2018) Review of soil compaction: History and recent developments. *Transportation Geotechnics*, v. 17, n. Part B, p. 24–34. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.006

Pascoal, P. T.; F. C. Fernandes; J. R. Oliveira e M. B. Silva (2023) Lateritic soil deformability regarding the variation of compaction energy in the construction of pavement subgrade. *Soils and Rocks*, v. 46, n. 3. DOI: https://doi.org/10.28927/SR.2023.009922

Pimentel, F. R. (2023) Influência das energias de compactação em materiais granulares para emprego em pavimento de vias municipais e baixo custo. Monografia (Especialização). Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Infraestrutura Urbana, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória/ES.

Pinto, C. S. (2006) *Curso básico de mecânica dos solos* (3ª. ed.). São Paulo: Oficina de Texto.

Soltani, A.; M. Azimi; B. C. O. Kelly e S. Horpibulsuk (2023) Converting optimum compaction properties of fine-grained soils between rational energy levels. *Transportation Geotechnics*, v. 42, 101096. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101096

Zica, E. S. (2010) Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Geotécnica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG.

Nádgyla Layana Tófolo Silva (tofolo.nadgyla@hotmail.com)
Isabela de Jesus Santos (santosisabela.eng@gmail.com)
Paulo Ricardo Lemos de Santana (lemossp.eng@gmail.com)
Elane Donato Santos (elanedonato.eng@gmail.com)
Universidade Estadual de Feira de Santana, Av. Transnordestina, Novo Horizonte, Feira de Santana, BA, Brasil.
Vanessa Rebouças Santana (vanessareboucas@alunos.utfpr.edu.br)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, 5000, Curitiba, PR, Brasil.
Weiner Gustavo Silva Costa (weiner@ufrb.edu.br)
Mario Sergio de Souza Almeida (mario.almeida@ufrb.edu.br)
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - Rua Rui Barbosa, 710, Centro, Cruz das Almas, BA, Brasil.

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DE AGREGADOS NO DIMENSIONAMENTO DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS PARA SEPARAÇÃO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Raimundo Nonato da Costa Neto, João Pedro de Oliveira Alves Neto, Antonio Peroba de Oliveira Teodoro, Nicole Hansen, Jefferson Lins da Silva
Universidade de São Paulo (USP)

RESUMO
Geossintéticos são utilizados em aterros sobre solos moles como elementos de separação para impedir a contaminação entre camadas, garantindo a integridade estrutural e a durabilidade do sistema. Este artigo utiliza um método de dimensionamento de geotêxtil não tecido aplicado em estradas não pavimentadas, considerando diferentes tipos de materiais granulares utilizados no aterro. Nesse sentido, são analisados materiais que apresentam características granulométricas distintas, enquanto os parâmetros geométricos foram padronizados conforme referências da literatura. Os agregados estudados incluem rachão, pedra marroada, rachão reciclado e rachão primário, que impõem elevadas demandas à sobrevivência e desempenho do geossintético. O geotêxtil não tecido é dimensionado com base nos critérios de desempenho mecânico e hidráulico, com intuito de evitar falhas e garantir a separação entre as camadas. Como resultado, verificou-se que a massa por unidade de área do geotêxtil não tecido utilizado como elemento de separação está associada à granulometria dos agregados.

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária brasileira é constituída de 1.720.909,0 km de rodovias, das quais 1.350.100,0 km (78,5%) são referentes a vias não pavimentadas de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024). Desta maneira, demonstra a necessidade do enfoque no tratamento, conservação e manutenção deste tipo de vias, que são pontos de acesso importantes entre áreas rurais e urbanas (Oda, 1995).

Ainda assim, segundo Gongora e Palmeira (2015), a construção de estradas não pavimentadas sobre subleitos constituídos de solos moles pode proporcionar, a depender da solicitação de tráfego e outros fatores, a centralização de recursos para manutenção. Nesse sentido, faz-se necessário procurar métodos eficientes que melhorem as condições dessas estradas e que prolonguem a sua vida útil.

Para isso, é necessário compreender que a estrutura de uma estrada não pavimentada é extremamente heterogênea devido aos materiais que a compõem, sendo solo granular para a base e solo coesivo no subleito, demonstrando comportamentos diferentes. Isto posto, a repetição de carga em função do tráfego de veículos contribui para tornar a estrada como um sistema imprevisível e instável (Giroud e Han, 2016).

Além disso, a interação entre estes materiais pode acarretar na contaminação das camadas, ocasionada pela penetração do material granular na camada de subleito, provocando falhas na capacidade de suporte localizada, conforme pode ser observado na Figura 1.a. Ademais, pode ocorrer a intrusão de solos finos na camada granular em decorrência do bombeamento, situação na qual a aplicação do geossintético demonstra-se essencial para separar as camadas e evitar a mistura dos materiais (Zornberg, 2017).

Nesse sentido, o geossintético opera como uma barreira flexível, sendo necessário garantir uma distribuição das tensões oriundas do tráfego, e evitando problemas estruturais como pode ser observado na Figura 1.b. Para tal propósito, a escolha do geotêxtil não tecido adequado deve levar em consideração à resistência à tração e ao rasgo, bem como ao puncionamento atuante do material granular existente na camada de base, pois uma vez que subdimensionado o geotêxtil pode ter a sua vida útil reduzida (Proença, 2018; Sigurdsson, 1993).

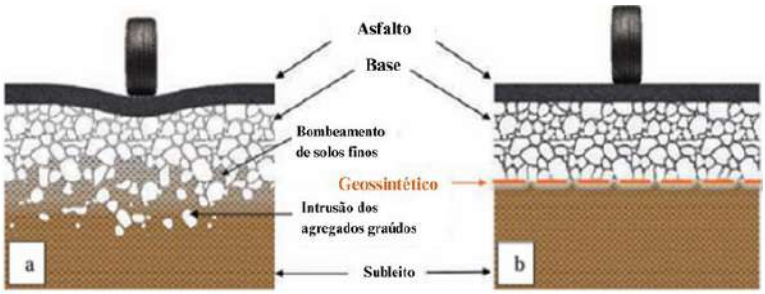


Figura 1: (a) Interação das Camadas sem Geossintético; (b) Geossintético Atuando na Separação (Zornberg, 2017)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

De acordo com Bernucci, *et. al*. (2008), os solos granulares tipicamente utilizados para execução de base são: a brita graduada simples (BGS), macadame hidráulico e seco, solo estabilizado granulometricamente e solo-agregado. Do mesmo modo, conforme a norma DNIT 441/2023 destaca, podem ser usados materiais como a pedra marroada, o rachão e o rachão primário, proveniente do primeiro estágio de beneficiamento.

Nessa perspectiva, objetivando a análise do dimensionamento de um geossintético para aplicação na separação da base e do solo mole de fundação, foram selecionados materiais cujo diâmetro dos grãos fosse maior que 100 mm, o que consequentemente exige uma maior resistência à tração localizada e ao puncionamento do geotêxtil. Para isso, foram escolhidos para o estudo da influência da granulometria no dimensionamento, o rachão, pedra marroada, rachão reciclado e primário.

Entretanto, os materiais escolhidos, diferentemente dos solos estabilizados granulometricamente e o macadame hidráulico e seco, não possuem uma especificação técnica que determine faixas granulométricas para execução de base. Nesse sentido, foram analisados inicialmente catálogos de venda de Pedras Morro Grande (2025), ARATU (2025), RIUMA Ambiental (2025) e RIUMA Mineração (2025) para definir um intervalo granulométrico nos quais cada um se enquadra, assim definindo os respectivos intervalos: rachão (100 mm a 200 mm), pedra marroada (100 mm a 400 mm), rachão reciclado (50 mm a 150 mm) e rachão primário (200 mm a 400 mm).

2.2. Métodos

Com a ausência de faixas granulométricas para trabalho, foi utilizada a classificação de curvas granulométricas quanto a distribuição dos grãos para realizar uma simulação de três curvas granulométricas para cada material, e assim, ser possível realizar o dimensionamento. Portanto, na Figura 2, podem ser observadas as curvas propostas para os respectivos materiais estudados, contendo as situações para granulometria bem graduada, graduação aberta e graduação uniforme.

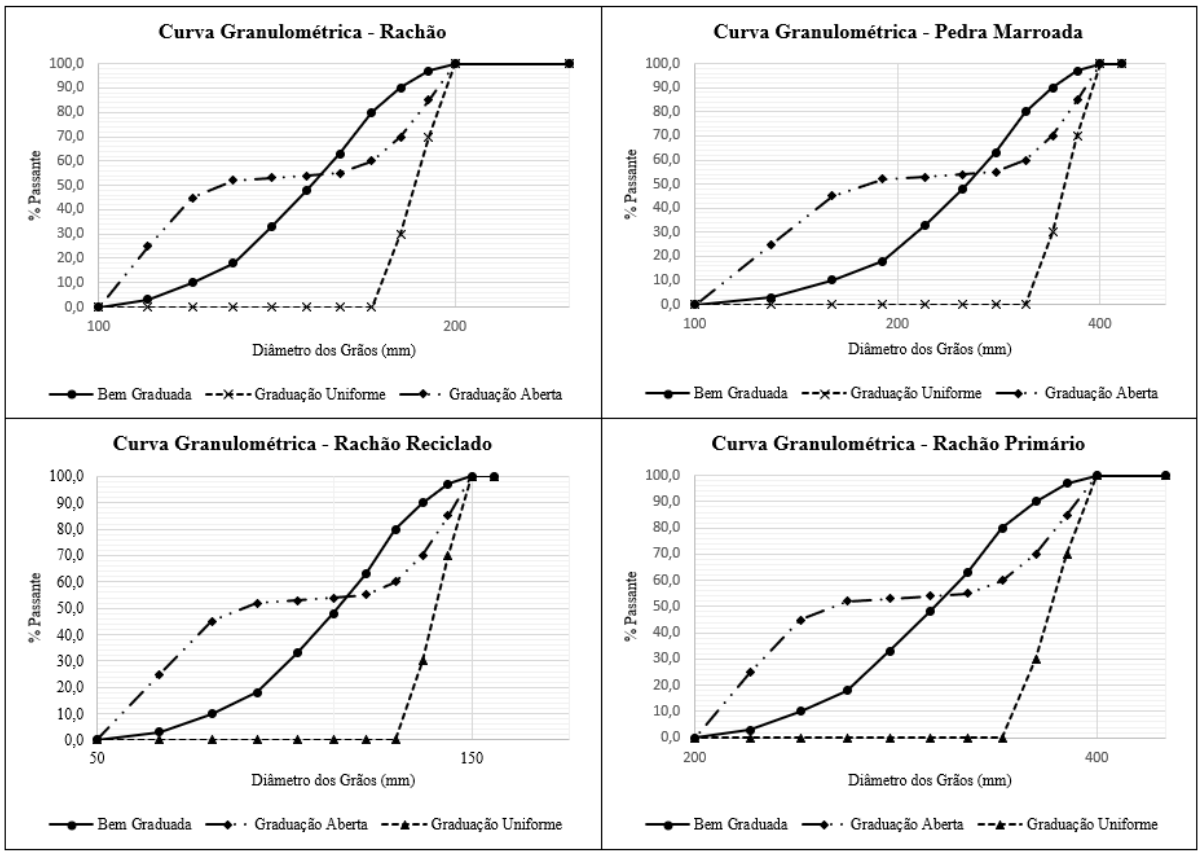


Figura 2: Curvas Granulométricas dos materiais da camada de base

Assim, diante da definição do agregado proposto para a camada de base tem-se a necessidade de compreender a interação entre o agregado e o geotêxtil não tecido, onde, com base nas características do solo mole de fundação e do solo granular, foi realizado o dimensionamento do elemento separador. De acordo com Koerner (2005), os principais esforços solicitantes no geotêxtil estão situados na tensão de tração na direção do plano de aplicação e na carga pontual do elemento granular tanto na instalação e compactação da camada de base.

Em vista disso, o presente dimensionamento, foi definido uma espessura da camada de base granular igual a 0,5 m e um subleito de solo mole com nível de água aflorante, CBR igual a 4% e diâmetro dos grãos que representam 85% do material (d_{85}) de 200 mm. Além disso, para o tráfego de veículos foi considerado a carga por eixo de caminhão de 80 kN, pressão de calibragem dos pneus sendo 580 kPa e o ângulo de espraiamento do pneu ao longo da base igual a 31°.

2.2.1. Resistência à tração localizada

A resistência à tração localizada foi calculada com intuito de determinar a tensão a qual o geossintético será submetido em relação à acomodação do solo granular, sendo o ensaio para obtenção deste parâmetro a resistência à tração *grab*, normatizado pela ASTM D4632 (2008). Assim, para a determinação da resistência à tração localizada mínima que o geotêxtil deve possuir foi utilizada a Equação 1, proposta por Giroud (1984).

$$T_e \geq FR_{TL} \times FS_{TL} \times p' \times d_v^2 \times f(\epsilon) \quad (1)$$

em que p' é a pressão causada pelo tráfego dos veículos mais o peso próprio da camada de base; d_v, o diâmetro do vazio entre os grãos, adotado com $d_{50}/3$ do material da camada de base; $f(\epsilon)$, a função deformação do geotêxtil; FR_{TL}, o fator de redução para o valor de tração localizada obtido no ensaio (adotado $FR_{TL} = 2{,}5$); e FS_{TL}, o fator de segurança contra a ruptura por tração localizada do geotêxtil (adotado $FS_{TL} = 2$).

2.2.2. Resistência ao puncionamento

A resistência ao puncionamento, de acordo com Palmeira (2018) deve ser calculado em decorrência dos materiais graúdos constituintes da camada de base terem formatos pontiagudos que podem provocar perfurações na camada do elemento separador, sendo o ensaio de puncionamento definido pela NBR ISO 12236 (2013). Desse modo, para o dimensionamento da resistência mínima ao puncionamento foi utilizada a Equação 2 da resistência admissível proposta por Koerner (2005), que relaciona a pressão localizada proveniente dos veículos, o diâmetro dos grãos da camada de base e as propriedades do geotêxtil.

$$F_{pe} \geq FR_{perf} \times FS_{perf} \times p' \times d_{50}^2 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (2)$$

em que d_{50} é o diâmetro médio dos grãos da camada de base; S_1, o fator de penetração (adotado $S_1 = 0{,}9$); S_2, o fator de escala para a equivalência geométrica entre condições de ensaio de laboratório e condições no campo (adotado $S_2 = 50(mm)/d_{50}$); S_3, o fator de forma para ajustar as formas do elemento perfurante no ensaio e no campo (adotado $S_3 = 0{,}9$); FR_{perf}, o fator de redução a ser aplicado na resistência obtida no ensaio ($FR_{perf} \geq 2$); e FS_{perf}, o fator de segurança contra o puncionamento do geotêxtil ($FS_{perf} \geq 2$).

2.2.3. Determinação do geotêxtil não tecido

A partir dos resultados de resistência à tração localizada e ao puncionamento foi utilizado o catálogo da Bidim (2012) para a seleção do geotêxtil não tecido mais adequado com base nos mínimos valores requeridos. Desse modo, o catálogo também foi usado para encontrar a massa por unidade de área do geossintético selecionado, e assim, permitindo realizar a análise da influência do diâmetro médio do material da camada de base neste parâmetro. A Tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros necessários para a determinação do geossintético.

Tabela 01: Resumo das resistências dos geossintéticos (Adaptado de Bidim, 2012)

Produto	RT 07	RT 08	RT 09	RT 10	RT 14	RT 16	RT 21	RT 26	RT 31
Resistência à tração Grab (N)	420	500	570	630	840	1005	1250	1450	1900
Puncionamento (kN)	1,1	1,3	1,5	1,7	2,3	2,7	3,3	4,0	5,2

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das Equações 1 e 2, tem-se o cálculo para o dimensionamento dos geossintéticos considerando as condições previamente estabelecidas para as características do solo mole de fundação e para a camada de base, onde foi observada a influência da graduação do agregado granular sobre os esforços atuantes no elemento separador. Então, conforme a Figura 2, obtiveram-se os parâmetros para o diâmetro médio dos grãos de cada agregado, de modo a aplicar as equações de Giroud (1984) e Koerner (2005). A Tabela 2 apresenta o geotêxtil não tecido escolhido para cada tipo de material e graduação aplicada, assim como a massa por unidade de área.

Tabela 02: Resultados do dimensionamento dos geossintéticos

Material	Graduação	d50 (mm)	Resistência à tração localizada (kN) >	Resistência ao Puncionamento (kN) >	Geotêxtil	Massa por Unidade de Área (g/m²)
Rachão	Graduação Uniforme	185	0,734	2,258	RT 14	250
	Bem Graduada	153	0,502	1,868	RT 14	250
	Graduação Aberta	128	0,351	1,562	RT 10	200
Pedra Marroada	Graduação Uniforme	355	2,687	4,306	RT 31	600
	Bem Graduada	252	1,354	3,057	RT 26	500
	Graduação Aberta	180	0,691	2,183	RT 14	250
Rachão Reciclado	Graduação Uniforme	135	0,389	0,405	RT 08	150
	Bem Graduada	101	0,218	0,303	RT 07	130
	Graduação Aberta	77	0,127	0,231	RT 07	130
Rachão Primário	Graduação Uniforme	370	2,983	4,587	-	-
	Bem Graduada	303	2,000	3,756	-	-
	Graduação Aberta	255	1,417	3,161	RT 31	600

Sendo assim, nota-se que a graduação uniforme apresenta os maiores requisitos mínimos de resistência para o geossintético, devido ao fato de que não há uma grande variação granulométrica, contribuindo assim para um elevado valor do diâmetro médio dos grãos. Por outro lado, pode-se observar que a graduação aberta apresenta valores menores de solicitação, em virtude do patamar presente na curva granulométrica estar situado para porcentagem passante maior que 50%. Por sua vez, a distribuição bem graduada mostra um resultado esperado, uma vez que é um ponto de equilíbrio entre as outras duas curvas simuladas e consequentemente resultam numa solicitação mecânica intermediária do geotêxtil não tecido.

Nesse sentido, verifica-se que o diâmetro médio dos grãos é um fator preponderante na solicitação das resistências, ou seja, quanto maior o diâmetro dos agregados constituintes da camada de base maior será a solicitação exercida no geotêxtil. No geral, a partir dos resultados, observa-se que o tamanho dos agregados exerce influência direta na massa por unidade de área do geotêxtil não tecido empregado como elemento de separação. Esse fator está diretamente relacionado a exigência mecânica, que por sua vez requer um geotêxtil de elevada massa por unidade de área, apresentando assim maior espessura, densidade de fibras e capacidade de suporte dos esforços solicitantes.

Além disso, para situações em que o tamanho do agregado foi maior que 300 mm, notou-se que não há geotêxteis não tecido registrados no catálogo da Bidim (2012) que apresentem a solicitação de resistência à tração localizada maior que 1900 kN. Ainda assim, é importante ressaltar que o dimensionamento foi realizado definindo uma situação específica para o solo de fundação, camada de base e do tráfego típico de veículos, o que evidencia que para outros parâmetros há possibilidade do suporte do geossintético para tais diâmetros.

4. CONCLUSÃO

O dimensionamento realizado evidencia que a granulometria dos agregados influencia diretamente a escolha do geotêxtil não tecido utilizado como elemento de separação em estradas não pavimentadas construídas sobre solos moles. Nesse sentido, notou-se que o diâmetro médio dos grãos (d_{50}) dentro de um sistema já definido é fator determinante para o aumento das exigências mecânicas de resistência à tração localizada e ao

puncionamento. Desse modo, a distribuição das curvas granulométricas fez com que a graduação uniforme, com alto valor de d_{50}, apresentasse elevadas solicitações mínimas de resistência, enquanto a graduação aberta e a bem graduada demonstraram uma exigência menos crítica.

Além disso, os resultados apontaram que, para todos os materiais analisados, a massa por unidade de área aumenta conforme o aumento dos esforços solicitantes, o que demonstra que quanto maior a solicitação, maior deve ser a espessura do geotêxtil não tecido. Assim, o presente estudo reforça a necessidade de um dimensionamento adequado para a escolha do geotêxtil, bem como uma caracterização completa dos agregados utilizados na camada de base de solo granular e para o solo mole de fundação a fim de garantir o pleno desempenho estrutural e a durabilidade da via.

Agradecimentos
Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelas bolsas e pelo apoio financeiro à pesquisa (CNPq/FNDCT/MCTI: Processo 405594/2022-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2013). NBR ISO 12236: Geossintéticos: ensaio de puncionamento estático (punção CBR). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ARATU (2025). Produtos. Disponível em: https://aratumineracao.com.br/produtos/. Acesso em: 30 de maio de 2025

ASTM D 4632. (2008). Standard test method for grab breaking load and elongation of geotextiles. *Annual Book of ASTM Standards*, 4.

Bernucci, L. L. B., Motta, L. M. G. D., Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.*

Bidim (2012). Especificação Técnica Geotêxtil Bidim. Disponível em: https://techduto.com.br/produto/geotextil-bidim/. Acesso em: 10 de junho de 2025.

CNT (2024). Confederação Nacional dos Transportes. *PESQUISA CNT de Rodovias*, 2024. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/. Acesso em: 07 de junho de 2025.

DNIT (2023) Norma DNIT 441/2023 – ES: Camada granular para fundação de aterros sobre solos moles – Especificação de serviço. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Giroud, J. P (1984). *Geotextiles and geomembranes, definitions, properties and designs*. St. Paul, MN, USA: IFAI.

Giroud, J., & Han, J. (2016). Mechanisms governing the performance of unpaved roads incorporating geosynthetics. In *Geosynthetics* (Vol. 34, No. 1, pp. 22-36).

Góngora, Ivonne & Palmeira, Ennio. (2015). *Estradas não Pavimentadas Reforçadas com Geossintéticos: importância dos parâmetros de desempenho do geossintético e interação com o material de aterro*. DOI: 10.20906/CPS/CB-07-0054.

Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics* (Vol. 796). Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall.

Oda, S. (1995). *Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. DOI: 10.11606/D.18.1995.tde-14012005-161818.

Palmeira, E. M. (2018). *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. Oficina de Textos.

Pedras Morro Grande (2025). Produtos. Disponível em https://pedrasmorrogrande.com.br/portifolio/. Acesso em: 30 de maio de 2025

Proença, R. F. D. M. (2018). *Comportamento de estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos*. Master's thesis.

RIUMA Ambiental (2025). Produtos. Disponível em: https://riumaambiental.com.br/servicos/id/33/reciclagem/. Acesso em: 30 de maio de 2025

RIUMA Mineração (2025). Produtos. Disponível em: https://riuma.com.br/produtos/. Acesso em: 30 de maio de 2025

Sigurdsson, O. (1993). *Geosynthetic stabilization of unpaved roads on soft ground: A field evaluation*. Doctoral dissertation, University of British Columbia.

Zornberg, J. G. (2017). Functions and applications of geosynthetics in roadways. *Procedia engineering*, 189, 298-306. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.048

Raimundo Nonato da Costa Neto (raimundoneto25@usp.br)
João Pedro de Oliveira Alves Neto (jpalvesneto@usp.br)
Antonio Peroba de Oliveira Teodoro (antonio.teodoro@usp.br)
Nicole Hansen (nikehansen123@gmail.com.br)
Jefferson Lins da Silva (jefferson@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia de Transportes (STT), Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590, Brasil.

METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO APRIMORADA DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES NA PAVIMENTAÇÃO

João Victor Lima Alencar[1], Alfran Sampaio Moura[1], Juceline Batista dos Santos Bastos[2], Iuri Sidney Bessa[1], Jorge Barbosa Soares[1], Luiz Guilherme Rodrigues de Mello[3, 4], Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos[1]

[1]Universidade Federal do Ceará, [2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, [3]Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, [4]Universidade de Brasília

RESUMO

Este artigo propõe uma metodologia aprimorada para calibração de parâmetros de deformação permanente (DP) de solos, visando padronizar as previsões de desempenho. A metodologia utilizou dados de ensaios triaxiais de carga repetida em 6 materiais distintos e a regressão linear múltipla em 130 combinações de pares de tensões. Esta abordagem sistemática em planilhas automatizadas permitiu a identificação da combinação com maior coeficiente de determinação (R^2), que foi então refinada por um processo de aprimoramento não linear (Solver). Resultados demonstraram a eficácia da metodologia em elevar o R^2 em todos os materiais analisados. Contudo, coeficientes de regressão revelaram variabilidades e, em certos casos, inconsistências físicas, mesmo com altos R^2. Tais achados sugerem uma potencial falha na formulação do modelo utilizado. Conclui-se que a metodologia aprimora o ajuste estatístico, mas reforça a necessidade de uma análise crítica da validade física dos parâmetros para gerar previsões confiáveis em projetos de pavimentos.

1. INTRODUÇÃO

O acúmulo irreversível de deformações sob carregamento cíclico, conhecido como deformação permanente (DP) em solos e materiais granulares, afeta diretamente a durabilidade e o desempenho estrutural de pavimentos rodoviários (Barksdale, 1984; Uzan, 1985; Lekarp e Dawson, 1998). Em ambiente laboratorial, a DP é comumente caracterizada por meio de ensaios triaxiais de carga repetida, os quais tentam simular as condições de tensão e carregamento observadas em campo, com diversos autores avaliando o efeito das tensões na deformação permanente (Lima, 2019; Mota *et al*., 2024a). Lima *et al*. (2025) avaliaram a DP de materiais de pavimentação por meio desses ensaios, enquanto Mota *et al*. (2024b) avançaram na otimização da caracterização da DP em materiais não estabilizados quimicamente por meio do uso de curvas mestras, evidenciando a relevância dessa abordagem para o projeto de pavimentos.

Tradicionalmente fundamentado em métodos empíricos, o dimensionamento de pavimentos tem progressivamente incorporado abordagens mecanístico-empíricas, nas quais o modelo de Guimarães (2009) se destaca como referência no Brasil, consolidando-se como ferramenta importante para a análise e o projeto estrutural. Nesse contexto, Rocha *et al*. (2024) avaliaram a contribuição de camadas granulares e superficiais para a DP em pavimentos asfálticos de algumas estruturas. Contudo, a calibração desses modelos ainda necessita de protocolos padronizados, especialmente no que diz respeito aos critérios de seleção metodológica (Bessa *et al*., 2024) e ao uso de coeficiente de determinação (R^2). Santos *et al*. (2022) investigaram a incerteza de medição em ensaios de deformação permanente aplicados a solos lateríticos, contribuindo para a discussão sobre a confiabilidade dos dados experimentais.

Essa lacuna metodológica frequentemente resulta em parâmetros de regressão que refletem inadequadamente o comportamento físico dos materiais, comprometendo a confiabilidade das previsões. Bessa *et al*. (2024) analisaram o impacto do protocolo de calibração na estimativa do Afundamento em Trilha de Roda (ATR) em materiais granulares, reforçando a necessidade de critérios padronizados. A seleção dos pares de tensão utilizados na regressão e a definição de novos critérios de parada são itens importantes que influenciam diretamente a precisão e a validade dos parâmetros obtidos. Nesse sentido, Araújo *et al*. (2024) propuseram critérios de parada para a caracterização da DP de materiais granulares, demonstrando esforços para o fortalecimento metodológico da área.

Diante deste cenário, este artigo propõe uma metodologia aprimorada de calibração dos parâmetros de deformação permanente, com base em regressão linear múltipla, visando estabelecer uma correlação mais representativa entre os dados experimentais e as previsões fornecidas pelos modelos, contribuindo para maior precisão e confiabilidade no dimensionamento de pavimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

No presente estudo, foram analisados 6 solos, classificados de acordo com o sistema AASHTO e compactados com diferentes níveis de energia (normal, intermediária e modificada), conforme detalhado na Tabela 1. Os solos com energia de compactação normal são característicos daqueles do subleito ou aterro. Aqueles compactados com energia intermediária são normalmente empregados em sub-base, enquanto os solos compactados com energia modificada são utilizados na camada de base do pavimento. Adicionalmente, os materiais analisados possuem diferentes origens geográficas.

Tabela 1: Características dos materiais analisados no estudo.

Material	Camada	Local	Classificação (AASHTO)	Energia de Compactação (Proctor)	Umidade ótima (%)
M1BM	Base	Maranhão	A-2-4	Modificada	8,4
M2SBM	Sub-Base	Maranhão	A-2-4	Intermediária	9,2
M3ATM	Aterro	Maranhão	A-4	Normal	14,9
M4BP	Base	Piauí	A-1-b	Modificada	9,1
M5SBP	Sub-Base	Piauí	A-1-b	Intermediária	9,9
M6ATB	Aterro	Ceará	A-2-4	Normal	9,6

2.2. Modelo de deformação permanente e sua linearização

O modelo de deformação permanente desenvolvido por Guimarães (2009), selecionado para este artigo e adotado na norma DNIT 179 (2018), utiliza parâmetros de regressão (Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3, Ψ_4) para estimar a deformação permanente específica de solos com base em tensões confinantes (σ_3) e desvio (σ_d), número de ciclos de carga (N) e tensão de referência (pressão atmosférica, ρ_0). O modelo é dado pela Equação (1).

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (1)$$

A metodologia deste artigo utiliza a regressão linear múltipla para a calibração do modelo. Para tal, a Equação (1) é linearizada utilizando-se a transformação logarítmica, resultando na Equação (2).

$$ln\,(\varepsilon_p) = ln(\psi_1) + \psi_2 \cdot ln\left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right) + \psi_3 \cdot ln\left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right) + \psi_4 \cdot ln(N) \quad (2)$$

Nesta forma linearizada, os parâmetros de regressão podem ser obtidos como coeficientes de uma regressão linear múltipla, onde $\ln(\varepsilon_p)$ é a variável dependente e $\ln(\sigma_3/\rho_0)$, $\ln(\sigma_d/\rho_0)$ e $\ln(N)$ são as variáveis independentes.

2.3. Metodologia de calibração aprimorada por regressão linear múltipla

A calibração dos parâmetros do modelo de Guimarães (Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3, Ψ_4) foi realizada a partir de ensaios de deformação permanente conduzidos nas amostras apresentadas na Tabela 1, sendo cada uma submetida a 9 pares de tensões distintos indicados na norma DNIT ME 179/2018. Os pares de tensão utilizados nos ensaios são mostrados na Figura 2. Com base na exigência mínima de 6 pares de tensões para o ajuste do modelo, foram geradas 130 combinações possíveis a partir dos 9 pares disponíveis: 1 combinação com 9 pares, 9 com 8 pares, 36 com 7 pares e 84 com 6 pares. Cada combinação resultou em um conjunto de parâmetros do modelo de Guimarães e um R^2.

De acordo com Montgomery e Runger (2023), a equação geral da regressão linear múltipla pode ser expressa matricialmente como demonstrado na Equação (3), onde Y é o vetor coluna das observações da variável dependente, X é a matriz dos dados das variáveis independentes (para este estudo, $\ln(\sigma_3/\rho_0)$, $\ln(\sigma_d/\rho_0)$ e $\ln(N)$), onde a primeira coluna é composta por valores unitários para representar o intercepto, β é o vetor coluna dos coeficientes a serem estimados, e ε é o vetor coluna dos erros residuais do modelo.

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (3)$$

A solução para estimar os coeficientes β que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos (ε) é dada pela

expressão matricial apresentada na Equação (4).

$$\hat{\beta} = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \tag{4}$$

A regressão linear múltipla foi aplicada a todas as 130 combinações, e a grande vantagem dessa abordagem sistemática reside na automação dos cálculos, permitida pela construção de uma planilha eletrônica dedicada com 130 abas, onde cada combinação foi processada automaticamente pelo método matricial, facilitando a identificação instantânea da combinação com o maior R². Esta combinação aprimorada via regressão linear múltipla foi, em seguida, submetida a um processo de aprimoramento não linear utilizando a ferramenta Solver (Microsoft Excel), refinando ainda mais a correlação e maximizando o R², como demonstrado na Figura 1.

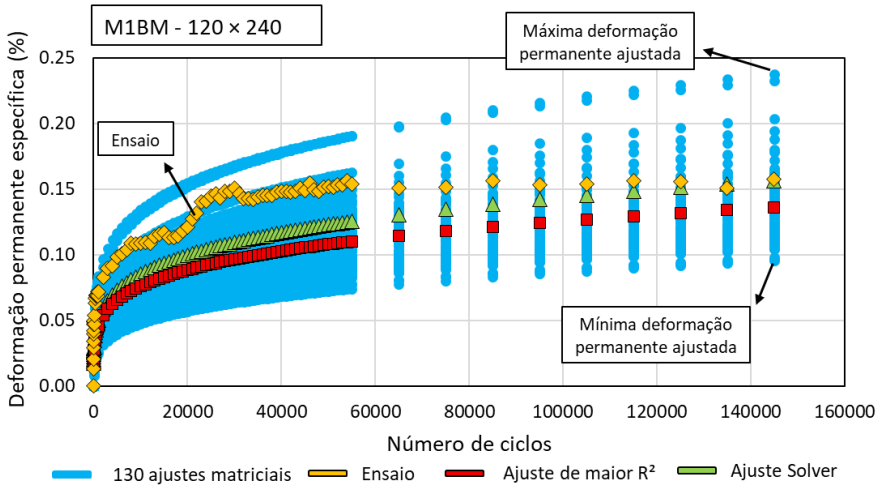


Figura 1: Calibração aprimorada de deformação permanente para o material M1BM (120×240 kPa).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio da metodologia de calibração aprimorada são apresentados nesta seção, com foco nos parâmetros de regressão do modelo de Guimarães e na melhoria do ajuste. A Figura 2 ilustra as curvas de deformação permanente obtidas experimentalmente para cada um dos 6 materiais, sob os 9 diferentes pares de tensões aplicados. Esses dados experimentais são a base para o processo de calibração.

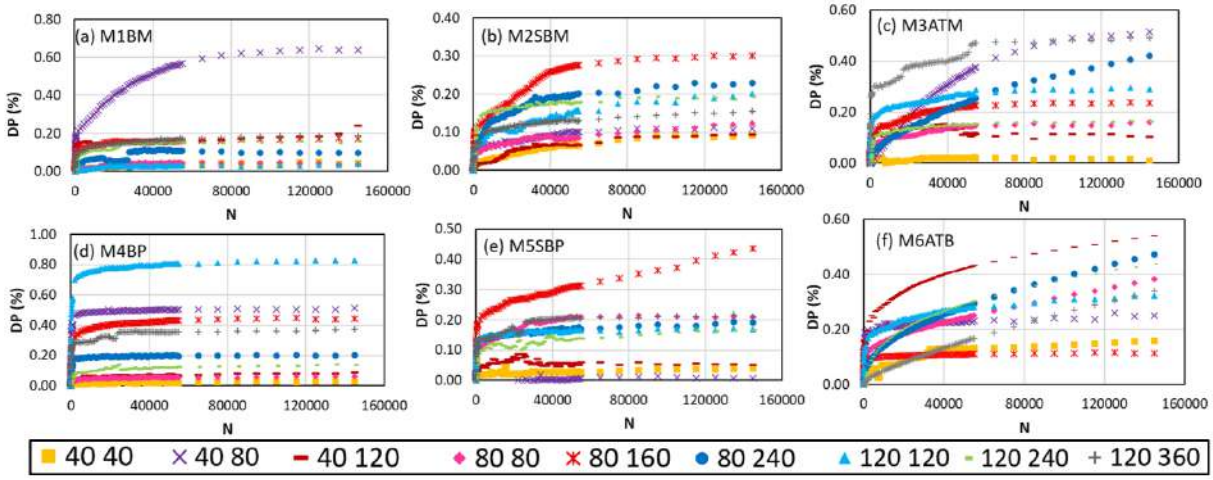


Figura 2: Curvas experimentais de deformação permanente dos solos estudados.

A Tabela 2 demonstra os R² obtidos tanto pela regressão linear múltipla inicial (RL) quanto após o processo de aprimoramento com o Solver, além dos coeficientes de regressão (Ψ_1 a Ψ_4) do modelo de Guimarães resultantes do aprimoramento final. Observa-se que a aplicação do Solver consistentemente melhora o R² em todos os materiais, demonstrando a eficácia da etapa de aprimoramento na maximização do ajuste estatístico. Para o material M1BM, por exemplo, o R² aumentou de 0,92 para 0,97, enquanto para o M4BP, o R² saltou de 0,88 para 0,95.

Tabela 2: Coeficientes aprimorados do modelo e R^2 obtidos via Regressão Linear (RL) e Solver.

Coeficiente	M1BM	M2SBM	M3ATM	M4BP	M5SBP	M6ATB
R^2 (RL)	0,92	0,94	0,89	0,88	0,84	0,82
R^2 (Solver)	0,97	0,95	0,90	0,95	0,88	0,90
Ψ_1	0,0010	0,0112	0,0275	0,0049	0,0304	0,0033
Ψ_2	-4,8214	0,1245	0,9015	-0,9545	1,4285	-2,1458
Ψ_3	3,4773	0,5505	0,4281	2,3815	0,1322	1,2816
Ψ_4	0,2399	0,2182	0,1889	0,1326	0,1263	0,2465

A análise dos coeficientes de regressão aprimorados (Ψ) revelou variabilidades e, em alguns casos, valores que demandam cautela na interpretação física. Por exemplo, os coeficientes Ψ_2 dos materiais M2SBM e M3ATM apresentaram valores positivos, o que é fisicamente inconsistente, uma vez que o aumento da tensão confinante deveria reduzir a deformação, e não intensificá-la. Além disso, a interpretabilidade dos coeficientes pode ser comprometida quando ajustados a dados com ruído experimental. Cabe ressaltar que o método de calibração proposto, aplicável de forma eficiente a diferentes modelos, identificou os ajustes matematicamente mais adequados aos dados experimentais para o modelo considerado. Entretanto, essa boa correlação estatística não assegura que os parâmetros reflitam de maneira fidedigna o comportamento físico do material. Tal constatação sugere uma limitação potencial da formulação de Guimarães (2009), possivelmente não totalmente apropriada para representar a deformação permanente de solos e materiais granulares em todas as condições. Essa inconsistência tem sido frequentemente relatada na literatura (Guimarães, 2009; Lima et al., 2019; Santos et al., 2022; Mota et al., 2024a; Mota et al., 2024b; Rocha et al., 2024; Bessa et al., 2024; Lima et al., 2025), o que reforça a necessidade de uma análise crítica dos parâmetros, mesmo diante de elevados valores de R^2. A Figura 3 apresenta as curvas de deformação permanente previstas a partir dos parâmetros aprimorados da Tabela 2, considerando os pares de tensões associados aos maiores valores de R^2.

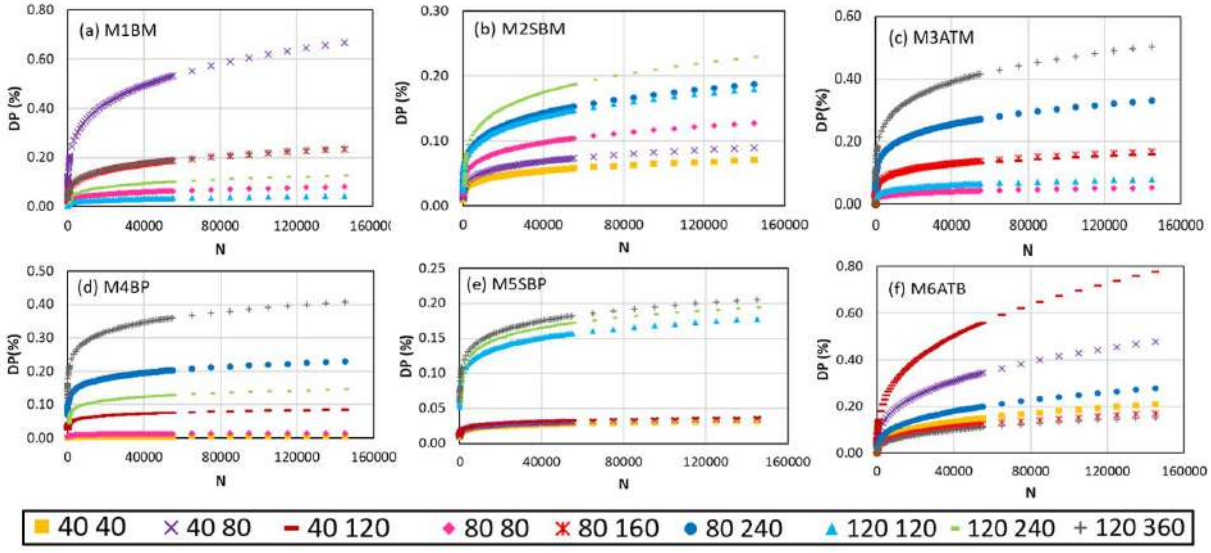


Figura 3: Curvas de deformação permanente previstas com os parâmetros aprimorados para os materiais estudados.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma metodologia aprimorada para a calibração de parâmetros de deformação permanente de materiais granulares e de solos usados em pavimentos rodoviários com base em regressão linear múltipla, buscando padronizar as previsões de desempenho e estabelecer correlações adequadas entre dados experimentais e as previsões do modelo. A aplicação sistemática da metodologia, que envolveu a análise das 130 combinações de pares de tensões e posterior aprimoramento via Solver, demonstrou a viabilidade e a eficácia da abordagem adotada. A regressão linear múltipla, além de permitir a automação em planilhas, mostrou-se capaz de produzir resultados reprodutíveis e estatisticamente consistentes. No entanto, a análise crítica dos coeficientes de regressão aprimorados (Ψ) revelou variabilidades e incompatibilidade com o comportamento físico, inconsistências também encontradas na literatura, o que sugere uma potencial limitação do modelo, mesmo quando o R^2 é elevado. Conclui-se que a metodologia proposta representa um avanço, mas a confiabilidade das previsões depende, de forma crítica, da integração entre o rigor estatístico e o julgamento

técnico fundamentado.

Agradecimentos
Os autores agradecem à Fundação Cearense de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (POSDEHA/UFC) pelo apoio e incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, M. J. R.; Barroso, S. H. A.; Ribeiro, A. J. A.; Vieira, F. A. F. (2024) Definition of new stopping criteria for the characterization of permanent deformation of granular materials. *Transportation Geotechnics*, v. 44, p. 101159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101159

Barksdale, R. D. (1984) Performance of crushed-stone base courses. *Transportation Research Record*, n. 954, p. 78–87.

Bessa, I. S.; Bastos, J. B. S. e Soares, J. B. (2024) Effect of the Calibration Protocol on the Prediction of Rutting Performance of Granular Materials. In: *International Symposium on Asphalt Pavement & Environment*, Montreal. Springer, p. 291–295. DOI: 10.13140/RG.2.2.11961.58726.

DNIT (2018) Norma DNIT 179/2018 - IE: Pavimentação - Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.

Guimarães, A. C. R. (2009) Um Método Mecanístico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Lekarp, F. e Dawson, A. (1998) Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *Construction and Building Materials*, v. 12, n. 1, p. 9–18. DOI: https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00078-0

Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G. e Aragão, F. T. S. (2019) ANÁLISE DAS TENSÕES APLICADAS NOS ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E BRITAS PARA O DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS. In: *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, Balneário Camboriú-SC. ANPET, p. 1222–1233.

Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Guimarães, A. C. R.; Mota, B. C.; Aragão, F. T. S. (2025) Investigation of the deformability of sandy soils for pavement layers under repeated load triaxial tests. *Construction and Building Materials*, v. 477, p. 141367. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141367.

Montgomery, D. C.; R. G. C.; Runger, G. C. (2023) *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Mota, B. C.; Ubaldo, M. O.; Aragão, F. T. S. e Nascimento, L. A. H. (2024a) EFEITO DAS TENSÕES NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE SOLOS E MATERIAIS GRANULARES: UMA ANÁLISE A PARTIR DE CURVAS MESTRAS. In: *Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Florianópolis, SC. ANPET, v. 3, p. 30251.

Mota, B. C.; M. O. Ubaldo; C. D. A. Lima; L. A. H. Nascimento; F. T. S. Aragão (2024b) Optimized characterization of the permanent deformation of unbound soils and granular materials considering the master curve concept. *Transportation Geotechnics*, v. 47, p. 101291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101291.

Rocha, P. L. R.; Vale, A. C. F.; Bastos, J. B. S.; Babadopulos, L. F. A. L.; Parente Jr., E. e Soares, J. B. (2024) ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF GRANULAR AND SURFACE LAYERS TO THE RUTTING OF ASPHALT PAVEMENTS. In: *Anais do 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Florianópolis, SC. ANPET, v. 3.

Santos, J. T. A.; Silva, P. A. L. e Guimarães, A. C. R. (2022) Evaluation of measurement uncertainty in permanent deformation tests of lateritic soils. *Transportes*, v. 30, n. 2, p. 2678. DOI: 10.14295/transportes.v30i2.2678

Uzan, J. (1985) Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, v. 1022, n. 1, p. 52–59.

João Victor Lima Alencar (joao.alencar.ec@gmail.com)
Alfran Sampaio Moura (alfransampaio@ufc.br)
Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, R. Prof. Armando Farias, 713, Pici, Fortaleza-CE, Brasil.
Juceline Batista dos Santos Bastos (juceline.santos@ifce.edu.br)
Instituto Federal do Ceará, Departamento de Construção Civil, Av. Treze de Maio, 1989, Fátima, Fortaleza-CE, Brasil.
Iuri Sidney Bessa (iuri@det.ufc.br)
Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, R. Prof. Armando Farias, 703, Pici, Fortaleza-CE, Brasil.
Luiz Guilherme Rodrigues de Mello (luiz.mello@dnit.gov.br)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, SAN Quadra 3, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília-DF, Brasil.
Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (babadopulos@ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Campus do Pici, 733, Pici, Fortaleza-CE, Brasil.

OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS ESTABILIZADAS GRANULOMETRICAMENTE COM TEXTURAS PRÉ-DEFINIDAS PELO AJUSTE SELETIVO DE FRAÇÕES DOS MATERIAIS

Mateus Marcial Magalhães Cavalcante, Suelly Helena de Araújo Barroso, Antonio Nobre Rabelo
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
Tradicionalmente, a dosagem de solos estabilizados granulometricamente é realizada com métodos gráficos ou por tentativa e erro. Alternativamente, a programação linear permite dosar imediatamente um número qualquer de solos e agregados, com minimização de custos e atendendo requisitos além da faixa granulométrica visada. Para muitas jazidas exploradas, a combinação de solos naturais não possibilita graduações que satisfaçam adequadamente parâmetros de pesquisa ou projeto. Exemplos incluem a avaliação de textura para produtos de imprimação e bases estabilizadas quimicamente. Esse trabalho desenvolveu um modelo de programação linear que avalia a textura da estabilização e inclui o descarte opcional de parte do material retido para garantir as características finais do solo. Três exemplos de textura foram considerados: (i) argilosa; (ii) siltosa e (iii) arenosa. As curvas de *trade-off* mostraram o equilíbrio entre a aproximação à faixa e o descarte de materiais, ilustrando que certas misturas são inviáveis com solos naturais.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As misturas estabilizadas granulometricamente são amplamente usadas na fundação de pavimentos rodoviários. Esse processo consiste na combinação e manipulação de solos e agregados em proporções definidas para aprimorar a capacidade de suporte e drenagem, além de reduzir a deformabilidade. Em bases, busca-se tradicionalmente maximizar o contato grão-grão com uma mistura bem graduada de material graúdo, possivelmente contendo uma certa porção de ligante argiloso (Bernucci *et al.*, 2022, p. 555, 563–565; DNIT, 2010; Silveira e Silveira, 1964, p. 2–4; Villibor, 1978, p. 2–3). A estabilização granulométrica é orientada por faixas granulométricas, limites de especificação do material passante que dependem da camada considerada, condições de tráfego e até mesmo dos materiais empregados (DNIT, 2006, p. 136, 2009, 2010, 2022).

A dosagem dessas misturas é tipicamente feita de forma iterativa, ajustando a curva final de passantes com o auxílio de planilhas eletrônicas. Alternativamente, procedimentos gráficos ou algébricos podem ser usados, como o método gráfico de Rothfuchs (D. Lee, 1973; Popovics, 1973; Silveira e Silveira, 1964). Esses métodos demandam maior esforço manual, cuja eficácia deles reduz conforme aumenta o número de componentes considerados para a mistura. Além disso, eles dependem da experiência do analista para indicar uma solução viável: não garantem o atendimento a outros requisitos da mistura final, como o limite de especificação do limite de liquidez e de plasticidade (DNIT, 2006, p. 136), e também não indicam a solução mais econômica entre as granulometrias viáveis.

Abordagens de otimização podem tornar a dosagem mais eficiente e abrangente. Trabalhos iniciais buscaram a minimização dos desvios dos passantes aos pontos centrais dos limites de especificação (Mackintosh, 1959; Neumann, 1964). Contudo, esse método não garante que a mistura dosada atenda a faixa granulométrica ou considera a variabilidade dos materiais empregados ou da mistura (Berwanger, 1965; Neumann, 1966). Além disso, mesmo entre misturas enquadradas na mesma faixa granulométrica, outros parâmetros como o teor de finos pode afetar suas características e o desempenho da camada (Carvalho *et al.*, 2014).

Ao longo do tempo, essa abordagem foi substituída pela programação matemática, que se baseia na otimização de uma função objetivo cujas variáveis satisfaçam restrições de viabilidade. Esses modelos evoluíram de formulações lineares e quadráticas que minimizam os resíduos aos pontos centrais dos limites e os custos da mistura (Easa e Can, 1985a; Ritter e Shaffer, 1961), até métodos que consideram a incerteza nos percentuais passantes dos solos e da mistura final (Easa e Can, 1985b; Kikuchi *et al.*, 2012; S. M. Lee e Olson, 1983; Montemanni *et al.*, 2012; Tabucanon *et al.*, 1980) e abordagens multiobjetivo (Easa e Can, 1985b; Toklu, 2005). No Brasil, o uso de técnicas de otimização para a dosagem da estabilização granulométrica é limitado, restrigindo-se a duas implementações em Java (Pimenta *et al.*, 2015) e R-Shiny (Junior *et al.*, 2023).

Para fins de pesquisa experimental, é necessário dosar solos com texturas específicas, como a avaliação de produtos para imprimação e estabilizações químicas. No entanto, os métodos anteriores ignoram a textura final. Além disso, em certas jazidas, os solos disponíveis não são capazes de atender a faixa granulométrica desejada. Em alguns caso é necessário o descarte parcial em certas peneiras para alcançar as curvas granulométricas

desejadas. Este trabalho propõe um modelo de otimização que garante ambos os critérios pelo ajuste das granulometrias dos solos por meio de descartes parciais nas peneiras, com perdas minimizadas. O modelo foi aplicado para três misturas de solo-brita, subdivididas em textura arenosa, argilosa e siltosa.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Componentes de mistura avaliados

Foram avaliadas três graduações de brita e três solos de localidades distintas (Várzea Alegre, Camocim e Paraipaba) do estado do Ceará. A granulometria e caracterização básica desses materiais está disponível na Tabela 1, incluindo a faixa granulométrica D visada com os requisitos adicionais da mistura final (DNIT, 2006, p. 136, 142–143, 2022, p. 9) e a textura do solo conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 1: Caracterização básica dos componentes para dosagem das misturas estabilizadas granulometricamente

Peneiras		Percentual Passante (%)							
N°	# (mm)	Brita 1″	Brita ¾″	Brita ½″	Várzea Alegre	Camocim	Paraipaba	Faixa D	Tol.
2″	50,0	96,75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-
1″	25,4	25,72	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-
⅜″	9,52	0,19	14,16	97,95	100,00	98,00	100,00	60-100	±7
#4	4,75	0,09	1,89	5,23	99,60	80,00	99,60	50-85	±5
#10	2,00	0,09	1,44	0,38	97,10	71,00	97,10	40-70	±5
#40	0,42	0,09	0,58	0,08	76,10	50,00	76,10	25-45	±2
#200	0,075	0,00	0,00	0,00	48,40	4,00	48,40	10-25	±2
Graduação									
AASHTO		-	-	-	A-4	A-1-b	A-3	-	
LL (%)		NP	NP	NP	NP	NP	NP	<25	
LP (%)		NP	NP	NP	NP	NP	NP	<6	
Razão #200/#40		0	0	0	0,636	0,08	0,64	<2/3 (0,667)	
Custo (R$/m³)		152,02	152,02	152,02	33,84	33,84	33,84	-	
≥ Pedregulho (%)		99,91	98,56	99,62	2,93	25,82	0,06		
Areia Grossa (%)		0,00	0,74	0,28	14,27	16,04	4,01		
Areia Média (%)		0,07	0,50	0,08	25,37	42,17	73,95		
Areia Fina (%)		0,02	0,20	0,02	12,98	11,72	12,88		
Silte (%)		0	0	0	39,42	3,95	7,29		
Argila (%)		0	0	0	5,03	0,30	1,82		

Este trabalho focará na dosagem em três misturas de solo-brita que satisfaçam certas classes de textura em bases para fins acadêmicos: (i) caráter argiloso, definido como partículas inferiores à 0,002 mm; (ii) caráter siltoso, de partículas entre 0,002 mm e 0,06 mm; e de (iii) caráter arenoso, para partículas entre 0,06 mm e 2,0 mm inferiores à pedregulhos (superiores à 2,0 mm e inferiores à 60 mm). Os custos foram orçamentados baseado na Tabela SEINFRA 028.1 com desoneração pelos itens C3132 e C3216 (SEINFRA-CE, 2023).

2.2. Modelo de otimização com pré-ajuste de curvas

Para compor as misturas de classes texturais distintas, o modelo de otimização proposto consiste na otimização dos desvios entre o percentual passante da mistura final aos pontos centrais da faixa granulométrica, incluindo a possibilidade de descarte prévio de certas frações dos materiais. A função objetivo da regressão por desvios absolutos mínimos é dada na Equação 1, onde $e_i^- \geq 0$ e $e_i^+ \geq 0$ são os desvios aos pontos centrais da faixa granulométrica, da restrição na Equação 2. O peso λ indica a importância relativa de cada objetivo.

$$\min \lambda \sum (e_i^- + e_i^+) + (1 - \lambda) \sum \frac{M_{\text{fim}} - M_{\text{inicio}}}{M_{\text{fim}}} \tag{1}$$

$$\mathrm{P}_i^{\text{fim}} - 0{,}5 \cdot (\mathrm{LS}_i + \mathrm{LS}_i) = e_i^+ + e_i^- \tag{2}$$

Para cada índice de diâmetro de grão i, parâmetro de limite inferior $0 \leq \mathrm{LI_i} \leq 1$ e superior $0 \leq \mathrm{LS_i} \leq 1$, e percentual passante da mistura final $0 \leq P_i^{\text{fim}} \leq 1$. Note que a notação do sinal de igualdade na Equação 2 é representado em um programa linear como duas restrições de $\geq e_i^+ + e_i^-$ e $\geq -(e_i^+ + e_i^-)$. Observe que embora haja 7 peneiras, é necessário considerar 8 diâmetros i para representar a proporção de finos retida.

Primeiramente, as restrições da Equação 3 foram adicionadas para obter os percentuais retidos dosados:

$$\begin{aligned} R_1^{\text{inicio}} &= 1 - P_1^{\text{inicio}}, \quad P_8^{\text{inicio}} = 0, \quad R_1^{\text{fim}} = 1 - P_1^{\text{fim}}, \quad P_8^{\text{fim}} = 0, \\ R_{\text{i}}^{\text{inicio}} &= P_{i-1}^{\text{inicio}} - P_i^{\text{inicio}}, \quad P_7^{\text{inicio}} = R_8^{\text{inicio}}, \quad R_{\text{i}}^{\text{fim}} = P_{i-1}^{\text{fim}} - P_p^{\text{fim}}, \quad P_8^{\text{fim}} = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

Onde tem-se os percentuais passantes e retidos da mistura sem alterações $0 < P_i^{\text{inicio}}, R_{\text{p}}^{\text{inicio}} < 1$; e os percentuais passantes e retidos após o possível descarte parcial de sua granulometria $0 < P_i^{\text{fim}}, R_{\text{p}}^{\text{fim}} < 1$. O material removido no diâmetro retido em i para o material s (solo ou brita) é então definido pela Equação 4.

$$0 \leq \Delta_{i,s} \leq \phi_s^{\text{mat}} \cdot R_{i,s}^{\text{mat}} \cdot M_{\text{inicial}}, \quad \sum \Delta_{i,s} \leq M_{\text{limite}} \tag{4}$$

Onde ϕ_s é a proporção utilizada do material s otimizada; $R_{i,s}^{\text{mat}}$ é o parâmetro do percentual retido de diâmetro de grão i do material s calculado pelos percentuais passantes; $M_{\text{inicial}} \geq 0$ é o parâmetro para quantidade de massa usada para compor a mistura final, sem descartes; e M_{limite} é a quantidade máxima a ser descartada, opcional. Dessa forma, tem-se as restrições para a proporção de solos na Equação 5.

$$\sum \phi_s \cdot P_{i,s}^{\text{mat}} = P_s^{\text{inicial}}, \quad \sum \phi_s = 1 \tag{5}$$

Prosseguiu-se com as restrições para a massa da mistura final, onde pode haver descarte de material. Como essa etapa envolve uma multiplicação entre variáveis, é necessário usar um envelope de McCormick para resolver o problema com programação linear. Para as massas finais da mistura $M_i^{\text{fim}} \geq 0$ em cada diâmetro i e o total $M_{\text{fim}} \geq 0$, tem-se as seguintes restrições da Equação 6.

$$\begin{aligned} M_i^{\text{fim}} &= \sum \phi_s^{\text{mat}} \cdot R_{i,s}^{\text{mat}} \cdot M_{\text{inicial}} - \Delta_{i,s}, \quad M_{\text{fim}} = \sum M_i^{\text{fim}}, \\ M_i^{\text{fim}} &\geq M_{\text{fim}} - \left(1 - R_{i,s}^{\text{mat}}\right) \cdot M_{\text{inicial}}, \quad M_i^{\text{fim}} \leq M_{\text{fim}}, \quad M_i^{\text{fim}} \leq R_i^{\text{fim}} \cdot M_{\text{inicio}} \end{aligned} \tag{6}$$

Enfim, concluiu-se com a restrição da Equação 7 para que os percentuais passantes estejam dentro da faixa granulométrica, incluindo também uma tolerância T_i de controle para cada diâmetro i da faixa.

$$\text{LI}_i + T_i \leq P_i^{\text{fim}} \leq \text{LS}_i - T_i \tag{7}$$

Para garantir a textura da mistura final em $0 \leq p^{\text{arg}}, p^{\text{silt}}, p^{\text{areia}} \leq 1$, foram adicionadas as restrições da Equação 8 que indicam o percentual delas na expressão final com as massas M_{arg} de argila e M_{silt} silte.

$$\begin{aligned} M_{\text{arg}} &= \sum \phi_s^{\text{mat}} \cdot M_{\text{inicio}} \cdot p_s^{\text{arg}} - \Delta_{8,s} \cdot \frac{p_s^{\text{arg}}}{R_{8,s}}, \quad M_{\text{arg}} \geq M_{\text{fim}} - M_{\text{inicio}} \cdot \left(1 - p_{\text{fim}}^{\text{arg}}\right), \\ & \qquad M_{\text{arg}} \leq M_{fim}, \quad M_{\text{arg}} \leq M_{\text{inicio}} \cdot p_{\text{fim}}^{\text{arg}} \\ M_{\text{silt}} &= \sum \phi_s^{\text{mat}} \cdot M_{\text{inicio}} \cdot p_s^{\text{silt}} - \Delta_{8,s} \cdot \frac{p_s^{\text{silt}}}{R_{8,s}}, \quad M_{\text{silt}} \geq M_{\text{fim}} - M_{\text{inicio}} \cdot \left(1 - p_{\text{fim}}^{\text{silt}}\right), \\ & \qquad M_{\text{silt}} \leq M_{fim}, \quad M_{\text{silt}} \leq M_{\text{inicio}} \cdot p_{\text{fim}}^{\text{arg}} \end{aligned} \tag{8}$$

Como os materiais são não plásticos, a única restrição adicional da mistura final é a razão entre passantes na peneira #200 contra a peneira #40 indicada na Equação 9. As demais restrições podem ser encontradas em Junior *et al.* (2023), e o resultado do modelo será comparado com a função objetivo da Equação 10 de custo da dosagem conforme os custos unitários dos materiais $C_s^{\text{mat}} \geq 0$.

$$P_7^{\text{fim}} \leq 2/3 \cdot P_6^{\text{fim}} \tag{9}$$

$$\min \phi_s^{\text{mat}} \cdot C_s^{\text{mat}} \tag{10}$$

3. RESULTADOS

Implementado em GNU MathProg e solucionado com *o solver glpk* (Makhorin, 2016), o modelo da Seção 2.2 foi implementado para os dados da Tabela 1 para ponderar a minimização dos desvios e o material descartado, com massa inicial de 12 kg e descarte máximo de 2 kg. Para garantir as texturas foram adicionadas as restrições $p_{\text{fim}}^{\text{silt}} \geq 2 \cdot p_{\text{fim}}^{\text{arg}}$ e $p_{\text{fim}}^{\text{silt}} \geq 0{,}5 \cdot p_{s}^{\text{areia}}$ para a textura da mistura siltosa, e vice-versa para a mistura argilosa. Na mistura arenosa, foi considerado a restrição $p_{\text{fim}}^{\text{areia}} \geq 2 \cdot (p_{\text{fim}}^{\text{silt}} + p_{\text{fim}}^{\text{arg}})$. As soluções foram testadas para a faixa granulométrica D com e sem os limites de tolerância, a fim de considerar o impacto máximo de variações.

As curvas de *trade-off* das misturas (Figura 1) revela a inflexão entre o descarte e o erro médio percentual da otimização. A mistura argilosa é inviável sem descartes, com ou sem intervalos de tolerância. Já a mistura siltosa é viável sem descartes apenas sem tolerâncias da variabilidade. A mistura arenosa dispensa descarte. No ponto de inflexão, as composições escolhidas foram: (i) mistura siltosa de 22,69% brita ¾″; 25,66% brita ½″ e 51,65% de solo de Várzea Alegre, com 20,36% de silte e descarte de 50 g de finos; (ii) mistura argilosa de 22,79% brita ¾″; 21,51% brita ½″ e 55,71% de solo de Várzea Alegre, com teor de 12,86% de argila e descarte de 1341 g de finos; (iii) mistura arenosa de 6,76% brita ¾″; 35,34% brita ½″; 23,7% de solo de Camocim e 34,2% de solo de Paraipaba, com teor de 48,21% de areia, sem descartes. A redução de descartes elevou a fração de pedregulhos e o erro médio. O custo das soluções otimizadas pelo descarte ficou entre R$ 70,00/m³ a R$ 90,00/m³, comparado aos R$ 50,00/m³ a R$ 70,00/m³ das soluções otimizadas por custo.

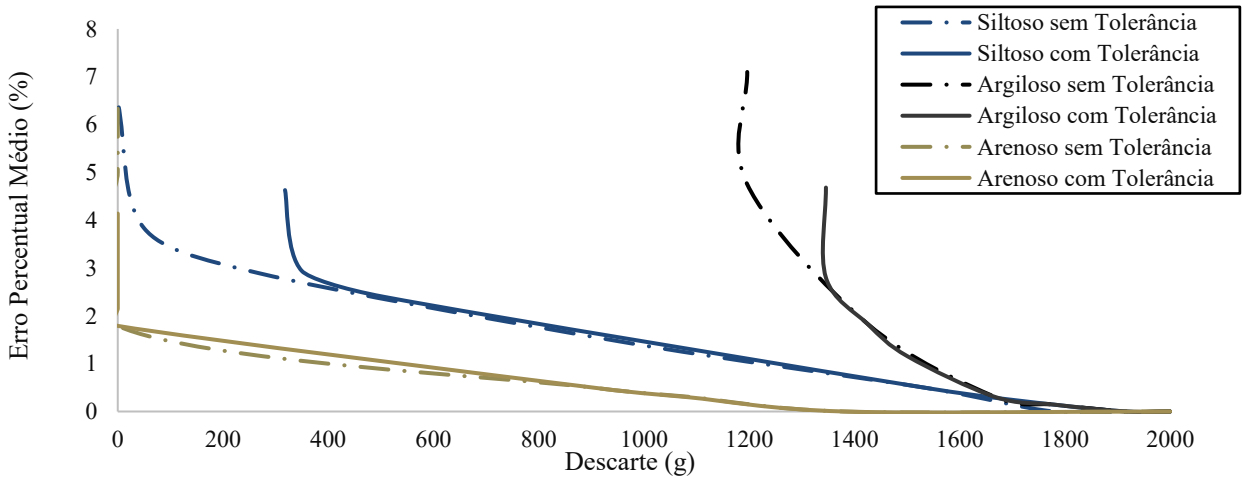


Figura 1: Curvas de *trade-off* entre soluções dosadas por descarte necessário e erro percentual médio

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a dosagem de misturas estabilizadas granulometricamente seja tradicionalmente feita por tentativa e erro, modelos de programação matemática permitem imediatamente dosar um número qualquer de solos e agregados com requisitos além da faixa granulométrica buscada. Em certas situações, a textura é importante na mistura final, como a avaliação de produtos para imprimação ou estabilizações químicas, mas difíceis de serem ajustado para solos naturais. Este trabalho desenvolveu um modelo de programação linear que garante tanto a textura final como o atendimento à faixa granulométrica visada com a possibilidade de descartes seletivos em certas frações retidas de peneiras. O *trade-off* pela quantidade de material descartado evidenciam a inviabilidade de avaliar certas misturas usando apenas solos naturais.

Agradecimentos
Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento e apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (1995) *NBR 6502:1995 : Rochas e solos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, RJ.
Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G. da; Ceratti, J. A. P.; e Soares, J. B. (2022) *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. (2º ed). Rio de Janeiro: ABEDA.

Berwanger, C. (1965) Discussion of "Mathematical Method for Blending Aggregates". *Journal of the Construction Division*, v. 91, n. 1, p. 192–194. DOI:10.1061/JCCEAZ.0000127

Carvalho, J.; Castelo-Branco, F.; e Quinta-Ferreira, M. (2014) Influência granulométrica na compactação de camadas granulares de pavimentos rodoviários. *Comunicações Geológicas*, v. 101, n. III, p. 1101-1105. Disponível em: https://hdl.handle.net/10316/35242 (acesso em 20/05/2025)

DNIT. (2006) Manual de Pavimentação (nº 719). Rio de Janeiro:Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT. (2009) DNIT ES 114/2009: Pavimentação rodoviária - Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes .

DNIT. (2010a) Norma DNIT 138/2010 - Pavimentação – Reforço do subleito - Especificação de serviço. DNIT, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT. (2010b) Norma DNIT 139/2010 - ME: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

DNIT. (2022) Norma DNIT 141/2022 - ME: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Easa, S. M., e Can, E. K. (1985a) Optimization Model for Aggregate Blending. *Journal of Construction Engineering and Management*, *111*(3), 216–230. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:3(216)

Easa, S. M., e Can, E. K. (1985b) Stochastic Priority Model for Aggregate Blending. *Journal of Construction Engineering and Management*, *111*(4), 358–373. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:4(358)

Pedreira Junior, J. U.; Silva, M. F. da; Wintruff, N. C.; e Moraes, F. R. de. (2023) Estabgran: Uma Aplicação Web para Otimização de Misturas de Bases de Pavimentos Estabilizadas Granulometricamente. In: Anais do XXXVII Congresso e Pesquisa e Ensino em Transportes (Santos, SP). Rio de Janeiro:ANPET, v. 1, p. 1-12.

Kikuchi, S.; Kronprasert, N.; e Easa, S. M. (2012) Aggregate Blending Using Fuzzy Optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 138, n. 12, p. 1411–1420. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000557

Lee, D. (1973) Review of Aggregate Blending Techniques. *Highway Research Record*, *441*.

Lee, S. M. e Olson, D. L. (1983) Chance Constrained Aggregate Blending. *Journal of Construction Engineering and Management*, *109*(1), 39–47. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1983)109:1(39)

Mackintosh, C. S. (1959) *Blending of Aggregates for a Premix Carpet*. Pretoria: Transvaal Roads Department.

Makhorin, A. (2016) GLPK (GNU Linear Programming Kit). ANSI C, GNU Project, Moscovo, Russia. Disponível em: http://ftp.gnu.org/gnu/glpk/ (acesso em 14/05/2025)

Montemanni, R.; Toklu, N. E.; Toklu, Ş. Ç.; e Toklu, Y. C; (2012) Aggregate Blending via Robust Linear Programming. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 138, n. 2, p. 188–196. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000422

Neumann, D. L. (1964) Mathematical Method for Blending Aggregates. *Journal of the Construction Division*, *90*(2), 1–13. DOI: 10.1061/JCCEAZ.0000109

Neumann, D. L. (1966) Closure to "Mathematical Method for Blending Aggregates". *Journal of the Construction Division*, *92*(1), p. 77–77. DOI: 10.1061/JCCEAZ.0000147

Pimenta, F. T.; Greco, M.; Pitangueira, R. L.; e Santanna-Greco, J. A. (2015) Desenvolvimento de software educacional de engenharia para dosagem de mistura de materiais. *Revista Vértices*, v. 17, n. 1, p. 91–110. DOI:10.5935/1809-2667.20150006

Popovics, S. (1973) Methods for the determination of required blending proportions for aggregates. *Highway Research Record*, *441*, 65–75. Disponível em: https://trid.trb.org/view/53989 (acesso em 07/06/2025)

Ritter, J. B., e Shaffer, L. R. (1961) Blending Natural Earth Deposits for Least Cost. *Journal of the Construction Division*, *87*(1), 39–61. DOI:10.1061/JCCEAZ.0000036

Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará. (2023) Tabela de Custos. Disponível em: https://www.seinfra.ce.gov.br/tabela-de-custos/ (acesso em 15/05/2025)

Silveira, E. B. S. e Silveira, A. (1964) *Notas sôbre a dosagem dos componentes na estabilização granulométrica*. Apostila, São Carlos, SP. Disponível em: http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/7708 (acesso em 29/05/2025)

Tabucanon, M. T.; Adulbhan, P.; e Chen, S. S. Y. (1980) A probabilistic programming model for blending aggregates. *Applied Mathematical Modelling*, v. 4, p. 257–260. DOI: 10.1016/0307-904X(80)90192-4

Toklu, Y. C. (2005) Aggregate Blending Using Genetic Algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *20*(6), 450–460. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2005.00394.x

Villibor, D. F. (1978) *Estabilização granulométrica ou mecânica*. São Carlos: Universidade de São Paulo. Disponível em: http://repositorio.eesc.usp.br/server/api/core/bitstreams/62f2e3c7-1914-41e1-ba3f-9283c525358a/content (acesso em 29/05/2025)

Mateus Marcial Magalhães Cavalcante (mateus.cavalcante@det.ufc.br)
Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
Antonio Nobre Rabêlo (antonio.rabelo@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Rua Prof. Armando Farias, Bloco 703, Fortaleza-CE

POTENCIAL DO REJEITO DE BAUXITA COMO PRECURSOR GEOPOLIMÉRICO NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS ASSOCIADO À CAL HIDRATADA

Manoel Leandro Araújo e Farias, John Kennedy Guedes Rodrigues, Ana Letícia Feitosa de Macêdo, Arthur dos Santos Souza, Felipe Borges de Oliveira, Jonny Dantas Patricio, Paulo Germano Tavares Marinho Filho, Ana Maria Gonçalves Duarte, Adla Jamilly Vieira Felipe, Allan Kewen Câmara de Oliveira
Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO
Este estudo avaliou a eficácia do rejeito de bauxita como precursor geopolimérico na estabilização de um solo laterítico fino, em combinação com cal hidratada. Foram realizados ensaios de dosagem, compactação, resistência à compressão simples (RCS) e tração por compressão diametral (RTCD). A adição de cal aumentou significativamente a RCS e a RTCD, enquanto o uso do rejeito de bauxita elevou a RTCD, evidenciando potencial desempenho à fadiga. As análises mineralógica e química confirmaram o potencial reativo do rejeito. Os resultados indicam que a combinação de cal e rejeito de bauxita é promissora para estabilização de solos, com ganhos mecânicos relevantes e contribuição para o aproveitamento sustentável de resíduos da mineração.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente busca por alternativas sustentáveis de estabilização tem impulsionado o uso de resíduos industriais. Segundo Parveen *et al.* (2018), iniciativas de mineração sustentável (*green mining*) incentivam o reaproveitamento de rejeitos, como forma de reduzir impactos ambientais. Nesse contexto, a substituição de cal e cimento por geopolímeros derivados de rejeitos minerais é compatível com os princípios da gestão ambiental.

Estudos recentes (Bruschi *et al.*, 2021; Ferrazzo *et al.*, 2023) investigam o uso de resíduos como metacaulim, cinza volante, bagaço de cana e cal de carbureto na formulação de ligantes geopoliméricos, com resultados promissores para o desempenho mecânico dos solos estabilizados. Contudo, há lacuna na literatura sobre o uso do rejeito de bauxita como precursor, apesar de sua composição rica em SiO_2 e Al_2O_3 (Liao *et al.*, 2023; Bruschi *et al.*, 2021), o que o torna potencialmente adequado para aplicações geopoliméricas.

Torna-se altamente relevante investigar o desempenho do rejeito de bauxita como precursor geopolimérico para a estabilização de solos, transformando esse resíduo da mineração em um recurso valioso para o melhoramento de solos, especialmente nas camadas de pavimentos. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da geopolimerização no melhoramento de solos lateríticos, com foco na resistência à compressão e resistência à tração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Solo laterítico

O solo estudado é um laterítico de granulometria fina, originário de Pernambuco, cujas características geotécnicas e classificações estão na Tabela 1. A fração argilosa é dominada por caulinita, associada a altos teores de óxidos de ferro e alumínio, evidenciados por DRX e FRX (Figura 1). Estudos anteriores confirmam a predominância da caulinita em solos lateríticos (Biswal *et al.*, 2018).

Tabela 1: Propriedades do solo laterítico estudado

Parâmetros	Norma	SLF
Densidade real dos grãos (g/cm³)	ABNT NBR 6458	2,71
Limite de Liquidez (%)	ABNT NBR 6459	42
Limite de Plasticidade (%)	ABNT NBR 7180	26
Índice de Plasticidade (%)		16
% pedregulho (> 2,0 mm)	ABNT NBR 7181	2,2
% areia grossa (0,6 mm – 2,0 mm)		16,4
% areia média (0,2 mm – 0,6 mm)		13,1
% areia fina (0,06 mm – 0,2 mm)		10,9
% silte (2 μm – 0,06 mm) e % argila (< 2 μm)		57,4
Classificação TRB		A-7-6
Classificação MCT; G-MCT	DNIT-CLA 444; 259	LG’

Óxido	%
SiO_2	39,89
Al_2O_3	35,39
Fe_2O_3	6,77
TiO_2	1,00
K_2O	1,32
MgO	1,18
ZrO_2	0,09
CaO	0,00
SO_3	0,18
BaO	0,00
MnO	0,03
Outros	0,01
Perda ao Fogo	14,14

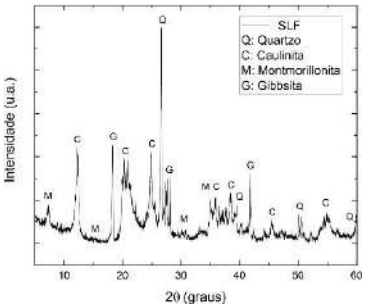


Figura 1: FRX e DRX do SLF

2.2. Estabilizantes

A estabilização do solo utilizou Cal Hidratada Tipo I (CH-I), reconhecida por sua alta pureza (<10% de óxidos hidratados) (Farias, 2023). Como alternativa sustentável, avaliou-se o uso do rejeito de bauxita, resíduo da mineração, como precursor geopolimérico associado à cal hidratada.

As análises por DRX e FRX, apresentadas conjuntamente na Figura 2, revelaram no rejeito de bauxita a predominância de quartzo, hematita, gibbsita e boemita, indicando altos teores de óxidos de ferro e alumínio residual e evidenciando potencial pozolânico. A composição química destacou elevados teores de óxidos de sódio, ferro e alumínio, além de sílica associada ao quartzo, com impurezas comuns de titânio e zircônio. A perda ao fogo confirma minerais hidratados, como gibbsita e boemita, responsáveis pela liberação de voláteis durante o aquecimento.

Óxido	%
Na_2O	28,52
Fe_2O_3	23,87
Al_2O_3	22,88
SiO_2	10,84
TiO_2	1,83
ZrO_2	0,41
Outros	0,53
Perda ao Fogo	11,12

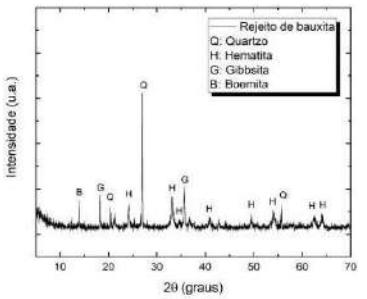


Figura 2: FRX e DRX do RB

2.3. Dosagem do teor de estabilizante

A quantidade mínima de cal foi definida conforme a norma DNIT-ME 419/2019, baseada no método de Eades & Grim, que estabelece pH ≥ 12,4 para ativação pozolânica. A dosagem de rejeito de bauxita (RB) adotada foi de 10% em massa do solo seco, fundamentada em estudos prévios (Silva *et al.*, 2018; Racanelli *et al.*, 2020, 2022; Jatoliya *et al.*, 2023; Souza, 2024).

2.4. Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação seguiram o procedimento do Proctor Intermediário, conforme especificado pela norma DNIT-ME 164/2013. As amostras foram previamente secadas ao ar, peneiradas na abertura de 19 mm e compactadas em cinco camadas, aplicando-se 26 golpes por camada. No caso das misturas estabilizadas, o solo foi inicialmente misturado a seco com o aditivo, e, em seguida, a água foi incorporada até obtenção de uma massa homogênea adequada à compactação.

2.5. Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada sob critérios rigorosos de controle, permitindo-se apenas variações de até ±0,5% na umidade de compactação e entre 98% e 102% do grau de compactação ideal. Após a moldagem, as amostras estabilizadas foram submetidas a cura por um período de 7 dias, em câmara úmida

com temperatura controlada de 23 ± 2 °C e umidade relativa superior a 95%.

2.6. Ensaio de resistência à compressão simples (RCS) e à tração por compressão diametral (RTCD)
Corpos de prova cilíndricos (100 × 200 mm) foram moldados com energia equivalente ao Proctor Intermediário. A resistência à compressão simples (RCS) foi avaliada segundo ABNT NBR 12025/2012, e a resistência à tração por compressão diametral (RTCD) conforme adaptações do método DNIT-ME 181/1994. Todos os ensaios foram realizados com taxa constante de deformação de 1 mm/min. A configuração dos ensaios está ilustrada na Figura 3.



Figura 3: Ensaio de RCS e de RTCD

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Dosagem do teor de estabilizante

Conforme a Tabela 2, a adição de 2% de cal ao solo laterítico fino elevou o pH da mistura acima do valor referência de 12,4, conforme norma vigente, estabelecendo esse teor, em massa seca, como adequado para estabilização.

Tabela 2: Determinação do teor de cal

Mistura	Teor de cal (%)	pH
25 g de solo + 2% de cal + 100 ml de água	2%	12,41
25 g de solo + 3% de cal + 100 ml de água	3%	12,51
25 g de solo + 4% de cal + 100 ml de água	4%	12,52
25 g de solo + 5% de cal + 100 ml de água	5%	12,53
25 g de solo + 6% de cal + 100 ml de água	6%	12,53
25 g de solo + 7% de cal + 100 ml de água	7%	12,54
25 g de solo + 8% de cal + 100 ml de água	8%	12,54
25 g de solo + 9% de cal + 100 ml de água	9%	12,54
25 g de solo + 10% de cal + 100 ml de água	10%	12,54

3.2. Ensaio de compactação

Foram realizados ensaios de compactação Proctor Intermediário para determinar a umidade ótima e o peso unitário seco máximo das misturas. Os resultados estão apresentados na Figura 4.

Solo	$\rho d_{máxima}$ (g/cm³)	1,717
	$W_{ótima}$ (%)	20,12
Solo-Cal	$\rho_{dmáxima}$ (g/cm³)	1,662
	$W_{ótima}$ (%)	22,01
Solo-Cal-RB	$\rho_{dmáxima}$ (g/cm³)	1,620
	$W_{ótima}$ (%)	21,51

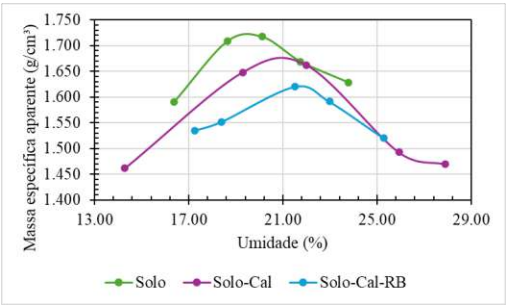


Figura 4: Resultados dos ensaios de compactação

A adição de cal e rejeito de bauxita reduziu a densidade seca máxima e aumentou a umidade ótima das misturas. Segundo Jatoliya *et al.* (2023), a hidratação exotérmica da cal demanda mais água e pode causar evaporação parcial. O rejeito, por sua vez, devido ao alto teor alcalino e de óxidos de ferro, exige maior energia de

compactação. Souza (2024) e Mishra *et al.* (2019) também observaram redução da densidade seca e aumento da umidade ótima em misturas com rejeito e cal.

3.3. RCS e RTCD

Os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e tração por compressão diametral (RTCD) encontram-se apresentados na Figura 5 e na Tabela 3.

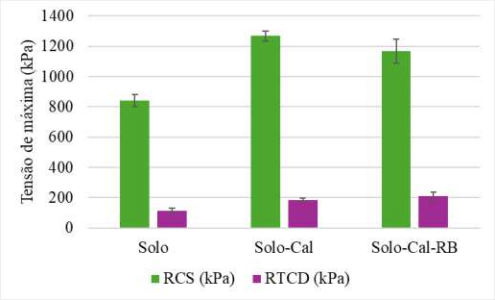


Figura 5: Resultados de RCS e RTCD

Tabela 3: Resultados dos ensaios mecânicos e influência dos estabilizantes

CP	RCS (kPa)					RTCD (kPa)				
	1	2	3	Média	Desvio Padrão	1	2	3	Média	Desvio Padrão
Solo	839,00	802,00	884,00	841,67	41,06	109,00	105,00	132,00	115,33	14,57
Solo-Cal	1232,00	1298,00	1274,00	1268,00	33,41	184,00	196,00	174,00	184,67	11,02
Solo-Cal-RB	1154,00	1253,00	1099,00	1168,67	78,04	187,00	209,00	236,00	210,67	24,54

A adição de cal aumentou a resistência à compressão simples (RCS) e à tração diametral (RTCD), confirmando sua eficácia. A presença de rejeito de bauxita (RB) reduziu levemente a RCS, mas elevou a RTCD, sugerindo maior resistência à fadiga. Apesar da variabilidade, o desempenho é promissor, desde que o controle de compactação seja rigoroso.

Segundo Souza (2024), a influência do RB depende do teor e das condições de cura, enquanto Jatoliya *et al.* (2023) destacam que ganhos na RCS se intensificam com maior tempo de cura. Pela correlação de Saputra & Putra (2020) (CBR = 0,2416·RCS + 1,2389), os valores estimados de CBR foram: solo natural 40,6%, solo-cal 58,6% e solo-cal-RB 54,4%. Conforme a EMURB (ES-EE/00/5T-020), as misturas estabilizadas aproximam-se do mínimo exigido para bases (≥60%), enquanto o solo natural atende apenas a sub-bases (≥30%).

4. CONCLUSÕES

Os resultados indicam o potencial do rejeito de bauxita como precursor geopolimérico para estabilização de solos lateríticos, especialmente quando combinado com cal hidratada. A cal elevou significativamente a resistência à compressão simples e à tração diametral, enquanto o rejeito causou leve redução na compressão, mas aumento na tração, favorecendo aplicações sob carregamentos cíclicos. A presença dos estabilizantes alterou a compactação, reduzindo a densidade seca máxima e aumentando a umidade ótima. A composição química do rejeito, rica em sílica, alumina e óxidos de ferro, explica seu bom desempenho. Assim, o uso de rejeito de bauxita é uma alternativa técnica e ambientalmente sustentável para melhoramento de solos em obras geotécnicas e pavimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) ABNT NBR 12025: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT.

Biswal, D. R.; U. C. Sahoo e S. R. Dash (2018) Mechanical characteristics of cement stabilised granular lateritic soils for use as structural layer of pavement. Road Materials and Pavement Design, v. 21, n. 5, p. 1201–1223. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2018.1545687.

Bruschi, G. J. *et al.* (2021) Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 33, n. 11. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003949.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) DNER-ME 181: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. DNIT.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2013) DNIT-ME 164: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. DNIT.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019) DNIT-ME 419: Pavimentação – Solo-Cal – Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo – Método de ensaio. DNIT.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) DNIT-CLA 259: Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Brasília: DNIT.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) DNIT-CLA 444: Classificação de solos tropicais de granulação grossa – Classificação. Brasília: DNIT.

EMPRESA MUNICIPAL DE URBANIZAÇÃO (EMURB) (s.d.) ES-EE/00/5T-020: Especificação de Serviços e Materiais para Execução de Sub-base e Base de Solo-Cal. São Paulo.

Farias, M. L. A. (2023) Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Ferrazzo, S. T. *et al.* (2023) Mechanical and environmental behavior of waste foundry sand stabilized with alkali-activated sugar cane bagasse ash-eggshell lime binder. Construction and Building Materials, v. 383. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131313.

Jatoliya, A.; S. Saha; B. Pratap; S. Mondal e B. H. Rao (2023) Assessment of bauxite residue stabilized with lime and graphene oxide as a geomaterial for road applications. Soils and Rocks, v. 46, n. 1. DOI: 10.28927/SR.2023.003722.

Liao, J. *et al.* (2023) Effects of bauxite tailings and sodium silicate on mechanical properties and hydration mechanism of magnesium phosphate cement. Construction and Building Materials, v. 366, p. 130055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130055.

Mishra, M. C.; K. S. Babu; N. G. Reddy; P. P. Dey e B. H. Rao (2019) Performance of lime stabilization on extremely alkaline red mud waste under acidic environment. Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste, v. 23, n. 4, p. 04019012.

Parveen *et al.* (2018) Mechanical and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete incorporating alccofine at ambient curing. Construction and Building Materials, v. 180, p. 298–307. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.286.

Racanelli, L. A. (2022) Obtenção de geopolímero a partir de rejeito da lavagem de bauxita amazônica. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia). Universidade Federal do Pará, Belém.

Racanelli, L. A.; R. C. Oliveira; W. S. Brito e J. A. S. Souza (2020) Uso de rejeito de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1. DOI: 10.1590/S1517-707620200001.0921.

Saputra, N. A. e R. Putra (2020) IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., v. 469, 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/469/1/012093.

Silva, C. M. S. (2018) Desenvolvimento de tecnologia não convencional para a construção civil: tijolo de solo-cimento com resíduo da bauxita industrial. Anais do III Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação (CONAPESC). Campina Grande: Realize Editora. Disponível em: https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/43048 (acesso em 14 jul. 2025).

Souza, V. C. (2024) Estudo da viabilidade técnica do uso de rejeito de minério de bauxita como material para construção de pavimento. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

Manoel Leandro Araújo e Farias (mlaf.engcivil@gmail.com)
John Kennedy Guedes Rodrigues (profkennedy@hotmail.com)
Ana Letícia Feitosa de Macêdo (leticiamacedo.engcivil@gmail.com)
Arthur dos Santos Souza (arthurdossantossouza5@gmail.com)
Felipe Borges de Oliveira (felipe.borges@estudante.ufcg.edu.br)
Jonny Dantas Patricio (jonny_dantas@gmail.com)
Paulo Germano Tavares Marinho Filho (marinho.paulo05@gmail.com)
Ana Maria Gonçalves Duarte (ana.duartemendonca@gmail.com)
Adla Jamilly Vieira Felipe (adlajamilly18@outlook.com)
Allan Kewen Câmara de Oliveira (allankewen7@gmail.com)
UFCG, CTRN, Engenharia Civil, R. Aprigio Veloso, 882, Universitário, Campina Grande, Brasil.

Materiais Geotécnicos na Infraestrutura de Transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ESTABILIZAÇÃO EMERGENCIAL DE TALUDE EM RODOVIAS: CASO NA BR-459/SP

Nádya Frauzino Salgado[1], Jefferson Santos Soares[1], Alexandre Gil Batista Medeiros[2], Francesca Emmanuelle Leite Viana Abreu[2], José Bruno Primo do Nascimento[2], Mateus Santos Lima[2]
[1]Instituto Militar de Engenharia - IME, [2]Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT

RESUMO
Esta comunicação técnica apresenta o estudo de caso de uma intervenção emergencial no km 6+100 da BR-459/SP, em Piquete/SP, motivada por escorregamento de talude que provocou a interdição total da via em janeiro de 2023. A metodologia envolveu inspeções de campo, análise geotécnica, avaliação hidrológica e simulações de estabilidade no software SLOPE/W. Foram testadas diferentes configurações de solo grampeado, com variações no comprimento dos grampos e condições de saturação. A solução adotada combinou grampos de 6 m, 9 m e 12 m, malha metálica de alta resistência e hidrossemeadura, além de reconfiguração da drenagem superficial. A intervenção permitiu restabelecer a estabilidade da encosta e o tráfego com segurança, conforme verificado após novas chuvas.

1. INTRODUÇÃO

A instabilidade de taludes é um dos principais desafios na engenharia geotécnica aplicada à infraestrutura rodoviária, sobretudo em regiões sujeitas a regimes pluviométricos intensos, solos residuais intemperizados e intervenções antrópicas não controladas. Escorregamentos e rupturas são comuns em encostas com geometria desfavorável, drenagem ineficiente e alta saturação, afetando a segurança viária e causando prejuízos sociais e econômicos (Cruden & Varnes, 1996; Lacerda, 2007).

A análise de estabilidade requer investigações geotécnicas, modelagens numéricas e avaliação hidrológica. A NBR 11682:2009 exige fatores mínimos de segurança, e normas do DNIT, como a DNIT 097/2004 – PRO e os manuais IPR-715 e IPR-724, orientam o dimensionamento de contenções e drenagem.

Em situações críticas, adotam-se medidas emergenciais como supressão de material instável, valetas provisórias e contenções de rápida execução (Koerner, 2012; Duncan & Wright, 2005; Pinheiro et al., 2010). O solo grampeado, associado a malhas metálicas, hidrossemeadura e drenagem, tem se mostrado eficaz em encostas íngremes e de difícil acesso (Schlosser & Unterreiner, 2001; FHWA-NHI-16-007, 2016).

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A BR459-SP representa uma conexão essencial entre o sul de Minas Gerais e o Vale do Paraíba. Em janeiro de 2023, foi registrado um escorregamento de talude no km 6+100, no município de Piquete/SP, provocando a interdição total da via em ambos os sentidos. O evento foi desencadeado por chuvas intensas entre 19 e 22 de janeiro, com precipitação acumulada superior a 130 mm, segundo dados do CEMADEN.

O talude apresentava declividade acentuada, cobertura de solo residual argiloso sobre rocha gnáissica, presença de vegetação arbórea e drenagem superficial ineficiente. A ruptura, de caráter rotacional, resultou na mobilização de massa coluvionar, queda de árvores e blocos rochosos, além do soterramento parcial da pista. Trincas longitudinais identificadas na crista indicavam risco de retrogressão da ruptura.

A instabilidade foi agravada por fatores locais como baixa coesão do solo, saturação hídrica, erosão concentrada e ausência de drenagem profunda. A gravidade do quadro exigiu resposta emergencial imediata, com contenção da encosta e reestabelecimento das condições de segurança e trafegabilidade da rodovia.

3. METODOLOGIA

A caracterização geotécnica da área baseou-se em inspeções de campo e na análise do histórico geológico local, complementados por dados de investigações anteriores em trechos vizinhos da BR-459/SP. Em razão do caráter emergencial da intervenção, não foram realizadas novas sondagens diretas, sendo adotados parâmetros geotécnicos representativos da região, com base em estudos prévios e no julgamento técnico da equipe projetista. Esses parâmetros subsidiaram o dimensionamento das soluções e foram devidamente documentados e validados.

A análise hidrológica considerou dados pluviométricos fornecidos pelo CEMADEN, com destaque para a estação de Delfim Moreira/MG, representativa da bacia hidrográfica local. Observou-se um elevado índice de

precipitação acumulada nos dias que antecederam a ruptura. As falhas do sistema de drenagem superficial foram identificadas em campo, e a proposta de readequação foi desenvolvida com o uso do *AutoCAD Civil 3D*, para modelagem do terreno e detalhamento das valetas em degraus, e do Excel, para dimensionamento hidráulico simplificado e estimativas quantitativas.

A estabilidade do talude foi analisada por meio de simulações no software *GeoStudio/SLOPE/W*, utilizando modelos de equilíbrio limite com superfícies de ruptura circulares. Os parâmetros de resistência foram definidos com base em perfis geotécnicos regionais. Foram testadas diferentes configurações de comprimento e espaçamento de grampos, buscando-se atender ao fator de segurança mínimo exigido pela NBR 11682:2009 para condição permanente.

Durante a execução da obra, foram realizados levantamentos topográficos com estação total e drone *(VANT*), visando à obtenção de ortofotos e modelo digital de terreno. Os dados foram processados nos *softwares Pix4D* e *Topograph 98*, permitindo o mapeamento detalhado da área afetada e a atualização dos quantitativos de projeto.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os dados da investigação geológica indicaram que o talude em questão está inserido no Domínio Mantiqueira, sobre a Faixa de Dobramentos Ribeira, com predominância de gnaisses bandados e augenóides. A intensa alteração intempérica dessas rochas originou um solo residual argiloso, pouco coesivo, com presença de blocos intemperizados. A foliação subvertical do gnaisse e a anisotropia estrutural do maciço contribuíram para a instabilidade da encosta, especialmente sob condições de saturação induzida por chuvas intensas.

As informações hidrometeorológicas, obtidas junto ao CEMADEN, apontaram um volume acumulado de 135 mm em 14 dias na estação de Delfim Moreira/MG, localizada próxima à área do escorregamento. Esse índice pluviométrico ultrapassou o limite de atenção para deslizamentos em taludes naturais e cortes em solo residual, provocando a saturação do solo, redução da coesão e da resistência ao cisalhamento, e consequente ruptura rotacional da massa coluvionar.

A retroanálise da condição de estabilidade anterior ao evento, realizada no *GeoStudio/SLOPE/W*, indicou fator de segurança igual a 1,0, valor inferior ao mínimo exigido pela NBR 11682:2009, configurando situação crítica de instabilidade.

Com base nas características técnicas, econômicas e em soluções previamente executadas na BR-459/SP, foram propostas quatro alternativas de estabilização com solo grampeado:

- Soluções baseadas na retroanálise do evento:
  - **Solução 1** – Solo Grampeado Verde sem banqueta: Grampos de 12,0 m de comprimento, inclinados em 25º, espaçamento de 1,25 m x 1,25 m. O talude inferior suavizado em 33º e o superior em 45º.
  - **Solução 2** - Solo Grampeado Verde com banqueta: Grampos de 12,0 m de comprimento, inclinados em 25º. Banqueta de 2,0 a 3,0 m de largura na altura média de 15,0 m do talude crítico. Espaçamento de 1,25 m x 1,25 m. Suavização dos taludes igual à alternativa anterior.
- Soluções considerando projetos anteriores na rodovia:
  - **Solução 3** - Solo Grampeado Verde sem banqueta: Grampos de 9,0 m de comprimento, inclinados em 15º, espaçamento de 2,0 m x 2,0 m.
  - **Solução 4** - Solo Grampeado Verde com banqueta: Grampos de 6,0 m de comprimento, inclinados em 15º. Banqueta de 2,0 a 3,0 m de largura na altura média de 15,0 m. Espaçamento de 2,0 m x 2,0 m.

As simulações de estabilidade das Soluções 1 a 4 indicaram fatores de segurança entre 1,4 e 1,5, classificados como risco médio à vida humana, conforme critérios da NBR 11682:2009 (Figura 1).

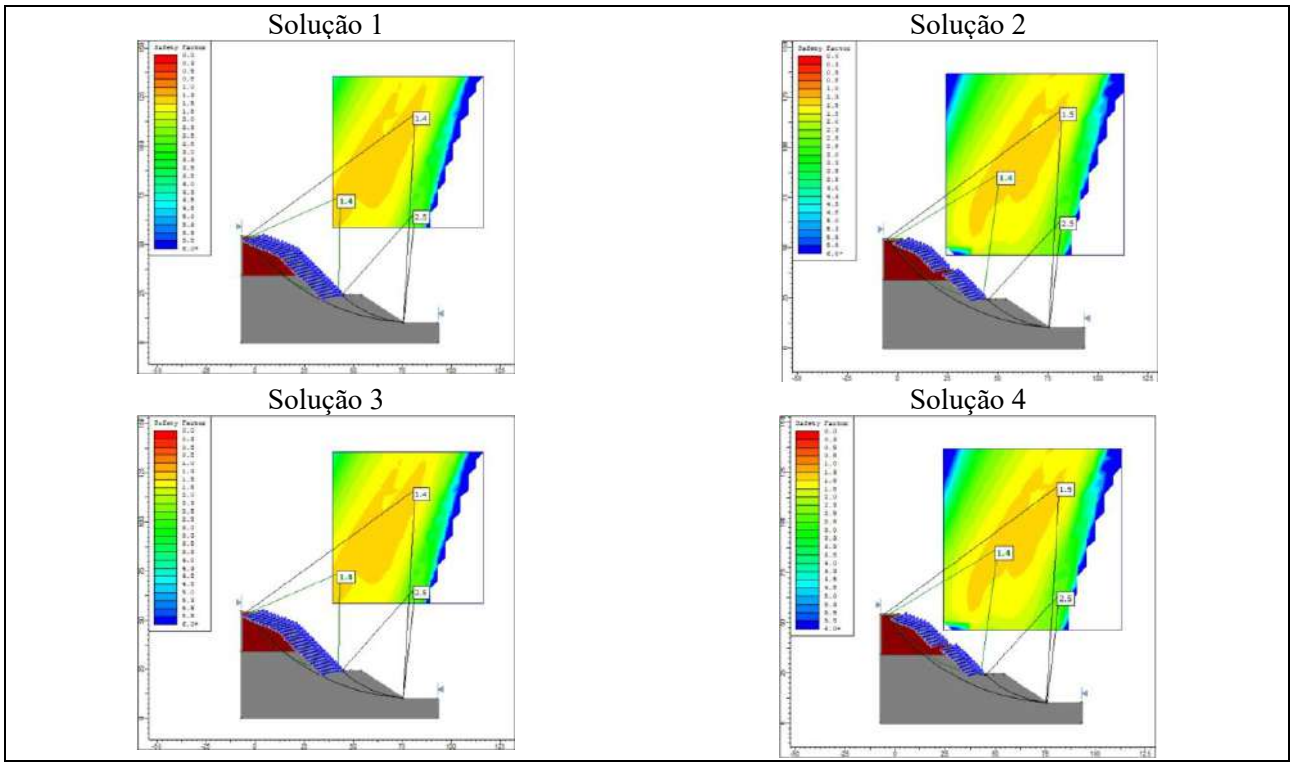


Figura 1: Simulação de estabilidade das Soluções 1, 2, 3 e 4

Considerando a geometria específica do talude e os resultados obtidos nas análises anteriores, foi avaliada uma solução mista, que combina elementos das alternativas previamente estudadas. A proposta consiste na execução de solo grampeado com faceamento verde, utilizando grampos de comprimentos variáveis ao longo do talude, sendo considerado: i) grampos de 6,0 m na base; ii) grampos de 9,0 m na região intermediária; e iii) grampos de 12,0 m topo do talude.

As análises de estabilidade desta nova configuração indicaram um fator de segurança de 1,45, superior às demais alternativas (Figura 2). De forma que essa solução se mostrou mais precisa e adaptada à geometria específica do talude, aproveitando a capacidade de diferentes comprimentos de grampo para garantir a estabilidade global e maior segurança aos usuários da rodovia.

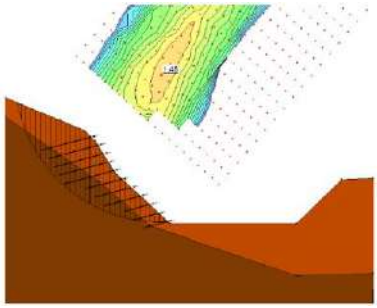


Figura 2: Análise da seção quanto a estabilidade global da solução com solo grampeado.

Adicionalmente, foram projetadas obras complementares de drenagem, incluindo uma vala trapezoidal revestida em concreto simples e uma descida d'água em degraus de concreto armado, com a finalidade de conduzir, de forma segura, a água proveniente do talvegue a montante até o bueiro existente. Também foi prevista a instalação de uma caixa coletora destinada à dissipação de energia e ao controle do fluxo. Essas intervenções contribuíram para a redução da poropressão ao longo do talude, aspecto relevante, uma vez que valores reduzidos de poropressão indicam menor saturação do solo. Em condições menos encharcadas, o solo apresenta maior resistência ao deslizamento, comportando-se como um material mais coeso e estável. No contexto desta análise, o valor ru = 0,15 evidencia que a pressão neutra no interior do talude é relativamente baixa, o que indica que a solução implementada foi eficaz em mitigar o efeito desestabilizador da água,

aumentando, assim, a segurança global do talude.

5. CONCLUSÕES

O escorregamento ocorrido no km 6+100 da BR-459/SP configurou uma situação emergencial de elevada complexidade, decorrente da combinação de chuvas intensas e de condições geológico-geotécnicas desfavoráveis, caracterizadas pela presença de solo residual argiloso e drenagem deficiente. A ruptura rotacional resultante ocasionou a interdição total da via, exigindo resposta técnica imediata e eficaz. A solução implementada consistiu na execução de solo grampeado com comprimentos variáveis, associado a faceamento verde e a obras de drenagem superficial. Essa abordagem mostrou-se tecnicamente eficiente e economicamente viável, garantindo fator de segurança adequado e adaptando a distribuição dos grampos às diferentes condições de estabilidade ao longo do talude.

A redefinição dos comprimentos dos grampos — 12 m nas linhas superiores, 9 m nas intermediárias e 6 m nas inferiores — possibilitou otimizar o projeto, reduzindo a quantidade total de grampos monobarra em relação ao previsto inicialmente em contrato. Essa redução ocorreu mesmo com o aumento da área total grampeada, que passou de 603 m² para 1.050 m². O decréscimo no número de grampos empregados contribuiu significativamente para a viabilidade econômica da solução, otimizando o uso de materiais e recursos disponíveis. Esse caso evidencia a relevância de abordagens integradas em obras emergenciais, combinando soluções de contenção e drenagem, e estabelece um importante referencial técnico para futuras intervenções em trechos rodoviários sujeitos a condições geológico-geotécnicas similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2009) *NBR 11682: Estabilidade de taludes*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Cruden, D. M. e D. J. Varnes (1996) Tipos e processos de deslizamentos. In Turner, A. K. e R. L. Schuster (eds.) *Investigação e mitigação de deslizamentos*. Washington, D.C.: Transportation Research Board (Special Report 247), p. 36–75.

DNIT (2004) *Norma DNIT 097/2004 – PRO: Diretrizes para a elaboração de projetos de contenção em solos*. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Duncan, J. M. e S. G. Wright (2005) *Soil strength and slope stability*. Hoboken: John Wiley & Sons.

FHWA (2016) *Soil Nail Walls – Reference Manual*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation (FHWA-NHI-16-007).

Koerner, R. M. (2012) *Designing with geosynthetics* (6ª ed.). Bloomington: Xlibris Corporation.

Lacerda, W. A. (2007) Investigação de encostas com risco de escorregamento. *Solos e Rochas*, v. 30, n. 2, p. 67–80.

Pinheiro, H. A. R.; L. R. Gomes e L. V. Zuquette (2010) Intervenções emergenciais em encostas instáveis: estudo de casos no litoral paulista. In Anais do XV Congresso Brasileiro de Geotecnia (Gramado, RS). São Paulo: ABMS, p. 1–10.

Schlosser, F. e P. Unterreiner (2001) Soil nailing – A useful technique. In *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Istanbul: Balkema, p. 1209–1212.

Nádya Frauzino Salgado (frauzino.nadya@ime.eb.br)
Instituto Militar de Engenharia - IME, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro, Brasil.
Jefferson Santos Soares (jefferson.soares@ime.eb.br)
Instituto Militar de Engenharia - IME, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro, Brasil.
Alexandre Gil Batista Medeiros (alexandre.medeiros@dnit.gov.br)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
Francesca Emmanuelle Leite Viana Abreu (francesca.abreu@dnit.gov.br)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
José Bruno Primo do Nascimento (josebrunoprimo@gmail.com)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
Mateus Santos Lima (mateuslima.eng@outlook.com)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF

ESTUDO GEOTÉCNICO E ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES: CASO NA BR-381/MG

Nádya Frauzino Salgado[1], Jefferson Santos Soares[1], Alexandre Gil Batista Medeiros[2], Francesca Emmanuelle Leite Viana Abreu[2], José Bruno Primo do Nascimento[2], Mateus Santos Lima[2]
[1]Instituto Militar de Engenharia - IME, [2]Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT

RESUMO
Esta comunicação técnica tem como objetivo avaliar e propor soluções definitivas para a instabilidade do talude localizado no km 314,41 da BR-381/MG, no município de Nova Era/MG, cenário de recorrentes escorregamentos e falhas em intervenções anteriores. A metodologia adotada incluiu investigações geotécnicas com sondagens SPT e rotativas, mapeamento geológico-geotécnico e análises de estabilidade pelo método de equilíbrio limite (Morgenstern-Price e Janbu), por meio do *software GeoStudio*, conforme os critérios da NBR 11682:2009. Após análise comparativa de alternativas, a solução mais eficaz consistiu no reforço do maciço com grampos de 20 metros de comprimento, resultando em fator de segurança satisfatório (FS = 1,58). A proposta demonstrou compatibilidade com as condições locais, caracterizadas por solos filíticos altamente erodíveis e presença de percolação superficial, proporcionando maior robustez estrutural e controle de processos erosivos.

1. INTRODUÇÃO

As rupturas de taludes constituem um dos principais desafios enfrentados pela engenharia geotécnica, especialmente em regiões sujeitas a regimes pluviométricos intensos, solos altamente intemperizados e interferências antrópicas mal planejadas. Esses eventos comprometem diretamente a estabilidade de infraestruturas rodoviárias, gerando prejuízos econômicos, riscos à segurança dos usuários e interrupções na malha viária. Trata-se de um fenômeno de origem multifatorial, influenciado por aspectos como a geometria da encosta, as propriedades geomecânicas dos solos, a profundidade do lençol freático e a eficiência dos sistemas de drenagem superficial e profunda (Rodine & Johnson, 1976; Terzaghi et al., 1996).

De acordo com a NBR 11682:2009, a avaliação da estabilidade de taludes deve considerar fatores de segurança mínimos, sendo imprescindível a realização de investigações geotécnicas detalhadas — incluindo sondagens, ensaios laboratoriais e modelagens numéricas. No âmbito da infraestrutura rodoviária, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece normativas complementares, como a DNIT 074/2006, define e fixa a sistemática do tratamento ambiental de superfícies de taludes de corte, aterros e encostas a montante da rodovia, além dos manuais IPR-715 e IPR-724, que orientam o dimensionamento de sistemas de drenagem eficientes e sustentáveis.

A definição de soluções de contenção deve levar em conta não apenas os aspectos geotécnicos, mas também a interação solo-estrutura, a durabilidade dos materiais empregados e o comportamento hidráulico do maciço, conforme destacado por Duncan e Wright (2005). Nesse contexto, o uso de técnicas como o solo grampeado tem se mostrado eficaz, por sua versatilidade, adaptabilidade a diferentes geologias e capacidade de promover estabilidade global com intervenções controladas.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A BR-381/MG é uma via fundamental para a ligação entre a Região Metropolitana de Belo Horizonte e o leste de Minas Gerais. No km 314,41, no município de Nova Era/MG, foi registrada instabilidade recorrente em talude, culminando, em janeiro de 2022, em uma ruptura significativa da crista e um movimento de massa circular, que comprometeu totalmente a plataforma rodoviária e interrompeu o tráfego no trecho.

Como medida emergencial, foram realizados cortes nos taludes com inclinações de 1:2 e 1:1,5 e implantado sistema de contenção em solo grampeado com barras de 16 m e concreto projetado. Apesar disso, novos períodos chuvosos causaram erosões superficiais e instabilidades localizadas. A ocorrência desses processos está associada à natureza geológica do solo, composto por filito, material suscetível ao intemperismo físico. Estudos de Brideau et al. (2006) indicam que esse tipo de rocha apresenta rápida degradação devido ao elevado grau de alteração e ao pequeno espaçamento entre as descontinuidades de foliação, conforme evidenciado por ensaios de durabilidade à desagregação (*Slake Durability Test*).

Soluções como enleivamento e hidrossemeadura foram executadas na tentativa de estabilizar a superfície do talude, mas mostraram-se insuficientes diante das características geotécnicas locais. A recorrência dos

processos erosivos expôs a limitação dessas técnicas em garantir a proteção efetiva da encosta.

O sistema de drenagem implantado também se mostrou ineficiente. Sarjetas de concreto e escadas dissipadoras não impediram a percolação de água e o escoamento superficial desordenado, agravado pela cobertura vegetal deficiente. A geometria inadequada da sarjeta triangular tipo 02, somada à ausência de dispositivos ao longo da face do talude, comprometeu o controle hidráulico, contribuindo para novas instabilidades e destacando a necessidade de reestruturação do sistema de drenagem.

Diante desse cenário, verificou-se a necessidade de implementar medidas complementares e definitivas, com o objetivo de assegurar a estabilidade do talude e a segurança dos usuários da rodovia.

3. METODOLOGIA

Para avaliação do problema e, posteriormente, definição da solução mais adequada ao caso foram realizadas sondagens do tipo SPT em oito furos distribuídos ao longo do talude e da plataforma rodoviária, seguindo as normas técnicas brasileiras. Em trechos onde o solo apresentou resistência elevada à percussão, foram executadas sondagens rotativas com coroa diamantada para caracterização das rochas subjacentes.

As amostras de solo coletadas foram submetidas à classificação tátil-visual em laboratório, e os valores de NSPT permitiram inferir a consistência e o grau de compactação das camadas, além da identificação do nível freático. Com base nesses dados, elaboraram-se perfis geotécnicos e selecionou-se um ponto representativo da encosta (T1) para modelagem detalhada, considerando inclinação, estratigrafia e presença de água.

As análises de estabilidade foram realizadas no *software GeoStudio – Slope/W* por meio dos métodos de Morgenstern-Price e Janbu, simulando as condições pós-obra emergencial, que incluíam retaludamento e contenção com solo grampeado. Apesar de apresentarem fator de segurança inicial satisfatório (1,58), inspeções em campo evidenciaram a persistência de processos erosivos, justificando a necessidade de novas intervenções.

Foram então simuladas e comparadas três alternativas de reforço, avaliadas quanto à estabilidade global, eficácia na contenção de patologias superficiais, interceptação da superfície de ruptura e viabilidade técnica e construtiva. Essa abordagem permitiu a escolha da solução mais eficiente e segura frente às características locais do talude.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os ensaios realizados indicaram que o solo da região da contenção é predominantemente composto por silte argiloso de consistência variável, resultante do intemperismo de filitos da Formação Gandarela. Trata-se de um material com elevada suscetibilidade à degradação física e presença de descontinuidades estruturais, o que compromete sua estabilidade. As principais propriedades mecânicas obtidas para o traçado T1 estão sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características mecânicas do solo (traçado T1)

Solo	Coesão (KPa)	Ângulo de Atrito (º)	G (KN/m³)
Silte Argiloso	0	29	17
Silte Argiloso	5	35	20

Considerando base nos estudos geotécnicos realizados, foram desenvolvidas três alternativas de solução para estabilização definitiva do talude no km 314,41 da BR-381/MG:

- **Solução 1**: implantação de grampos adicionais aos já existentes, com diâmetros de 20 mm e 25 mm e 6 metros de comprimento, complementados por jateamento de concreto para formar um paramento monolítico na face do talude;
- **Solução 2**: instalação de grampos mais profundos, com 20 metros de comprimento na base do talude, complementados por grampos de 4 metros nas áreas intermediárias, associados a novo revestimento em concreto projetado; e

A solução 1, que consistia na implantação de grampos adicionais (com diâmetros de 20 mm e 25 mm e comprimentos de até 6 m), associados ao jateamento de concreto para reforço da face do talude, revelou-se insuficiente. As simulações e análises de estabilidade demonstraram que tais grampos não promoveram melhora no fator de segurança do maciço, uma vez que não interceptaram a superfície crítica de ruptura identificada. Assim, a intervenção atuou apenas como contenção superficial, sem contribuição relevante para a estabilidade global. Em consequência, a proposta foi considerada inadequada para assegurar a segurança de longo prazo do talude.

A solução 2 apresentou desempenho significativamente superior, as análises de estabilidade indicaram aumento expressivo no fator de segurança, com interceptação eficaz da superfície de ruptura identificada nos estudos geotécnicos, como mostrado na Figura 1 que compara as soluções. Essa configuração mostrou-se adequada tanto para o controle da instabilidade global quanto para a contenção das patologias superficiais, sendo considerada a solução mais eficiente e tecnicamente viável para garantir a estabilidade do talude em longo prazo.

Solução 1
Grampo de 20 mm (6 metros de comprimento)

Solução 2
Grampo de 20 mm (20 metros de comprimento)

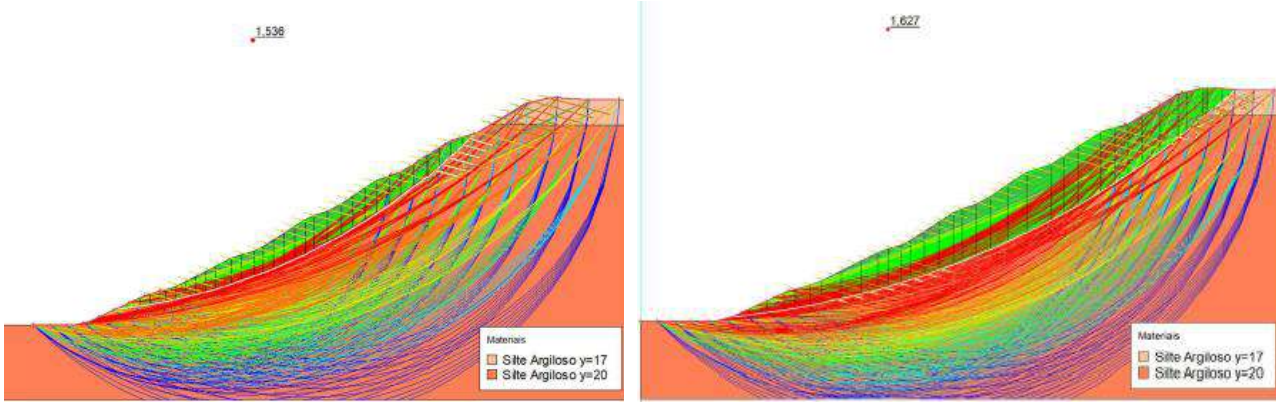


Figura 1: Grampos de 20mm adicionais a face do talude

5. CONCLUSÕES

Os estudos geotécnicos e as análises de estabilidade realizadas no talude localizado no km 314,41 da BR-381/MG permitiram caracterizar com precisão as causas da instabilidade recorrente, destacando-se a suscetibilidade do solo do tipo filito ao intemperismo físico, a deficiência na proteção superficial e os problemas no sistema de drenagem. A partir desses dados, foram propostas diferentes alternativas técnicas, avaliadas com base em critérios geomecânicos, operacionais e de viabilidade construtiva, com destaque para o uso de solo grampeado como solução estruturante.

Dentre as propostas analisadas, a alternativa que incorporou grampos de maior comprimento (20 metros) associados à reconfiguração do sistema de drenagem demonstrou ser a mais eficaz, apresentando fator de segurança de 1,58, compatível com os parâmetros da NBR 11682:2009. Essa solução garante maior estabilidade global da encosta e mitigação dos processos erosivos, revelando-se tecnicamente segura e adequada às condições locais. O estudo reforça a importância de abordagens integradas na estabilização de taludes, considerando aspectos geotécnicos, ambientais e de manutenção preventiva. Além disso, reforça-se a necessidade de reestruturação completa do sistema de drenagem superficial e subsuperficial é imprescindível para assegurar a estabilidade a longo prazo, prevenir processos erosivos e garantir a segurança da plataforma rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de taludes – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

Brideau, M. A.; Stead, D.; Brooks, G. R. (2006) *Engineering geology of weak rock slopes at two landslide sites in Canada*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 39, n. 1, p. 25–40. DOI: 10.1144/1470-9236/04-

070.
DNIT (2006) *Norma DNIT 074/2006 – ME: Tratamento ambiental de taludes de corte, aterros e encostas*. Rio de Janeiro.
DNIT (2005) *Manual IPR-715 – Drenagem superficial em rodovias*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR.
DNIT (2006) *Manual IPR-724 – Drenagem subsuperficial em rodovias*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR.
Duncan, J. M.; Wright, S. G. Soil Strength and Slope Stability. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
Rodine, J. R.; Johnson, A. M. The ability of debris, heavily charged with water, to move on slopes. Engineering Geology, Amsterdam, v. 10, n. 2–4, p. 105–123, 1976. DOI: https://doi.org/10.1016/0013-7952(76)90045-X.
Terzaghi, K.; Peck, R. B.; Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed. New York: Wiley, 1996.

Nádya Frauzino Salgado (frauzino.nadya@ime.eb.br)
Instituto Militar de Engenharia - IME, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro, Brasil.
Jefferson Santos Soares (jefferson.soares@ime.eb.br)
Instituto Militar de Engenharia - IME, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Praça General Tibúrcio, 80, Urca, Rio de Janeiro, Brasil.
Alexandre Gil Batista Medeiros (alexandre.medeiros@dnit.gov.br)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
Francesca Emmanuelle Leite Viana Abreu (francesca.abreu@dnit.gov.br)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
José Bruno Primo do Nascimento (josebrunoprimo@gmail.com)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF
Mateus Santos Lima (mateuslima.eng@outlook.com)
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, Setor de Autarquias Norte, Quadra 03 Lote A, Ed. Núcleo dos Transportes, Brasília – DF

Materiais Geotécnicos na Infraestrutura de Transportes

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLOS TROPICAIS ESTABILIZADOS COM PÓ DE PEDRA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS: ANÁLISE MECANÍSTICO-EMPÍRICA

Sara Regina Simplicio Costa, Adriana Goulart dos Santos
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

RESUMO
A crescente demanda por infraestrutura viária no Brasil exige o uso racional dos materiais disponíveis, sendo a utilização de solos tropicais é uma alternativa viável. Ademais, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) adotou um novo método de dimensionamento de pavimento, baseado em análise mecanística-empírica, denominado MeDiNa. Esta pesquisa tem como objetivo analisar solos tropicais residuais de diferentes regiões do Brasil, com a proposta de estabilização com pó de pedra para aplicação em camadas granulares, dimensionadas pelo método mecanístico-empírico. Serão realizados ensaios de caracterização física e mineralógica dos solos, caracterização física do pó de pedra e ensaios triaxiais dinâmicos dos solos puros e das misturas. Espera-se que os resultados indiquem ganhos significativos de resistência mecânica ao misturar os solos com pó de pedra, o que contribuirá para a redução do afundamento por trilha de roda de pavimentos dimensionados com esse tipo de material na camada de sub-base.

1. PROPOSTA DE PESQUISA

Para o dimensionamento de pavimentos baseado em análises mecanístico-empíricas, é necessário conhecer o comportamento tensão-deformação dos materiais que serão empregados na sua estrutura. Mais especificamente, faz-se necessário avaliar as propriedades mecânicas dos materiais granulares, que comporão as camadas de base, sub-base e reforço de subleito, por meio de ensaios triaxiais cíclicos para a determinação de seus comportamentos resiliente e de deformação permanente.

Neste contexto, solos tropicais residuais são amplamente utilizados em projetos de pavimentação e o conhecimento técnico sobre suas caracterizações físicas e de comportamento mecânico sob diferentes condições de estabilização são bem estabelecidos. Todavia, há poucos estudos sobre esses solos estabilizados com outros materiais que deem ênfase aos parâmetros de deformabilidade, os quais são utilizados na metodologia de dimensionamento mecanístico-empírico, configurando a lacuna do estudo proposto.

O objetivo principal desta pesquisa é analisar o comportamento resiliente e a deformação permanente de misturas de solos tropicais residuais oriundos de diferentes regiões do Brasil com pó de pedra em porcentagens distintas, e avaliar esse material como camada de sub-base de pavimento quanto ao critério de dimensionamento referente ao afundamento por trilha de roda. O estudo do tema contribui para ampliar a possibilidade do uso de materiais naturais localmente abundantes, no avanço de novas informações técnicas sobre materiais de pavimentação e na promoção de práticas mais sustentáveis e economicamente vantajosas para a construção de pavimentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Solos residuais tropicais

Solos formados em regiões de clima tropical são predominantemente argilosos e a sua mineralogia geralmente apresenta hidróxidos de ferro (Fe), hidróxidos de alumínio (Al) e argilominerais não expansivos. Tais características mineralógicas conferem a esses solos excelente desempenho como camada de pavimento, principalmente pela cimentação parcialmente irreversível após a secagem (Guimarães, 2015).

Nesse contexto, Sousa (2016) destaca a necessidade da execução de mais estudos sobre o uso de solos tropicais, típicos do Brasil, para aplicação em camada de pavimentos. Ressalta, ainda, que seu emprego deve ser pautado em análises mais modernas como as do comportamento resiliente e da deformação permanente, bem como em metodologias de classificação específicas para solos tropicais, como a Miniatura, Compactado, Tropical (MCT).

2.2. Estabilização física de solos com pó de pedra

A estabilização de solos é uma prática destinada ao aprimoramento da qualidade dos materiais empregados na construção civil, e há uma diversidade de materiais que podem ser usados para melhorar as propriedades mecânicas dos solos, sendo amplamente utilizados na infraestrutura viária (Alcântara, 2016). Os benefícios da estabilização incluem o aumento da resistência mecânica e da durabilidade, bem como a redução da plasticidade e da suscetibilidade à variação volumétrica (Firoozi, 2017). Os métodos de estabilização são geralmente classificados em três categorias principais: mecânica, química e física.

Estudos indicam que o uso de pó de pedra constitui uma técnica promissora para a estabilização física de solos em obras

rodoviárias (Chiranjeevi, 2023). Essa abordagem melhora as propriedades mecânicas e a durabilidade dos solos, além de oferecer efeitos ambientais significativos ao reutilizar resíduos industriais (Bazarbekova *et al*., 2024).

2.3 Método de dimensionamento MeDiNa

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) é o novo método mecanístico-empírico oficial do Brasil para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, adotado pelo DNIT em 2018. O método, atualmente em fase de implementação e calibração, é constituído por um *software* que realiza o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (Salla, 2025).

Rebouças *et al*. (2025) realizaram um estudo com a avaliação de um segmento experimental de pavimento flexível dimensionado com camadas de base de solo-cascalho e solo melhorado com cimento para verificar a precisão do MeDiNa nas estimativas de danos ao pavimento. Lima *et al*. (2020) investigaram o comportamento de solos tropicais lateríticos e sua aplicação para camadas de pavimento segundo os critérios de dimensionamento do MeDiNa, e os resultados obtidos indicam que esses solos podem ser potencialmente utilizados como camadas de base e sub-base em estruturas de pavimentos flexíveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho serão amostras de três solos de regiões distintas do Brasil, e pó de pedra proveniente de material britado. Os solos a serem estudados são oriundos de jazidas que fornecem material para obras de pavimentação nos estados de Santa Catarina, Rio Grande do Norte e Roraima, contemplando, respectivamente, as regiões Sul, Nordeste e Norte do Brasil. O material da região Nordeste foi coletado, transportado e está armazenado no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UDESC/Joinville.



Figura 1: Coleta de solo da jazida em Rio Grande do Norte

O material da região Norte será coletado da região sul do Estado de Roraima, na cidade de Rorainópolis. O material da região Sul será coletado da região Norte do Estado de Santa Catarina, na cidade de São Francisco do Sul.

Para alcançar o objetivo deste trabalho, serão realizadas a caracterizações física, mineralógica e mecânica dos solos, com a posterior definição de diferentes teores de misturas para a estabilização física utilizando pó de pedra, visando à obtenção dos parâmetros mecânicos de solos puros e misturados. Nos ensaios de caraterização física, as amostras dos solos serão caracterizadas fisicamente pelos ensaios de granulometria, limites de liquidez, limite de plasticidade, densidade real dos grãos, Mini-MCV e compactação. Com os dados do ensaio, serão obtidas as curvas granulométricas dos solos, a classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), pelo Transportation Research Board (TRB) e pelo método Miniatura, Compactado, Tropical (MCT).

Na caracterização do pó de pedra, serão realizados os ensaios de granulometria e densidade real dos grãos, fundamentais para dosagem das misturas. A caracterização microestrutural e mineralógica dos solos será conduzida por análises de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), identificação das fases cristalinas presentes por difração de raios X (DRX), composição química pela técnica de fluorescência de raios X (FRX) e avaliação morfológica por microscópio eletrônico de varredura (MEV) para identificação dos elementos constituintes.

Com os dados obtidos na caracterização física dos materiais, serão realizadas as dosagens da mistura para estabilização, fixando três teores de pó de pedra para todos os solos, em substituição ao peso seco do solo. A microestrutura da mistura dos solos também será analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Após a etapa de caracterização física dos materiais, serão realizados ensaios triaxiais dinâmicos para a determinação dos módulos de resiliência (MR) e deformação permanente (DP) dos solos puros e das misturas. Modelos matemáticos serão aplicados para avaliar o módulo de resiliência e a deformação permanente dos materiais ensaiados, com a posterior análise de ocorrência de *Shakedown* nos solos e nas misturas. Por fim, será simulado o dimensionamento de um pavimento flexível, utilizando os dados de MR e DP como entrada do *software* MeDiNa. Os testes iniciais visam verificar a aplicação desses solos e misturas em camadas de sub-base. Após o dimensionamento, será possível prever os efeitos da deformação permanente no período de projeto.

4. RESULTADOS ESPERADOS

A discussão dos resultados de cada etapa experimental será embasada em informações da literatura, de modo a comparar ou confrontar os valores obtidos neste estudo.

Os resultados esperados são os seguintes:

- A caracterização dos solos permitirá verificar que há variações nas propriedades físicas e mineralógicas dos materiais de classificação semelhantes, mas de origens litológicas distintas;
- Espera-se, também, que os solos estabilizados apresentem ganhos de resistência mecânica e redução da deformabilidade, sendo possível sugerir sua aplicação em camada de sub-base.

Agradecimentos

Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), Edital 18/2024, através de uma bolsa de estudos em nível de mestrado acadêmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcântara, M. A. M, *et al.* (2016) Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal. *Revista Matéria*, v. 22, p. 01-09. DOI: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0209.

Bazarbekova, A., *et al*. (2024) Evaluating the Efficacy of Limestone Powder as a Partial Replacement of Ordinary Portland Cement for the Sustainable Stabilization of Sulfate-Bearing Saline Soil. *Sustainability* (Switzerland), v.16, n. 21, p. 9224. DOI: https://doi.org/10.3390/su16219224.

Chiranjeevi, V.; Singh, K. e Kishan D. (2023) Soil stabilization by integrating dust particles with calcium lignosulphanate. *Progress in Physical Geography*, v. 48, n. 1, p. 60 – 78. DOI: https://doi.org/10.1177/03091333231209157.

Firoozi, A. A., *et al*. (2017) Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engenharia*, v. 8, n. 26, p. 1-16. DOI: http://dx.doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9.

Guimarães, A. C. R. et al. (2015). Relatório Critérios de Dimensionamento - RT 03/15 - LIF. Projeto IME/Vale: Estudos para Revisão de Critérios de Projeto da Via Permanente. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.

Lima, C. D. A., *et al*. (2020) Mechanical Characterization of Fine-Grained Lateritic Soils for Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. *Journal of Testing and Evaluation (ASTM)*, v. 48, n. 1. DOI: http://dx.doi.org/10.1520/JTE20180890

Rebouças, V., *et al*. (2025) Accuracy of the Brazilian mechanistic-empirical method in the analysis of asphalt pavements from two experimental sections. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 18, n. 2, p. e15741. DOI: https://doi.org/10.55905/revconv.18n.2-342

Salla, R. L. (2025) *Análise da deformação permanente de misturas de solo-brita com incorporação de resíduo de pavimento asfáltico para utilização como camada de base ou sub-base de pavimentação*. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. Disponível em: https://www.udesc.br/cct/ppgec/publicacoes/dissertacoes. Acesso em 25/06/2025.

Sousa, M. A. S. (2016) Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da Estrada de Ferro Carajás para uso como camadas de pavimento ferroviário. Dissertação. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016. Disponível em: https://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/7787. Acesso em 02/02/2025.

Sara Regina Simplicio Costa (sara.rsc@edu.udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Rua Paulo Malschitzki, n.200, Zona Industrial Norte, Joinville, Santa Catarina, Brasil.
Adriana Goulart dos Santos (adriana.santos@udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Rua Paulo Malschitzki, n.200, Zona Industrial Norte, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE CAMADAS GEOTÉCNICAS DO PAVIMENTO CONSIDERANDO A SUCÇÃO

Lara Batista Ferreira de Lima[1], **Lilian Ribeiro de Rezende**[1], **Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior**[1]
Universidade Federal de Goiás

RESUMO
Os métodos de dimensionamento de pavimentos que consideram o comportamento mecânico do material têm se mostrado de grande importância para a concepção de pavimentos mais resistentes e duráveis. Existem diversos modelos para previsão de comportamento resiliente na literatura, em que podem ser observados a influência de diferentes parâmetros de estado de tensão, variação de umidade, sucção, entre outros. Além disso, o parâmetro de deformação permanente também é muito importante para prever o comportamento do subleito ao longo da vida útil do pavimento. Nesse contexto, esta pesquisa visa estudar a influência da variação da umidade e da sucção em solos não saturados no contexto do módulo de resiliência e da deformação permanente de solos tropicais. Desta forma, procura-se uma melhor compreensão da interação solo-atmosfera com o pavimento.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

Este relatório de tese se relaciona com a pesquisa em andamento de Lima (2025) que tem como proposta realizar estudos no contexto do ensaio de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP) para camadas geotécnicas e subleito do pavimento, considerando a condição não saturada do solo. Dessa forma, são propostas duas principais abordagens nesta pesquisa. A primeira temática consiste na análise estatística de diversos modelos de previsão de MR que consideram ou não o parâmetro de sucção do solo e, a partir disso, estudar a influência da variação da umidade em solos não saturados em materiais disponíveis na literatura. A segunda abordagem proposta na pesquisa envolve a realização de ensaios de MR e DP em solos tropicais coletados no estado de Goiás, utilizando diferentes sucções em cada ensaio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA

A infraestrutura de transportes tem relação direta com o desenvolvimento da economia de um país. Segundo a Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de Rodovias em 2024 (CNT, 2024), o modo rodoviário é o principal meio de transporte do Brasil, pois contempla 65% das movimentações de mercadorias e 95% do deslocamento de passageiros. Apesar da importância das rodovias para o transporte brasileiro, a pesquisa CNT indica que 67,0% das vias se encontram em condição regular, ruim ou péssima em relação ao estado geral do pavimento. A CNT (2017) já evidenciava a necessidade de mudar o método de dimensionamento para melhorar o desempenho dos pavimentos. Nesse sentido, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2020) oficializou o método de dimensionamento mecanístico-empírico, que leva em consideração parâmetros de MR e DP de materiais geotécnicos para avaliar o desempenho da estrutura de pavimentos ao longo de sua vida útil.

O pavimento é uma estrutura que é submetida a cargas cíclicas devido à passagem de veículos sobre a pista de rolamento e a efeitos climáticos. A incidência solar e variações sazonais pluviométricas são dois elementos do clima que podem influenciar no desempenho do pavimento (Medina & Motta, 2015). Nesse contexto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas a partir dos parâmetros de MR e DP com o intuito de conhecer o desempenho de solos de diferentes regiões, identificar a melhoria do material a partir de adição de diferentes tipos de resíduos como material fresado, resíduo de construção civil, ou então a partir da adição de cimentos ou cal para identificar uma possível melhora no desempenho. Dentre diferentes formas de estudar o comportamento do solo em termos de ensaios triaxiais dinâmicos, destaca-se pesquisas que buscam identificar a interferência da sucção no comportamento resiliente do solo e em sua deformação.

Nesse sentido, do ponto de vista do parâmetro MR, diversas pesquisas investigam o comportamento de resiliência do material juntamente com a condição de sucção que se encontra. Já em termos do parâmetro DP, a quantidade de pesquisas é expressivamente menor, principalmente as que consideram o comportamento levando em consideração a sucção, e estas tendem a ser mais recentes. Em relação a isso, Cao *et al*. (2020) afirmam que a forma que o histórico de sucção influencia nas camadas de base de pavimentos a longo prazo ainda permanece obscura.

Para a pavimentação, a umidade do solo do subleito pode ser um fator determinante no desempenho estrutural e na durabilidade da via, visto que as variações de umidade e estado de sucção afetam diretamente a resiliência, capacidade de suporte e resistência ao cisalhamento do material (Khoury & Zaman, 2004; Khoury, Brooks, Zaman, *et al.*, 2009; Fredlund *et al.*, 2012). Dessa forma, pesquisas que buscam estudar a DP e o MR de camadas geotécnicas e de subleito de pavimentos flexíveis na condição não saturada contribuem com o entendimento dos efeitos da sucção e a variação de umidade devido a interação solo-atmosfera com o pavimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando a primeira temática da pesquisa, os materiais utilizados para análise dos modelos de MR serão obtidos a partir de dados de solos disponíveis na literatura: Parreira and Gonçalves (2000); Gupta *et al.* (2007); Rodrigues (1997); Rahman and Tarefder (2015); Han e Vanapalli (2016); Zhang *et al.* (2020); Venson (2015). Para análise dos resultados de MR são considerados diversos modelos disponíveis na literatura, que incluem e que não incluem o parâmetro de sucção. Assim, os modelos de MR, bem como os dados dos materiais, serão inseridos em um script desenvolvido para o software RStudio para regressão não linear e análise estatística a fim de avaliar a aderência dos modelos em relação aos dados experimentais, a partir dos seguintes parâmetros: *Akaike information criterion* (AIC), *Bayesian information criterion* (BIC), *sum of squares error* (SSE), *sum of squares regression* (SSR), *sum of squares total* (SST), *residual standard error* (RSE), *root mean squared error* (RMSE), *coefficient of determination* (R^2) e *adjusted coeficiente of determination* (R^2 adj).

Em relação a segunda abordagem da pesquisa, que inclui campanha experimental, os materiais utilizados para análise de MR e DP foram coletados no estado de Goiás, sendo composto por três solos, classificados respectivamente pela Classificação Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), a Classificação *Transportation Research Board* (TRB) e Classificação Miniatura, Compactado, Tropical (MCT): 1) solo GC (granular argiloso), A-2-6 e LA' (laterítico arenoso), estudado por Lima *et al.* (2023); 2) solo SM (areia siltosa), A4 e NS' (não laterítico siltoso), estudado por Freitas *et al*. (2020), coordenadas 15°58'20.5"S 50°06'26.1"W; 3) solo CL (argila com baixa compressibilidade), A-4, LG' (laterítico argiloso), estudado por Lima (2025). A escolha de materiais com diferentes classificações é estratégica, pois busca identificar particularidades de diferentes tipos de solos, de maneira a observar como as variáveis de tensão e a sucção influenciam em diferentes granulometrias durante o ensaio triaxial. Do ponto de vista de materiais granulares, que são amplamente utilizados na pavimentação, é de grande interesse identificar a influência da sucção presente, principalmente na parcela fina do solo e como isso contribui para a estabilização e resistência das camadas. A caracterização dos materiais coletados foi feita conforme as normativas do DNIT, bem como os ensaios mecânicos de MR e DP. Além disso, foram construídas a curva característica solo-água (CCSA) pela metodologia *Water Potential Meter* (WP4C) (Fredlund *et al*., 2012), Tempe Cell (Fredlund *et al*., 2012) e Placa de Pressão (Borges, 2010). A análise dos resultados de MR inclui os modelos apresentados anteriormente, realizados na primeira abordagem da pesquisa, assim como o estudo estatístico de maneira a analisar o modelo que apresenta melhor ajuste em relação aos valores obtidos em ensaio. Enquanto a análise dos resultados de DP incluem o modelo definido pela norma, o modelo que considera sucção proposto por Santos *et al.* (2024), e a análise a partir do conceito Shakedown de Guimarães (2009). O estudo estatístico será fundamental para identificar o ajuste em relação ao modelo que considera sucção e o modelo que não considera. Após a realização dos ensaios de MR e DP dos materiais, será realizada uma simulação de dimensionamento mecanístico-empírico utilizando o software MeDiNa, a partir de uma estrutura típica de referência, com revestimento, base e sub-base pré-definidos, realizando a inserção dos solos estudados como material de subleito. Os resultados obtidos no dimensionamento estarão em função de área trincada (AT) e o afundamento de trilha de roda (ATR) ao longo da vida útil do projeto.

4. RESULTADOS ESPERADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim, espera-se identificar o desempenho de diferentes modelos de MR disponíveis na literatura e observar as particularidades daqueles que incluem e que não incluem a sucção como variável; identificar o comportamento de solos regionais em termos de MR e DP a partir da variação de sucção dos materiais, de maneira a ampliar o banco de dados e o entendimento dos efeitos da sucção no subleito de pavimentos considerando diferentes tipos de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cao, Z., Zhang, Q., Cai, Y., Chen, J., Gu, C., & Wang, J. (2020). The effects of suction history on the cyclic behavior of unsaturated road base filling materials. *Engineering Geology*, *276*, 105775. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105775

Cavalcante, D. R. (2022). *Influência da variação de umidade e da frequência de ensaio no módulo de resiliência e na deformação permanente de solos* [Dissertação de Mestrado em Geotecnia]. Universidade Federal de Goiás.

CNT, C. N. de T., SST, S. S. do T., SNAT, S. N. de A. do T., & ITL, I. de T. e L. (2024). *Pesquisa CNT de Rodovias 2024*. Cnt.

CNT, C. N. do T. (2017). Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? *Confederação Nacional do Transporte*, 160.

DNIT, D. N. de I. de T. (2020). *Manual de Utilização do programa MeDiNa. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico—Empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos* (Versão 1.1.5).

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.

Freitas, J. B. de, Rezende, L. R. de, & Gitirana Jr., G. de F. N. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*, *270*, 105580. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580

Guimarães, A. C. R. (2009). *Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais constituintes de Pavimentos* [Tese de Doutorado em Engenharia Civil]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Gupta, S., & Ranaivoson, A. (2007). Pavement Design Using Unsaturated Soil Technology. *Minnesota Department of Transportation*, 245.

Han, Z., & Vanapalli, S. K. (2016). Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils. *Engineering Geology*, *211*, 85–97. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.020

Khoury, N., Brooks, R., Zaman, M. M., & Khoury, C. N. (2009). Variations of Resilient Modulus of Subgrade Soils with Postcompaction Moisture Contents. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2101*(1), 72–81. https://doi.org/10.3141/2101-09

Khoury, N. N., & Zaman, M. M. (2004). Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1874*(1), 99–107. https://doi.org/10.3141/1874-11

Lima, L. B. F. de. (2025). *Estudo do Efeito de Flutuações de Umidade e Sucção no Módulo de Resiliência e na Deformação Permanente de Materiais Tropicais de Subleito* [Tese (em andamento) de Doutorado em Geotecnia]. Universidade Federal de Goiás.

Lima, L. B. F. de, Silva, J. P. S., & Rezende, L. R. de. (2023). Investigation of resilient modulus and permanent deformation of tropical soil with Reclaimed Asphalt Pavement. *Transportation Geotechnics*, *43*, 101103. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101103

Medina, J. de, & Motta, L. M. G. da. (2015). *Mecânica dos pavimentos* (3ª). Editora Interciência.

Parreira, A. B., & Gonçalves, R. F. (2000). The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil. *ISRM International Symposium*. ISRM International Symposium. ISRM-IS-2000-397

Rahman, M. T., & Tarefder, R. A. (2015). Assessment of Molding Moisture and Suction on Resilient Modulus of Lime Stabilized Clayey Subgrade Soils. *Geotechnical Testing Journal*, *38*(6), 840–850. https://doi.org/10.1520/GTJ20140237

Rodrigues, M. R. de. (1997). *Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul* [Dissertação de Mestrado em Engenharia]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Santos, T. A. dos, Pinheiro, R. J. B., & Specht, L. P. (2024). Effects of moisture content and soil suction on the permanent deformation of tropical subgrade soils: Experimental investigations and modelling. *Road Materials and Pavement Design*, *25*(11), 2358–2381. https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2310823

Venson, G. I. (2015). *Módulo de resiliência e vida de fadiga de areia artificialmente cimentada* [Dissertação de Mestrado em Engenharia]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Zhang, J., Peng, J., Zheng, J., & Yao, Y. (2020). Characterisation of stress and moisture-dependent resilient behaviour for compacted clays in South China. *Road Materials and Pavement Design*, *21*(1), 262–275. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1481138

Lara Batista Ferreira de Lima (lara.batista@ufg.br); *Lilian Ribeiro de Rezende* (lrezende@ufg.br); *Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior* (gilsongitirana@ufg.br).
Universidade Federal de Goiás (UFG). Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON).
Avenida Universitária, 1488, Qd. 86, Lt. Área, Setor Leste Universitário. CEP: 74605-220. Goiânia – GO. Brasil.

ESTUDO DOS FATORES DE CONVERSÃO DE VOLUMES REGIONALIZADOS PARA PERÍCIAS DE OBRAS RODOVIÁRIAS NO ESTADO DO CEARÁ

Igor de Sousa Vieira, Suelly Helena de Araújo Barroso
Universidade Federal do Ceará

RESUMO
Em obras rodoviárias, a execução de cortes e aterros envolve os serviços de escavação, transporte e compactação de solos, nos quais esses apresentam densidades diferentes. Os fatores de conversão de volumes representam a relação entre as densidades nos estados *in situ*, solto e compactado. Geralmente, a escolha desses fatores é feita com base na experiência local da engenharia e/ou na literatura. No entanto, isso pode resultar em valores imprecisos do movimento de terra, causando atrasos no cronograma e extrapolação no orçamento da obra. Assim, propõe-se o estudo regionalizado dos solos com o objetivo principal de obter e aferir os fatores de conversão de volumes para auxiliar na perícia de obras rodoviárias. Para tanto, serão realizadas coletas de solos e ensaios de campo e de laboratório. Além da determinação dos fatores de conversão de volumes regionalizados, serão realizadas análises de correlação entre a variação volumétrica e outras propriedades geotécnicas dos solos.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

O comportamento volumétrico dos solos varia em função de fatores como origem, clima e pedologia, dentre outros. Além disso, as características retrátil e expansiva dos solos estão relacionadas à localização geográfica e aos parâmetros de projeto, como umidade e energia de compactação. A literatura disponível indica que a adoção dos fatores de conversão volumétrica arbitrários, sem o amplo conhecimento das propriedades do solo, pode resultar em erros significativos no cálculo do movimento de terra. Ademais, problemas envolvendo o cálculo dos volumes de solo são observados com certa frequência nos relatórios de auditoria do Tribunal de Contas da União (TCU).

Assim, esta pesquisa propõe o estudo regionalizado dos fatores de conversão de volumes para serem usados em perícias de obras rodoviárias. Também serão analisadas as correlações entre a expansão e retração dos solos com parâmetros geotécnicos para realizar análises espaciais e modelagens relacionadas aos fatores de correção volumétrica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é descrever o comportamento volumétrico dos solos utilizados na pavimentação no Estado do Ceará para perícias de obras rodoviárias.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar os parâmetros geotécnicos de diferentes tipos de solos utilizados em obras rodoviárias no Estado do Ceará;
- Avaliar os fatores de conversão de volume e sua correlação com outros parâmetros geotécnicos;
- Analisar a variação espacial e regionalizada acerca dos fatores de conversão de volume, apresentando recomendações para investigações geotécnicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A falta de orientações gerais para a determinação dos fatores de conversão de volumes resulta em uma grande variedade de metodologias para realizar essa atividade em diferentes países. De acordo com Rocha *et al*. (2012), geralmente, o volume de solo a ser transportado é calculado a partir de valores de empolamento indicados na literatura técnica. Frequentemente, esses fatores são relacionados somente ao tipo de solo, que por sua vez se utiliza de nomenclatura não técnica, tais como “terra comum” ou “terra seca”. É possível que essas condutas tornem os volumes teóricos de movimento de terra mais destoantes daqueles observados na execução do projeto, resultando em orçamentos superfaturados.

Segundo Shamo (2013), a escolha do fator de retração em obras de pavimentação no estado de Dakota do Norte é feita através de um sistema de tentativa e erro. Essa abordagem é baseada na experiência dos engenheiros e tende a assumir uma certa uniformidade em relação à variação volumétrica dos solos no estado, não dispondo de medidas de confiabilidade quanto à estimativa. Shamo (2013) propôs um modelo resultante

da modelagem espacial e estatística para o fator de retração que pudesse ser utilizado no estado.
Yousif *et al.* (2020) propõem associar o comportamento volumétrico do solo a outros parâmetros geotécnicos e afirmam que o uso de fatores de conversão volumétrica genéricos, sem o amplo conhecimento dos solos locais, é caro e enganoso. Nesse estudo, realizado em Erbil (Iraque), buscou-se construir um banco de dados com as porcentagens de retração e empolamento e relacioná-las a outras propriedades do solo, como densidade *in situ* e teor de argila.

Jin *et al*. (2011) sugerem o uso de metodologias menos convencionais para o cálculo dos volumes de solo e do fator de conversão que seja mais aplicável ao campo, como um sistema de medição a partir da fotogrametria. A porcentagem de expansão é obtida pela relação com um parâmetro tabelado pelos autores que corresponde à razão de composição do solo no material totalmente intemperizado.

Crooks (2013) pesquisou acerca do estado da prática do cálculo do volume de solo nos estados do Alabama, Flórida, Geórgia, Carolina do Norte, Carolina do Sul e Tennessee. Nesse estudo, o autor comparou os métodos adotados pelos departamentos de transportes desses estados (DOTs) e avaliou os fatores de empolamento e retração. Segundo o autor, alguns dos departamentos estaduais não adotam fatores de expansão e a maioria deles não fornece guias com os fatores típicos. O autor concluiu que existe uma variação entre os métodos adotados por cada estado e, consequentemente, os valores obtidos nos cálculos de terraplenagem apresentam diferenças substanciais.

White *et al.* (2010) apresentaram os resultados de ensaios com solos coletados nos estados de Utah, Texas, Dakota do Norte e Iowa. Os pesquisadores sugerem futuras pesquisas com o propósito de construir um banco de dados onde os fatores de contração e expansão sejam vinculados à classificação do solo, granulometria, limites de consistência, equipamentos e medições de compactação de laboratório.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o cálculo dos fatores de conversão de volumes, primeiramente é necessário determinar as densidades no corte, solta e compactada para se construir um banco de dados. Para isso, inicialmente serão selecionados os locais para coleta das amostras de solo e realização dos ensaios de campo a partir do levantamento de algumas obras rodoviárias que estão em andamento no estado do Ceará no período de produção desta dissertação de mestrado.

Para determinação da densidade no corte, serão realizados ensaios de campo, como o método do frasco de areia (DNER-ME 092/94). Para o cálculo da densidade solta serão realizados ensaios de massa unitária (DNIT 437/2022-ME). Por fim, para determinação da densidade compactada, serão realizados ensaios de compactação (DNER-ME 162/94). Com as densidades determinadas, parte-se para o cálculo dos fatores de conversão de volumes e a elaboração dos mapas com a distribuição dos fatores de empolamento e homogeneização. Para essa etapa será utilizado um software de geoprocessamento, como por exemplo o QGIS, que conta com uma ferramenta de interpolação que estima a distribuição de um fenômeno em uma área de interesse a partir de amostras pontuais.

Para a realização das análises de correlação entre a expansão e retração com as demais propriedades geotécnicas, os solos estudados serão agrupados por tipo de material segundo a classificação da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Após isso, serão utilizadas ferramentas estatísticas de planilhas eletrônicas para procurar por essas correlações, sendo algumas dessas já indicadas na literatura.

5. RESULTADOS E IMPACTOS ESPERADOS

Os resultados obtidos até o momento da elaboração deste relatório concentram-se em duas partes. A primeira parte refere-se à criação de mapas com a distribuição dos fatores de homogeneização e empolamento. A segunda parte está relacionada às análises de correlação obtidas (Figura 1). Vale ressaltar, que esses resultados se referem a uma pequena área investigada que será ampliada em função de novos dados geotécnicos adquiridos. Em vista do ineditismo do trabalho no âmbito regional, espera-se que os resultados e produtos obtidos neste trabalho auxiliem em perícias de obras rodoviárias e ampliem o acervo acerca do tema.

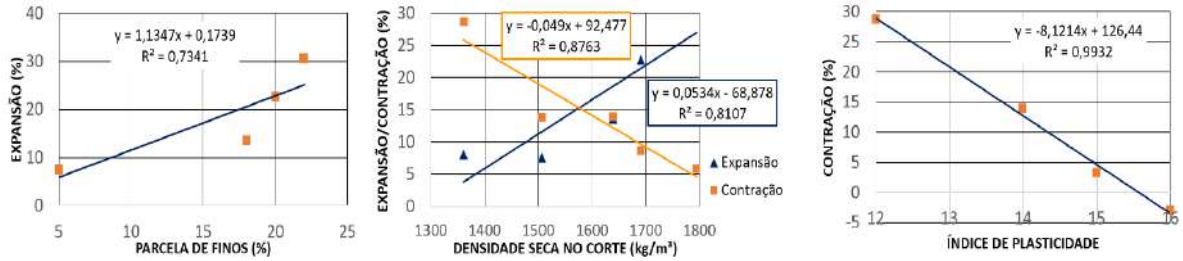


Figura 1: Análises de correlação entre a expansão e contração com outras propriedades

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento a presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Crooks, A. R. (2013) *Application of Shrinkage and Swelling Factors on State Highway Construction*. Dissertação (Mestrado). Auburn University, Auburn. Disponível em: http://hdl.handle.net/10415/3532 (acesso em 14/09/2025).

DNER (1994) Norma DNER-ME 092/1994: Solo – determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego do frasco de areia – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNER (1994) Norma DNER-ME 162/1994: Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DNIT (2022) Norma DNIT 437/2022 – ME: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios de agregados em estado solto e compactado – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Jin, K. N.; G. C. Cho; J. M. Lee; H. H. Ryu e S. W. Park (2011) Estimating the Soil Volume Conversion Factor of Weathered Ground with Consideration of Field Situations. *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*. p. 145-155. Disponível em: https://koreascience.kr/article/JAKO201118559655134.pdf (acesso em 14/09/2025).

Rocha, R.; J. M. C. Barros e R. Vieira (2012) Contribuição ao Estudo do Empolamento dos Solos. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Porto de Galinhas. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276353665_Contribuicao_ao_Estudo_do_Empolamento_dos_Solos (acesso em: 14/09/2025).

Shamo, B. T. (2013) *Spatial Statistical and Multivariate Regression Approach To Earthwork Shrinkage-Factor Calculation*. Dissertação (Mestrado). North Dakota State University, Fargo. Disponível em: https://hdl.handle.net/10365/26924 (acesso em 14/09/2025).

Vieira, I. S. (2022) *Proposição de fatores de conversão de volumes em terraplenagem para a Região Metropolitana de Fortaleza*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/75774 (acesso em 14/09/2025).

White, D.; P. Vennapusa e J. Zhang (2010) *Earthwork volumetric calculations and laboratory characterization of additional CFED Soils* – CFED Phase IV. Iowa State University, Ames. Disponível em: https://intrans.iastate.edu/research/completed/earthwork-volumetric-calculations-and-characterization-of-additional-cfed-soils-cfed-phase-iv/ (acesso em 14/09/2025).

Yousif, H. H.; T. H. Karim e I. B. Mohammad (2020) Swell and Shrinkage Percentages for Various Soil Types and their Prediction from Intrinsic Soil Properties. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. p. 123-137. DOI: 10.21271/ZJPAS.32.6.14.

Igor de Sousa Vieira (igor.vieira@det.ufc.br)

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. da Universidade, 2853 - Benfica, Fortaleza, Ceará, Brasil.

Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. da Universidade, 2853, Benfica, Fortaleza, Ceará, Brasil.

INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA DEFORMABILIDADE DE MISTURAS SOLO-ARRC PARA UTILIZAÇÃO COMO CAMADA DE SUB-BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Larissa Xavier de Oliveira, Adriana Goulart dos Santos
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina

RESUMO
Os resíduos gerados pelo setor da construção civil constituem uma alternativa sustentável para a estabilização de solos empregados na infraestrutura viária. No entanto, por se tratar de um material heterogêneo, o teor de umidade pode variar, exigindo controle adequado da compactação em campo para manter o teor ótimo, a fim de não comprometer seu desempenho mecânico. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da sucção no módulo de resiliência e deformação permanente de misturas de solo e areia reciclada de resíduos de construção (ARRC). Serão investigadas três misturas: uma mistura de controle composta apenas pelo solo puro e duas misturas com proporções de solo e ARRC de 80/20 e 70/30, respectivamente. A mistura que apresentar melhor desempenho mecânico será remoldada considerando teores de +2% e -2% da umidade ótima e submetida a novos ensaios a fim de relacionar os efeitos da variação de umidade à sua deformabilidade.

1. PROPOSTA DA PESQUISA

A proposta de reutilizar a areia reciclada de construção (ARRC) incorporando-a em misturas de solo-agregado contempla a necessidade da busca por opções economicamente viáveis para execução da estrutura de pavimentos e, também, reduzir significativamente os impactos ambientais causados pelo descarte ou armazenamento inadequado dos resíduos de construção e demolição. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da sucção no módulo de resiliência e deformação permanente de misturas de solo e ARRC. A partir dos dados experimentais obtidos, pretende-se analisar, a longo prazo, os efeitos da sucção no afundamento de trilha de roda do material como camada de sub-base de pavimentos flexíveis por meio de simulações utilizando o método de dimensionamento mecanístico-empírico através do *software* MeDiNa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Deformação Permanente

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas destinada a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima (Bernucci *et. al.*, 2022). De acordo com Lima *et. al.* (2017), um dos defeitos resultantes da passagem de veículos é o afundamento de trilha de roda, que consiste em um tipo de defeito estrutural que pode ser derivado da contribuição acumulativa da deformação permanente de uma ou mais camadas do pavimento.

A deformação permanente corresponde a parcela de deformação total que não retorna à sua posição original, sendo esses deslocamentos cumulativos e não recuperáveis ao longo da vida do pavimento Lima *et. al.* (2017). Os ensaios de laboratório que visam simular a passagem das rodas dos veículos são realizados com a aplicação de cargas cíclicas nos corpos de prova e geram parâmetros úteis para selecionar os materiais e dimensionar os pavimentos (Lima *et. al.*, 2021).

Ao longo da aplicação de cargas, as deformações plásticas tendem a se acomodar, o que é chamado de *Shakedown.* A condição de acomodamento das deformações plásticas está associada ao surgimento de um campo auto equilibrado de tensões residuais que surge em materiais submetidos à ação de cargas repetidas e que interage com o carregamento aplicado. Tais tensões tendem a aumentar ao longo do tempo, diminuindo o efeito da carga aplicada em cada ciclo de carregamento, até que a tensão atuante no material não atinja a condição de escoamento plástico e o material apresente apenas deformações elásticas (Guimarães, 2009).

2.2. Módulo de Resiliência

O termo resiliência se refere a energia armazenada em um corpo quando ele é deformado elasticamente, sendo restituída ao corpo quando cessam as tensões causadoras das deformações elásticas (Medina e Motta, 2015). O módulo de resiliência é definido matematicamente como o quociente entre a tensão desvio e a deformação resiliente correspondente à tensão aplicada.

O módulo de resiliência pode ser obtido por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas, que visa reproduzir em laboratório as condições de carregamento das cargas de tráfego na estrutura do pavimento em campo. O comportamento de materiais granulares e finos são distintos, sendo possível caracterizar diversos materiais

utilizados nos pavimentos e submetidos à variadas condições (Pascoal, 2020).
Segundo Norback (2018), o módulo de resiliência dos solos depende de sua constituição mineralógica, textura, plasticidade da fração fina e de fatores como umidade, peso específico e estado de tensões, além das características do ensaio – frequência, tempo de carregamento e forma de onda – sendo realizado sempre em solos não saturados e em condições de drenagem livre. O tempo de atuação da carga e frequência do carregamento são estabelecidos em função da velocidade do veículo e das condições de tráfego, respectivamente (Pascoal, 2020).

2.3. Sucção

A sucção consiste na pressão máxima que um solo pode exercer para absorver água (Marinho, 1997). Tal pressão consiste em uma força atrativa responsável por gerar uma parcela de resistência adicional ao solo e, por isso, espera-se que os efeitos da sucção proporcionem melhor comportamento dos materiais granulares frente às solicitações impostas pelo tráfego.
Santos *et. al.* (2024) avaliaram a influência da sucção mátrica nas deformações permanentes de três solos tropicais utilizados como camada de sub-base em obras de pavimentação no sul do Brasil a partir do umedecimento de amostras durante e após a compactação. A partir dos resultados encontrados, observou-se que, como esperado, o aumento da umidade tende a aprofundar os efeitos da deformação permanente. Além disso, os efeitos da elevação do teor de umidade durante a compactação se mostraram mais severos do que os efeitos de umedecimento após a compactação no que se refere ao afundamento de trilha de roda.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados consistem em uma amostra de solo residual da região de Joinville/SC e uma amostra de ARRC. Ambos os materiais foram coletados em uma jazida que fornece insumos para obras da região, sendo a ARRC oriunda de resíduos produzidos por empresas locais e posteriormente beneficiada na jazida. A determinação das proporções das misturas solo-ARRC foi realizada com base nas experiências relatadas por Moreira *et. al.* (2023) e Sosahab *et. al.* (2023) e correspondem às proporções de solo e ARRC iguais a 0/100, 80/20 e 70/30, respectivamente.
Após a caracterização dos materiais, serão realizados ensaios triaxiais dinâmicos de módulo de resiliência (DNIT 134/2018) e de deformação permanente (DNIT 179/2018) para as misturas. Com base nos resultados de tais ensaios, será selecionada a mistura solo-ARRC que obtiver melhor desempenho para que novos corpos de prova dessa mistura sejam moldados considerando teores de umidade 2% acima e 2% abaixo da umidade ótima de compactação para fins de comparação e avaliação da influência da sucção em seu comportamento. Para isso, será aferida a sucção mátrica e elaborada a curva característica das misturas em que se variou a umidade utilizando o método do papel-filtro, em contato direto com o centro do corpo de prova. A Figura 1 apresenta um fluxograma das etapas realizadas em laboratório.
Por fim, os parâmetros geotécnicos relativos à deformabilidade da mistura que apresentar menor deformação permanente serão adicionados à biblioteca do *software* MeDiNa, bem como seus parâmetros considerando os desvios no teor de umidade ótima. As simulações de pavimentos serão comparadas entre si para fins de análise dos efeitos da sucção no afundamento de trilha de roda na camada de sub-base dos pavimentos à longo prazo.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

O solo coletado consiste em um silte arenoso marrom, mal graduado e de uniformidade média. Com relação à sua plasticidade, o material pode ser classificado como fracamente plástico. Os dados relativos à caracterização geotécnica do solo são apresentados segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros geotécnicos do solo

Análise tátil-visual	Silte arenoso marrom
Massa específica (g/cm^3)	2,74
Limite de liquidez (%)	40,3
Limite de plasticidade (%)	36,9
Índice de plasticidade (%)	3,4
Umidade ótima de compactação (%)	16,82
Massa específica seca máxima (g/cm^3)	1,79
Classificação MCT	NA – misturas de areias e siltes não lateríticos
Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	ML – Silte de baixa compressibilidade
Transportation Research Board (TRB)	A-4

Por se tratar de um solo não laterítico, espera-se que seu comportamento resiliente seja inadequado para utilização como sub-base de pavimentos, podendo ser pautado por excessivas deformações permanentes, o que torna necessária a estabilização física a fim de melhorar suas características de deformabilidade. Conforme Roza *et. al.* (2018) e Dornelles *et. al.* (2018), solos pertencentes a esse grupo apresentam desempenho resiliente inferior ao de solos de natureza laterítica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernucci; Liedi Bariani; Motta. Laura Maria Goretti da. Ceratti, Jorge Augusto Pereira. Soares, Jorge Barbosa (2022). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros* (2ª ed.). Rio de Janeiro: ABEDA.

DNIT (2018) Norma DNIT 134/2018 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNIT (2018) Norma DNIT 179/2018 – IE: Pavimentação – Solos – Determinação de deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

Dornelles, Lucas Eduardo et al. Análise comparativa entre a classificação MCT e o módulo de resiliência de solos da região de Santa Maria/RS. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 32., 2018, Gramado. Anais [...] . Gramado: Anpet, 2018. p. 2076-2087.

Guimarães, Antônio Carlos Rodrigues. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Lima, Caroline Dias Amancio de; Motta, Laura Maria Goretti da; Aragão, Francisco Thiago Sacramento. Ensaios de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas. *Matéria* (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 26, n. 3. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s1517-707620210003.13044.

Lima, Caroline Dias Amancio de; Motta, Laura Maria Goretti da; Guimarães, Antônio Carlos Rodrigues. Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaisse para uso em base e sub-base de pavimentos. *Transportes*, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 41, 31 ago. 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1262.

Marinho, Fernando Antônio Medeiros. Shrinkage Behaviour of some plastic soils. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Imperial College of Science, Technology and medicine – University of London.

Medina; Jacques de. Motta; Laura Maria Goretti da (2015). *Mecânica dos Pavimentos* (3ª ed). Rio de Janeiro: Interciência.

Moreira, Eclesielter B. *et. al.* (2023). Transforming Construction and Demolition Waste into Soft-Soil Treatment for Paving Design. *Geotechnical And Geological Engineering*, v. 41, n. 7, p. 4321-4334. DOI: 10.1007/s10706-023-02503-8.

Norback, Carine. Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Pascoal, Paula Taiane. Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

Roza, Ana Elza Dalla et al. Avaliação da correlação entre o módulo de resiliência e a classificação MCT de solos finos argilosos. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 32., 2018, Gramado. Anais [...] . Gramado: Anpet, 2018. p. 2064-2075

Santos, Thaís Aquino dos; Pinheiro, Rinaldo José Barbosa; Specht, Luciano Pivoto. Effects of moisture content and soil suction on the permanent deformation of tropical subgrade soils: experimental investigations and modelling. *Road Materials And Pavement Design*, [S.L.], p. 1-24, 31 jan. 2024. Informa UK Limited. DOI: 10.1080/14680629.2024.2310823.

Sosahab, Javad Shamsi *et. al* (2021). Resilient response and strength of highly expansive clay subgrade stabilized with recycled concrete aggregate and granulated blast furnace slag. *Construction And Building Materials*, v. 408. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133816.

Larissa Xavier de Oliveira (larissa.oliveira0946@edu.udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

Adriana Goulart dos Santos (adriana.santos@udesc.br)
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

MODELAGEM DE RISCO GEOLÓGICO BASEADA NA MÁXIMA ENTROPIA (MAXENT) APLICADA À MALHA RODOVIÁRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Daniel Silveira Balzani Guimarães, Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega
Universidade federal de Minas Gerais

RESUMO
A modelagem do risco geológico na rede viária de Minas Gerais é fundamental para guiar as decisões do Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) sobre a distribuição dos recursos institucionais. Com base nos dados do projeto "Pontos Críticos Rodoviários", é possível afirmar que é viável realizar uma modelagem dos riscos geológicos nas proximidades das rodovias. O intuito deste trabalho é criar um mapa de risco geológico para o transporte rodoviário, usando o modelo de Máxima Entropia (MaxEnt) para a espacialização dos riscos. O MaxEnt é um modelo preditivo baseado em métodos de aprendizado de máquina que calcula a probabilidade de que um fenômeno ocorra. A metodologia emprega plataformas de Sistema de Informação Geográfica (GIS) para conduzir o geoprocessamento inicial e utiliza o modelo MaxEnt para interpretar os dados obtidos. A estabilidade dos taludes é uma prioridade, tanto que mais da metade das informações sobre riscos que o DER-MG obtém se referem a taludes. A finalidade é criar um mapa de risco que auxilie na padronização da avaliação e na detecção das áreas mais propensas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A investigação aqui apresentada se baseia, em grande parte, na modelagem de sistemas ambientais para apontar áreas que possam estar em risco geológico por encostas em rodovias. Dessa forma, a pesquisa contribui para a discussão sobre a melhor maneira de alocar os recursos financeiros que são destinados a projetos de contenção. Hoje, a gestão dos recursos que vão para a construção de rodovias não leva em consideração uma avaliação dos elementos que impactam a estabilidade dos taludes nas redondezas.

Um dos pontos positivos do campo de pesquisa é que existe uma literatura abrangente sobre os aspectos mais críticos do estado, além do detalhado mapeamento geológico em uma escala de 1:100.000. O estado de Minas Gerais possui o identificador “Pontos Críticos Rodoviários”, que registra ocorrências de interrupção ou ameaça à trafegabilidade das estradas mineiras. Mais da metade dessas situações, ou seja, 53% (313 dos 581 casos registrados entre 10 de janeiro de 2024 e 12 de março de 2025), estão ligadas à estabilidade dos taludes. Esses dados reforçam a necessidade premente de que sejam conduzidas investigações sobre a estabilidade de taludes nas estradas e sobre a alocação adequada de recursos para essas avaliações, as quais afetam de maneira significativa o tráfego rodoviário.



Figura 1: - Mapa dos Pontos Críticos Rodoviários relacionados à matéria de Estabilidade de Taludes

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das maiores ameaças à infraestrutura rodoviária são os desastres geológicos, que causam interrupções no tráfego, perdas de vidas, danos materiais, consequências ambientais e sérios efeitos econômicos. Frequentemente, esses eventos ultrapassam a capacidade de resposta das comunidades impactadas, demandando intervenções externas e políticas públicas de mitigação (UN-ISDR, 2004).

A análise de suscetibilidade geotécnica geralmente se baseia em métodos empíricos que examinam a resistência e a estabilidade do maciço rochoso. Dentre os sistemas de classificação mais relevantes, destaca-se o RMR (Rock Mass Rating), introduzido por Bieniawski em 1973. Esse sistema leva em conta parâmetros como resistência da rocha, RQD, espaçamento e estado das descontinuidades, além das condições de água subterrânea. Outro sistema importante é o Q-System, criado em 1974 por Barton, Lien e Lunde, que é específico para o dimensionamento de túneis. Ademais, o critério de resistência de Mohr-Coulomb se destaca, estabelecendo a resistência ao cisalhamento como uma função linear da tensão normal, com a coesão e o ângulo de atrito interno como parâmetros principais.

Este estudo visa expandir essa metodologia ao sugerir a aplicação do modelo de máxima entropia (MaxEnt) em pesquisas de suscetibilidade geotécnica. Apesar de já ter sido utilizado em diversos campos da modelagem espacial, como na gestão de alocação logística na Região Metropolitana de Belo Horizonte (Oliveira et al., 2021), o MaxEnt ainda não tinha sido investigado na geotecnia. Sua utilização possibilita a criação de modelos probabilísticos fundamentados na distribuição de variáveis ambientais, ampliando a habilidade de representar espacialmente a suscetibilidade e complementando os

métodos convencionais.

3. MATERIAS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho é modelar o risco geológico em seções da malha viária mineira com base em uma abordagem geocientífica e de machine learning, dispensando a necessidade de trabalho de campo.

1. A coleta e a organização dos dados

Todas as informações serão coletadas de fontes digitais, priorizando a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), que oferece os seguintes dados: [

- Litologia: Informações sobre as formações rochosas e os solos que constituem o maciço rochoso do estado.
- Modelo Digital de Elevação (MDE) e Inclinação: Dados sobre a elevação e a inclinação do terreno, que são essenciais para a avaliação da estabilidade.
- Dados de chuva, que afetam diretamente a ocorrência de fenômenos geológicos, como deslizamentos.
- Dados que podem ser utilizados para indicar a densidade de drenagem ou outras características lineares que são relevantes para a modelagem do risco.

A estabilidade dos taludes não será avaliada por meio de ensaios de campo, mas sim pela análise e integração das bases de dados existentes.

Elementos de risco: Para a modelagem, os indicadores de entrada serão elaborados a partir da litologia, MDE, inclinação, chuva e densidade de linha. As características do solo, como coesão e ângulo de atrito interno, serão empregadas como indicadores para criar esses rasters, mostrando como o solo contribui para a estabilidade de taludes.

Classificações geomecânicas: Para as avaliações, serão utilizadas as classificações RMR, RQD e Q, que medem a qualidade dos maciços rochosos, e estas serão correlacionadas aos dados existentes para a modelagem do risco geológico.

Modelagem: Será aplicado o modelo de Máxima Entropia (MaxEnt) para associar os indicadores à probabilidade de ocorrência de riscos geológicos. O resultado será um mapa de risco geológico que não requererá novas coletas de campo., serão descritos a seguir.

Tabela 1: Dados iniciais do projeto

Dados	Parâmetros	Formatos
DEM (Modelo Digital de Elevação)	Inclinação e altimetria	Raster
Litologia do estado de Minas Gerais	Litologia	Raster
Frequência das descontinuidades geológicas	Descontinuidades	Raster
Pontos críticos rodoviários	Deslizamentos	Raster
Precipitação acumulada	Quant. chuva	Raster

A pesquisa utiliza o MAXENT, um modelo preditivo de localização potencial de um fenômeno por máxima entropia baseado em ausência-presença por aprendizagem de máquina, desenvolvido em estudos de ecologia para distribuição potencial de espécies (Phillips et al, 2006**)**. O modelo calcula a probabilidade de ocorrência do fenômeno no espaço.

$$H(X) = -\sum \hat{\pi}_{x \in X} * ln\hat{\pi}\,(x) \quad (1)$$

Onde

H = Entropia; π = Função da distribuição da probabilidade final; x = Pixel unitário do modelo; X = Área de estudo.

A equação 2 é uma simplificação das probabilidades do modelo, aplicadas com o fator P(x|y=1) e P(y=1) onde y o fator inteiro e o x o fator unitário do modelo. Já a equação 3 caracteriza a Função da Distribuição da probabilidade de acordo com a distribuição de Gibbs.

$$P(y = 1|x) = \frac{P(x|y=1)}{P(x|y = 1)+P(x|y=0)} \quad (2)$$

$$q_y(x) = \frac{e^{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j * f_j(x)}}{Z_\lambda} \quad (3)$$

Onde

y responde a variabilidade do evento; λ fator vetorial; $f_j(x)$ vetor com as características locais sobre o fator j,

Z constante obtido pela normalização de $\sum q_y(x) = 1$; x pixel unitário.
O modelo entrega uma superfície (raster) contínua cobrindo a área de estudo com variações do potencial dos fenômenos que desencadeiam o risco geológico. Embora originada na ecologia, a modelagem MAXENT foi utilizada na engenharia de transportes por Oliveira et al. (2021) para instalação de centros de distribuição a logística urbana. No presente estudo, contudo, a superfície contínua com as probabilidades do risco geológico é sobreposta pelos vetores referentes às rodovias, já segmentadas em trechos de 1 Km de distância.

4. RESULTADOS PREVISTOS

Os resultados previstos se fazem por geração de mapa de risco geológico para as rodovias de Minas Gerais, bem como tente a trazer uma padronização dos fatores que são culminantes para este tema. A representação cartográfica do risco geológico por trecho obedece a simbologia como escala de cor ou de intensidade.

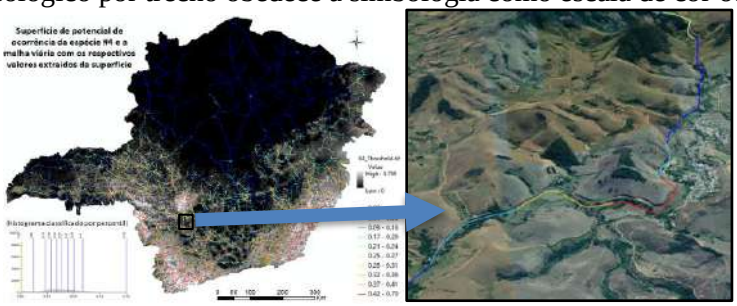


Figura 2: - Ilustração do risco de colisão por segmento de rodovia compilado a partir da modelagem de máxima entropia para sinuosidade das vias (Nóbrega, 2021). Metodologia base relativamente similar a proposta para o mapeamento do risco geológico por segmento.

5. CONCLUSÕES

A partir do modelamento dos fatores geotécnicos o esperado que as áreas de orógenos (geologicamente instáveis) sejam locais com maiores números de relatos e áreas como crátons (geologicamente estáveis) sejam partes fundamentais do registro dos Pontos Críticos Rodoviários.

Agradecimentos
Os agradecimentos vão primeiramente ao órgão que fomenta este trabalho o CNPq, bem como ao DER-MG que por outro lado se prontificou em enviar os dados de pontos críticos rodoviários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barton, Nicholas, Reidar Lien, and J. J. R. M. Lunde. "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support." Rock mechanics 6.4 (1974): 189-236.

Bieniawski, Zdzislaw Tadeusz. "Engineering classification of jointed rock masses." Civil Engineering= Siviele Ingenieurswese 1973.12 (1973): 335-343.Coulomb, C. A. de. Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires présentés à l'Académie des Sciences, [s. l.], v. 7, p. 343–382, 1773.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 31, 181–216.

Nobrega, R.A.A. Modelagem geográfica explícita para mapear as áreas críticas de atropelamento de fauna e o grau de potencialidade de ocorrência de atropelamentos por trechos nas rodovias mineiras. Relatório n. 2 do projeto de pesquisa Modelagem de áreas Críticas de Atropelamento de Fauna Doméstica e Silvestre nas Rodovias do Estado de Minas Gerais. Environbit. Lavras, 2021.

Mohr, O. Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials?. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, [s. l.], v. 44, n. 45, p. 1524–1530, 1900.

Oliveira, I. K. D., Oliveira, L. K. D., & Nóbrega, R. A. D. A. (2021). Applying the maximum entropy model to urban freight transportation planning: An exploratory analysis of warehouse location in the Belo Horizonte Metropolitan Region. Transportation Research Record, 2675(12), 65-79.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological modelling, 190(3-4), 231-259.

UN-ISDR, 2004 (Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres, 2004).

Infraestrutura aquaviária

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE DE PORTOS ORGANIZADOS BRASILEIROS A PARTIR DE INDICADORES OPERACIONAIS: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA

Pedro Luiz Neves Scucuglia, Otavio Henrique da Silva
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO
Nos últimos anos, o sistema portuário brasileiro tem registrado um crescimento expressivo no volume de cargas movimentadas, impulsionado, dentre outros, pelo aumento das exportações de commodities. Nesse contexto, considerando o ambiente econômico dinâmico e competitivo no qual os portos estão inseridos, torna-se indispensável medir e monitorar continuamente os principais indicadores operacionais. O acompanhamento sistemático dessas métricas possibilita identificar oportunidades de melhoria, embasar decisões estratégicas e elevar a eficiência das operações. Este estudo realiza uma análise comparativa de indicadores ao longo de 2024, empregando análises estatísticas para avaliar o desempenho relativo entre os cinco maiores portos organizados do país, considerando diferentes grupos de cargas de interesse. Os resultados revelam diferenças significativas entre as médias observadas, ressaltando a necessidade de estratégias de gestão personalizadas e investimentos direcionados a aprimorar a infraestrutura e os processos operacionais.

1. INTRODUÇÃO

Os portos brasileiros vêm registrando altas taxas de crescimento, superando a casa dos 3% ao ano, muito acima do PIB (ANTAQ, 2025). Essas instalações são de vital importância para a garantia da competitividade do comércio exterior brasileiro, sendo que mais de 90% da corrente de comércio do país depende da via marítima (MDIC, 2025). Os portos são fundamentais, ainda, para permitir a viabilização de diversas cadeias logísticas de abastecimento interno, através das navegações interior e de cabotagem: faz-se relevante acompanhar e monitorar sistematicamente os indicadores operacionais dessas instalações, sob a perspectiva de que portos eficientes traduzem-se em menores custos de infraestrutura e maior competitividade das mercadorias.

A literatura destaca a importância do acompanhamento adequado do desempenho portuário por meio de indicadores relacionados às operações, finanças e segurança. Conforme UNCTAD (2022), a eficiência portuária influencia diretamente os custos do comércio internacional, a previsibilidade das cadeias de suprimentos e a competitividade das economias nacionais. Ademais, aquele órgão internacional aponta para uma crescente valorização de indicadores ambientais, que complementam as métricas operacionais tradicionais, tais como a mensuração das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) por t. movimentada, a utilização de fontes renováveis de energia e a redução do tempo de espera dos navios, com vistas à diminuição do consumo de combustível fóssil, refletindo a pressão global por uma operação portuária mais sustentável e resiliente, alinhada aos compromissos globais de descarbonização do transporte marítimo.

Assim, a adoção de indicadores padronizados de desempenho revela-se fundamental para viabilizar comparações em nível regional e global, fomentar a transparência institucional e subsidiar decisões estratégicas sobre investimentos em infraestrutura e tecnologia. Nesse sentido, a *Port Performance Scorecard* tem promovido a consolidação de métricas harmonizadas aplicáveis a portos de todo o mundo. O relatório de 2023 destaca que, apesar dos progressos observados em automação e digitalização de processos, os portos continuam enfrentando obstáculos significativos relacionados a filas, limitações de capacidade de infraestrutura e impactos das mudanças climáticas. Esses desafios reiteram a necessidade de instrumentos analíticos robustos que possibilitem uma gestão portuária mais proativa e orientada por evidências (UNCTAD, 2023).

A mensuração do desempenho portuário (*Port Performance Measurement* – PPM) tem se consolidado como uma ferramenta estratégica tanto para a gestão das relações com stakeholders quanto para a busca de uma posição competitiva sustentável. Ressalta-se que, apesar do avanço da literatura sobre o tema nas últimas décadas, ainda persistem lacunas relevantes, notadamente no que diz respeito à abordagem fragmentada de dimensões específicas ou setores isolados dos portos, o que impede uma compreensão abrangente dos desafios contemporâneos enfrentados pelas autoridades portuárias. Diante disso, destaca-se a necessidade de desenvolver abordagens sistemáticas e integradas que incorporem a multiplicidade de interesses dos stakeholders envolvidos (Ha *et al*., 2017).

Nesse contexto, este estudo objetiva analisar, a partir de um conjunto de indicadores de interesse, o desempenho relativo entre portos organizados brasileiros, levando em consideração os principais grupos de

cargas movimentadas nessas instalações: granéis sólidos de exportação; granéis sólidos de importação; granéis líquidos combustíveis e cargas conteinerizadas. Os resultados obtidos a partir do confronto entre os indicadores apresentados por cada instalação portuária possibilita, dentre outras funções, identificar oportunidades de melhoria, de tal sorte a embasar decisões estratégicas e direcionar investimentos prioritários para elevar a eficiência das operações.

2. MÉTODO

Os dados utilizados neste estudo foram extraídos da base pública da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2025), denominada *Estatístico do Transporte Aquaviário*. Essa fonte secundária foi escolhida por sua abrangência, confiabilidade e possibilidade de customização, atualizada regularmente e disponível desde 2010.

Inicialmente, foram definidas as cargas de interesse para fins do presente estudo, que seguiram o critério da relevância em termos de volume operado por portos públicos no país durante o ano de 2024, sendo escolhidas as oito cargas típicas mais movimentadas, em toneladas brutas. Avaliadas essas cargas, optou-se pela exclusão do minério de ferro, pelo fato de sua movimentação ser fortemente concentrada num único porto, o que poderia invalidar análises estatísticas comparativas. Após a exclusão do minério de ferro, optou-se por incluir o etanol no grupo de combustíveis, ao lado de derivados de petróleo, pela sinergia entre essas duas cargas em termos de características operacionais. Essas cargas foram agrupadas sob quatro categorias (Tabela 1).

Tabela 1: Categorias de cargas estudadas

Grupo	Denominação	Carga (s) típica (s)
1	Granel sólido de exportação (origem vegetal)	Soja. Milho. Açúcar. Farelo de soja
2	Granel sólido de importação	Fertilizantes
3	Carga geral conteinerizada	Contêineres
4	Granel líquido combustível	Derivados de petróleo; Etanol combustível

Na sequência, foram destacados cinco portos organizados para fins de comparação de performance operacional relativa a cada grupo de cargas. Para tanto, toram eleitos os portos que apresentaram a maior movimentação física em cada grupo de carga, durante o ano de 2024 (por esses critérios, Santos e Paranaguá apareceram em todos os cenários). Por fim, foram eleitos os indicadores operacionais de interesse. Trata-se de cinco indicadores operacionais comumente utilizados pela ANTAQ: consignação média, prancha média operacional, taxa de ocupação dos berços, tempo médio de espera para atracação e tempo total de estadia. Vale registrar que os indicadores utilizados foram obtidos diretamente do Estatístico Aquaviário, sem qualquer tratamento posterior. A seguir apresenta-se a definição de cada um deles, conforme ANTAQ (2025):

a) *Consignação média* (*CM*): medido em unidades (carregadas e/ou descarregadas) por navio quando se trata da movimentação de contêineres e em toneladas (carregadas e/ou descarregadas) por navio para os demais grupos de mercadoria. É um indicador do tipo “quanto maior, melhor”;

b) *Prancha média operacional* (*PMO*): mede a produtividade média de uma instalação portuária ou berço em um determinado período, como mês, bimestre ou ano, em relação a um grupo específico de mercadorias. A Prancha Média pode ser calculada considerando-se o tempo de operação dos navios ou o tempo atracado, sendo que para fins desse estudo, optou-se pelo primeiro. É um indicador do tipo “quanto maior, melhor”;

c) *Taxa de ocupação dos berços* (*TOj*): valor obtido pela divisão do tempo total ocupado (*tocj*) de um determinado berço *j* de uma instalação portuária pelo tempo de estudo *t*. Trata-se de um indicador adimensional, que pode ser expresso em porcentagem;

d) *Tempo médio de espera para atracar* (*tEAi*): de um navio *i* é a diferença calculada, em horas, entre a “Data/hora da Atracação” no porto e a “Data/hora da Chegada” na área de fundeio do porto, onde o navio passa a aguardar autorização para prosseguir para a atracação. É obtido pela média aritmética simples entre todos os *tEAi* dos *n* navios que desatracaram no período em estudo *t*. É um indicador do tipo “quanto menor, melhor”; e

e) *Tempo de Estadia* (*tESi*) de um navio *i* é a diferença calculada, em horas, entre a “Data/hora de Desatracação” do porto e a “Data/hora de Chegada” na área de fundeio do porto. É dado pela média

aritmética simples entre todos os *tESi* dos n navios que desatracaram no período em estudo. É um indicador do tipo "quanto menor, melhor".

Para a análise comparativa, considerando que os dados se aproximam de uma distribuição normal, foi aplicado o teste ANOVA de uma via. Isso permitiu explorar diferenças significativas (p<0,05) entre os portos, a partir dos valores médios mensais dos indicadores operacionais mencionados, considerando o período entre janeiro e dezembro de 2024. Nos casos em que o teste apontou para a rejeição da hipótese nula (isto é, evidência estatística de diferenças significativas), realizou-se a aplicação do teste post hoc Tukey para identificar onde residem as diferenças (entre quais pares de portos). A Figura 1 apresenta a sequência de etapas deste estudo.

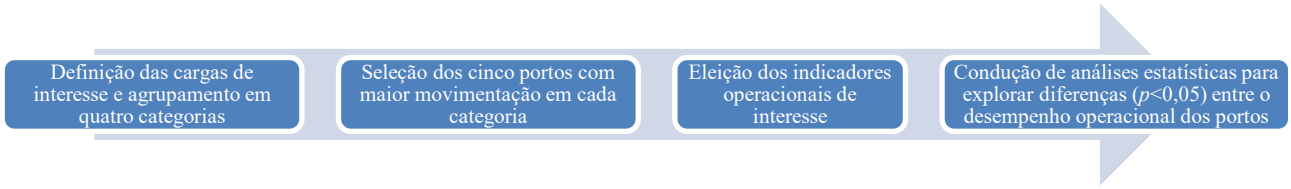


Figura 1: Fluxograma das etapas deste estudo

3. RESULTADOS

Os valores dos indicadores operacionais referentes ao conjunto de portos selecionados, segmentados por grupos de carga, são apresentados na Tabela 2 e correspondem à média dos doze meses do ano de 2024.

Tabela 2: Médias apuradas nos indicadores, por porto e grupo de carga

Grupo	Portos amostrados	Valores médios apurados para os indicadores				
		***CM* (t/navio)**	***PMO* (t/navio ou un/navio)[1]**	***TOj***	***tEAi* (h/navio)**	***tESi* (h/navio)**
1	Santos (SP)	57.245,33	998,001	0,752	199,967	263,018
	Paranaguá (PR)	55.331,91	913,361	0,880	370,422	442,953
	Itaqui (MA)	63.530,97	1.180,896	0,829	189,618	253,194
	São Fco do Sul (SC)	23.596,48	916,299	0,832	125,088	182,640
	Santarém (PA)[2]	-	-	0,772	-	-
2	Paranaguá (PR)	30.112,605	294,634	0,831	392,301	508,343
	Santos (SP)	25.995,436	254,028	0,610	102,814	231,671
	Itaqui (MA)	26.961,853	283,669	0,853	166,755	275,115
	Rio Grande (RS)	12.322,164	247,537	0,717	103,730	165,721
	Santarém (PA)[2]	-	-	0,760	-	-
3	Santos (SP)	1.257,172	64,234	0,593	32,734	59,941
	Paranaguá (PR)	783,162	56,065	0,818	37,184	55,099
	Rio de Janeiro (RJ)	694,224	38,718	0,452	7,790	33,002
	Rio Grande (RS)	702,149	37,282	0,509	23,180	46,047
	Suape (PE)	683,774	38,524	0,673	9,956	32,410
4	Suape (PE)	18.739,55	705,522	0,679	39,987	78,202
	Santos (SP)	20.077,34	399,595	0,758	91,380	155,754
	Itaqui (MA)	19.721,05	441,163	0,831	114,140	171,127
	Paranaguá (PR)	19.258,91	675,090	0,539	109,240	147,462
	Aratu (BA)	26.483,01	674,717	0,724	52,076	103,908

[1] un/navio para o grupo 3 e t/navio para os demais grupos de carga.
[2] O porto de Santarém (PA) não foi considerado na análise comparativa de determinados indicadores operacionais de granéis sólidos de exportação e importação. Apesar de figurar entre os portos que mais movimentaram esses perfis de carga em 2024, apresenta características operacionais distintas das demais instalações da amostra, concentrando um elevado número de operações de transbordo, bem como a utilização intensiva de barcaças, em vez de navios. Diante dessas peculiaridades apresentadas, julgou-se que sua manutenção poderia prejudicar a análise comparativa desejada.

Dando início à análise comparativa, no caso da categoria de carga 1, o teste ANOVA de uma via indicou diferença estatisticamente significativa (p<0,05) entre a amostra de portos para os cinco indicadores considerados. No caso da *CM*, o teste Tukey revelou que a maioria dos portos analisados apresenta diferenças estatisticamente significativas nas médias mensais, salvo Paranaguá e Santos, que apresentam médias semelhantes. Para a *PMO*, constatou-se que as médias do porto de Itaqui são estatisticamente menores do que nos outros portos analisados. Já entre Santos, Paranaguá e São Francisco, não há diferença significativa. Quanto à *TOj*, o teste post hoc demonstrou diferenças significativas entre Itaqui e Santos (Itaqui tem média superior), entre Santos e São Francisco do Sul (Santos tem média inferior) e entre Santarém e São Francisco do Sul (Santarém tem média inferior). Quanto aos tempos médios (*tEAi* e *tESi*), constatou-se que Paranaguá

apresenta tempo médio de estadia significativamente superior aos demais portos. Itaqui, Santos e São Francisco não diferem significativamente entre si, exceto quando comparados diretamente com Paranaguá.

Para a categoria 2, o teste ANOVA de fator único apontou diferenças estatisticamente significativas (p<0,05) para todos os indicadores, exceto para a prancha média operacional (*PMO*). Assim, foram realizados testes Tukey para a consignação média (*CM*), para os tempos médios para atracação (*tEAi*) e de estadia (*tESi*) e para a taxa de ocupação dos berços (*TOj*). No caso da *CM*, foram verificadas diferenças entre praticamente todos os pares de portos. O Porto do Rio Grande apresenta, em geral, as menores médias de consignação, enquanto Paranaguá tem valores significativamente mais altos que os demais. Em relação ao indicador *TOj*, o Porto de Santos apresenta taxa de ocupação média significativamente menor do que Itaqui, Paranaguá e Santarém. Itaqui também apresenta taxa média superior à de Rio Grande. Entre os outros portos, as diferenças não são significativas. Em relação aos tempos médios, Paranaguá apresenta *tEAi* e *tESi* significativamente maiores que Santos e Rio Grande. Itaqui tem valores intermediários e não difere significativamente dos demais portos. As maiores diferenças estão entre Paranaguá e os demais, especialmente Rio Grande.

Em relação ao grupo 3, por meio da ANOVA de uma via, foram identificadas diferenças significativas (p<0,05) entre os portos da amostra em todos os indicadores avaliados. Então, conduziu-se análise post hoc, por meio do teste de comparações múltiplas de Tukey, para identificar onde estão as diferenças. Santos apresenta *CM* significativamente maior que os demais portos. Paranaguá se diferencia de Rio de Janeiro e Suape. Não há diferença significativa entre Rio Grande, Rio de Janeiro e Suape. Para a *PMO*, o porto de Santos apresenta médias significativamente diferentes dos demais (exceto Paranaguá, cuja diferença é menor, mas ainda significativa). Paranaguá também se diferencia de todos os outros portos. Já Rio Grande, Rio de Janeiro e Suape não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si quanto à média de pranchas operadas. No que se refere à *TOj*, verificou-se que Paranaguá tem taxa média de ocupação significativamente maior que todos os demais portos. Rio de Janeiro tem as menores médias, sendo significativamente diferente da maioria dos outros portos. Diferenças como Rio de Janeiro *vs*. Rio Grande não são estatisticamente significativas. A menor diferença significativa detectada foi entre Santos e Suape, embora ainda estatisticamente relevante (p=0,033). Para *tEAi* e *tESi*, foram constatadas diferenças significativas entre Paranaguá e Rio de Janeiro Paranaguá e Suape, Rio de Janeiro e Santos e entre Santos e Suape.

Para a categoria de carga 4, o teste ANOVA de uma via novamente revelou diferenças estatisticamente significativas (p<0,05) para os cinco indicadores operacionais, ensejando a aplicação do teste post hoc. Para a *CM*, o Porto de Aratu apresenta média por navio significativamente superior aos demais portos analisados. Entre Itaqui, Paranaguá, Santos e Suape, não foram verificadas diferenças relevantes. No tocante à *PMO*, Santos apresenta valores significativamente menores que todos os demais portos. Itaqui também apresenta valores significativamente menores que Paranaguá e Suape. Paranaguá e Suape, assim como Aratu e Paranaguá, não diferem significativamente entre si. Aratu e Suape também têm médias próximas, sem diferença significativa. Quanto à *TOj*, as principais diferenças encontradas indicam que Paranaguá apresenta taxa de ocupação significativamente menor que Aratu e Santos, enquanto Suape tem taxa significativamente menor que Itaqui e maior que Paranaguá. Não há diferença estatística relevante entre Aratu, Santos e Itaqui entre si, nem entre Aratu e Suape ou Santos e Suape. Por fim, os tempos médios (*tEAi* e *tESi*) em Itaqui são significativamente maiores que em Suape e Aratu. Aratu apresenta *tEAi* e *tESi* significativamente maiores que Paranaguá e Santos. Suape tem tempos médios significativamente menores que Itaqui, Paranaguá e Santos. Não há diferença estatística relevante entre Itaqui, Paranaguá e Santos entre si, nem entre Aratu e Suape.

Os resultados dos testes relevam diferenças estatisticamente significativas (p<0,05) entre os portos analisados para a maioria dos indicadores operacionais nas quatro categorias de carga. A *CM* se destaca como um dos indicadores com maior variação entre portos, especialmente com desempenho superior do Porto de Santos em diversas categorias, tais como contêineres. Paranaguá, por sua vez, apresenta sistematicamente tempos médios de atracação (*tEAi*) e de estadia (*tESi*) mais elevados, distinguindo-se dos demais em grande parte das comparações. As taxas de ocupação dos berços (*TOj*) também variam substancialmente, com destaque para Santos, que apresenta, em geral, taxas inferiores às observadas em portos como Itaqui, Santarém e Aratu. Já a prancha média operacional (*PMO*) demonstra padrões menos consistentes de diferenciação estatística para os grupos de cargas estudados, embora Santos e Itaqui apresentem, em alguns casos, médias significativamente

menores. Os achados podem apontar a existência de disparidades operacionais relevantes entre os principais portos organizados do país, reforçando a importância da comparação sistemática por indicadores para subsidiar análises de desempenho portuário e orientar estratégias de melhoria contínua.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo permitiu analisar o desempenho operacional dos cinco maiores portos organizados brasileiros a partir de uma abordagem comparativa, considerando quatro grupos de cargas de interesse, tendo por premissa a relevância dessas cargas dentro da matriz de mercadorias movimentadas neste tipo de instalação. A análise considerou, ainda, cinco indicadores operacionais de interesse. A partir do teste ANOVA de uma via, foi detectada a existência de diferenças estatisticamente significativas (p<0,05) entre os portos para a maioria dos cenários. Esses achados podem evidenciar que, embora parta-se do pressuposto de que os portos analisados compartilhem características estruturais e operacionais semelhantes por pertencerem à mesma categoria jurídica (a de portos organizados), seus desempenhos variam de maneira significativa conforme o tipo de carga considerado. Por exemplo, analisando o grupo 3 (carga conteinerizada), constataram-se consignações médias no porto de Santos muito acima dos demais. Essas diferenças podem ser indicativas de que o porto paulista possui condições de infraestrutura mais adequadas ao recebimento de navios maiores (tais como profundidas no canal de acesso e berços). A questão central é se os demais portos estão enfrentando restrições operacionais e, eventualmente, sob risco de perda de atracações por eventual deficiência estrutural.

Tais constatações reforçam a importância de abordagens analíticas segmentadas por perfil de carga, evitando generalizações que podem ocultar gargalos ou boas práticas específicas. Além disso, as diferenças estatísticas podem sugerir a influência de fatores locais, como gestão, infraestrutura instalada, arranjos operacionais e políticas públicas voltadas à eficiência logística. Em termos práticos, os resultados obtidos oferecem subsídios para a formulação de estratégias voltadas à melhoria do desempenho portuário nacional. Ao identificar padrões de eficiência e ineficiência nos diferentes portos e tipos de carga, gestores públicos e operadores privados podem priorizar investimentos, rever procedimentos e buscar referências entre os pares com melhor desempenho. Portanto, que a aplicação de ferramentas estatísticas adequadas, associada a uma classificação criteriosa das cargas, constitui um caminho para o aprimoramento contínuo da gestão portuária no Brasil.

Como limitações desta pesquisa, cita-se o horizonte temporal restrito ao ano de 2024. Idealmente, é esperado que se acompanhe e monitore a evolução dos indicadores operacionais ao longo dos anos, a fim de melhor identificar tendências e padrões que demonstrem com robustez eventuais evidências de saturação e diferenças significativas entre os padrões de desempenho entre os principais portos organizados do país. Além disso, outros parâmetros relevantes, como conectividade modal, eficiência aduaneira, regularidade das linhas de navegação, capacidade de armazenagem e infraestrutura terrestre, também impactam os níveis de serviço logístico e a percepção de desempenho pelos usuários e *stakeholders*, devendo ser considerados para uma avaliação mais abrangente do desempenho portuário. Para estudos futuros, recomenda-se ampliar a série temporal, aplicar métodos estatísticos multivariados e desenvolver painéis comparativos que integrem variáveis operacionais, estruturais e institucionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ (2025) *Estatístico Aquaviário*. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt/ (acesso em 01/07/2025)

Ha, M.-H.; Z. Yang; T. Notteboom; A. K. Y. Ng e M. W. Heo (2017) Revisiting port performance measurement: A hybrid multi-stakeholder framework for the modelling of port performance indicators. *Transport Policy*, v. 60, p. 64–78. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.08.003.

MDIC (2025) *Comex Stat*. Disponível em: https://comexstat.mdic.gov.br/pt/ (acesso em 01/07/2025)

UNCTAD (2022) *Review of Maritime Transport 2022*. Chapter 4: Port Performance and Connectivity. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022ch4_en.pdf (acesso em 01/07/2025)

UNCTAD (2023) *Port Performance Scorecard 2023*. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/dtltlb2023d2_en.pdf (acesso em 01/07/2025)

Pedro Luiz Neves Scucuglia (pedro.scucuglia@gmail.com)
Otavio Henrique da Silva (otavio.silva@unb.br)
Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Transportes
Anexo SG-12, 1º andar, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA EXPANSÃO HIDROVIÁRIA DA BAÍA DA GUANABARA – RJ

Mauro Medeiros de Carvalho Junior, Valeria Xavier da Costa, Thais de Moura Lima, Gustavo Augusto Teixeira de Fatima
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT

RESUMO
Este artigo tem o objetivo de apresentar uma avaliação preliminar das características da Baía de Guanabara, localizada na região metropolitana do Rio de Janeiro, reunindo subsídios técnicos e jurídicos que identificam e justificam a pré-viabilidade para o desenvolvimento e melhoramento do transporte hidroviário neste corpo hídrico. Todas as análises foram realizadas com base em informações de atrativos logísticos da Baía, histórico de transporte do local e estudos preliminares que apontam novas rotas de transporte hidroviário na região. Além disso, foram apresentados elementos técnicos e jurídicos que justificam a atuação da União, em específico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no planejamento, implantação e operação de hidrovias independente da dominialidade do corpo hídrico, considerando que a Baía de Guanabara é um corpo hídrico de domínio estadual, conforme classificação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, dos cerca de 63 mil km de rios, lagos e lagoas potencialmente utilizáveis pelo transporte hidroviário, aproximadamente 42.795 km são considerados vias navegáveis (CNT, 2019), porém apenas 20.125 km são considerados economicamente navegáveis (ANTAQ, 2022). Esse fato demonstra o grande potencial a ser desenvolvido no país nesse modal.

Segundo INPH (2025), as diretrizes para dimensionamento de hidrovias interiores devem contemplar especificidades locais como condições do canal navegável, hidrologia, tipo de embarcação e intensidade do tráfego. Nesse sentido, o objetivo do presente estudo consiste em apresentar uma avaliação preliminar das características da Baía de Guanabara e suas potencialidades de forma a reunir subsídios que identifiquem e justifiquem a pré-viabilidade para o desenvolvimento e melhoramento do transporte hidroviário neste corpo hídrico.

2. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA

O Estado do Rio de Janeiro, com base na Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos n°107 de 22 de maio de 2013, está subdivido em 9 regiões hidrográficas, sendo a Baía de Guanabara denominada Região Hidrográfica V (RH-V), e é composta por 17 municípios e 2 sistemas finalizando uma área de 4.803,28 km², sendo que somente 384 km² pertencentes a própria Baía. A referida RH-V concentra a maior parte da população urbana do estado, contendo cerca de 8.385.148 habitantes distribuídos pelos municípios (IBGE, 2022), em contrapartida, de acordo com o Atlas da RH-V, sua área apresenta um volume significativo de cobertura vegetal, água e outros definido por mais de 90% da área da regia. Além disso, com base no modelo de Koppen, o clima da RH-V é classificado tropical atlântico com temperaturas atingindo picos de 34°C no período de verão até valores negativos na região serrana (CONSORCIO ECOLOGUS-AGRAR, 2005). A rede de monitoramento hidrometeorológica é composta por 37 estações, com precipitações que podem chegar em valores de até 2.500 mm (CBH, 2023).

3. ANÁLISE PRELIMINAR SOBRE A BAÍA DE GUANABARA

A Baía de Guanabara é considerada o sistema estuarino mais populoso do estado, ocupando uma área de 328 km² de espelho d'água e 56 km² de ilhas. Ainda, estima-se que o volume de água médio seja de 1,87x109 m³. Quanto à rede hidrográfica, grande parte das nascentes dos rios vem de áreas de proteção ambiental, porém na porção final dos cursos d'água, passam em regiões urbanizadas e sem o adequado saneamento básico, contribuindo para baixa qualidade da água que deságua na Baía. Partindo dos rios presentes no local, os sedimentos do fundo da Baía de Guanabara são depositados em função dessas correntes e efeitos de maré, tendo como produto areias finas, médias e sedimentos lamosos, além de outros sedimentos que contribuem para redução da profundidade do corpo hídrico.

Por conseguinte, baseado nas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DNH), foi elaborado mapa apresentando a batimetria da baía, demonstrando assim suas profundidas, conforme Figura 1. Com efeito, percebe-se que as zonas de maiores profundidades estão localizadas próximas

ao mar aberto e ao canal de entrada da baía, área com profundidade suficiente para a navegação de embarcações de maior calado.

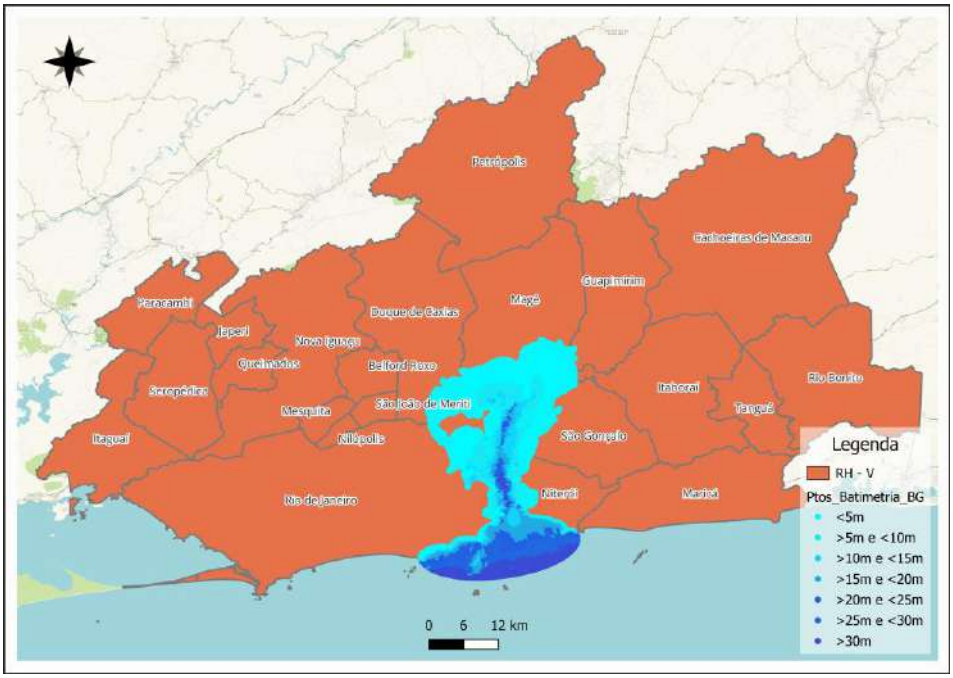


Figura 1: Municípios do entorno e batimetria da Baía da Guanabara
Fonte: Elaboração própria

4. O TRANSPORTE HIDROVIÁRIO NA REGIÃO

Atualmente, o estado do Rio de Janeiro não possui nenhuma hidrovia em operação pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), responsável pela implantação e operação de hidrovias no país (Lei 10.233 de 2001). Em relação ao sistema de transporte hidroviário de passageiros, o consorcio Barcas Rio é responsável pelo deslocamento de cerca de 45 mil passageiros por dia, atendendo 5 estações (BARCAS RIO, 2025). Já no que diz respeito ao transporte de carga na região, este é predominantemente, realizado por via rodoviária e/ou ferroviária.

Na esteira do tema, sabe-se que o modo hidroviário além de mais eficiente, para grandes volumes de carga, e ambientalmente com menor impacto ambiental é o mais seguro, quando comprado com o rodoviário e ferroviário. Com efeito, segundo a Nota Técnica, elaborada pela FIRJAN, em 2025, no estado do Rio de Janeiro são roubados, em média, 9 caminhões por dia, totalizando 3.438 ocorrências ao longo de 2024. Assim, as perdas diretas com este tipo de crime foram na ordem de R$ 325 milhões. Com efeito, dentro das 10 áreas com maior incidência dos roubos registrados, 9 estão na região metropolitana da Baía de Guanabara. Assim, com a implantação e incentivo público para o transporte hidroviário de cargas no estado do Rio de Janeiro, esses números elevados de roubo de carga poderiam ser reduzidos.

Em relação a atividade industrial, a RH-V contempla um total de 18.338 indústrias, sendo a cidade do Rio de Janeiro onde há a maior parte, com 10.637 indústrias, seguido de Duque de Caxias, com 1.376, e São Gonçalo, com 1.128. A maior parte do setor industrial do ERJ, cerca de 64,2%, localiza-se na região metropolitana do estado, sendo os segmentos industriais distribuídos nos setores de indústria de Transformação (alimentos, bebidas, têxtil etc.), Construção, Serviços Industriais de Utilidade Pública e Indústria Extrativa (Atlas da RH-V, 2021). No entanto, majoritariamente, todo o escoamento industrial supracitado é feito pelo transporte rodoviário.

Com efeito, com base no sistema geográfico da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), o sistema de transporte presente na Baía de Guanabara, fora do escopo de passageiros, contempla 38 instalações portuárias, divididos em Terminais de Uso Privado (TUP), Portos Organizados e Instalações Portuária Sob Registro (IPR), que poderiam ser melhor aproveitadas auxiliando no transporte de cargas, em especial com

maior incentivo a cabotagem.

Ainda, sobre a temática, o Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI/RMRJ), elaborado pelo Instituto Rio Metrópole (IRM), propôs a criação de linhas de transporte aquaviário na Baía de Guanabara, com o objetivo de atender às demandas locais e regionais, como ilustrado na Figura 2. Nesse sentido, exemplos de possíveis rotas incluem conexões entre Duque de Caxias, Guapimirim, Magé, Niterói, São Gonçalo, Paquetá e Rio de Janeiro. Atualmente, algumas dessas rotas já são realizadas informalmente, utilizando transportes alternativos para percorrer trechos mais curtos, como no caso das ilhas de Paquetá e Itaoca, em São Gonçalo (PDUI, 2018). Além do plano, em 2017, a Firjan elaborou o estudo de novas rotas hidroviárias, conectando diversos pontos da Baía de Guanabara, assim como a zona oeste do município do Rio e a região litorânea de Niterói, mostrando o grande potencial hidroviário da Baía, tanto para cargas, como para passageiros. Essa proposição, tanto da Firjan quanto do PEDUI, de novas hidrovias está ilustrada na Figura 2.

Outra rota hidroviária que poderia contribuir para o fluxo de cargas e passageiros, na Baía de Guanabara, seria entre os aeroportos do Galeão e o Santos Dumont, projeto este que vem sendo estudado pela Prefeitura do Rio Janeiro, representando uma opção de integração multimodal de transporte para a cidade (Prefeitura do Rio, 2025).

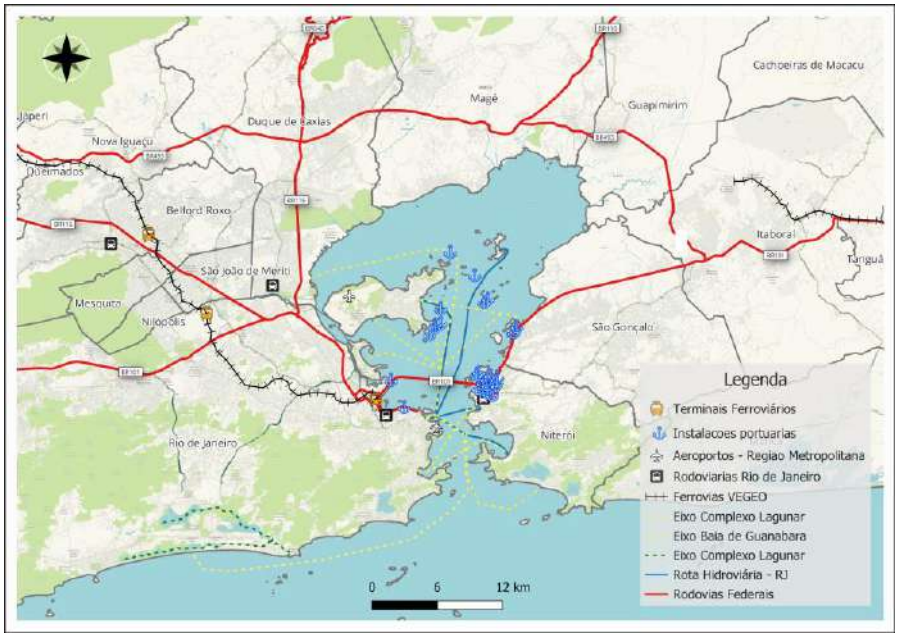


Figura 2: Linhas de transporte da Baía da Guanabara
Fonte: Adaptado FIRJAN (2017) e PEDUI/RMRJ (2025)

5. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA E JURIDICA

No Brasil, há muitos anos, sempre houve interpretações distintas diante da possibilidade de atuação do governo federal no planejamento, implantação e operação de hidrovias em rios de domínio estadual. Nesse sentido, considerando que a Baía de Guanabara é classificada, pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), como um corpo hídrico de domínio estadual, foi elaborado pelo DNIT, em específico pelo Serviço de Engenharia Aquaviária do Rio de Janeiro, a Nota Técnica nº 4/2025/SEA - RJ/COENGE - CAF - RJ/SRE – RJ, de 14/05/2025, a qual trouxe elementos técnicos e jurídicos que fundamentam a tese da possibilidade de atuação da União em qualquer corpo hídrico, que possua potencial hidroviário e que atenda há alguns pré-requisitos, independente da dominialidade deste. A referida tese, exposta na Nota Técnica supracitada, aponta que a dominialidade dos corpos hídricos, quando o tema é navegação, está fundamentalmente associada à implementação dos mecanismos delineados na Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 — notadamente a outorga de uso de uso dos recursos hídricos — e não à determinação se o ente público competente para exploração hidroviária é estadual ou federal.

Ainda sobre o tema, a Nota Técnica aponta que a Baía de Guanabara sofre forte influência de maré e que conforme o Decreto-Lei nº 9.760, de 1946, o referido corpo hídrico pode ser considerando como um bem da

União. Além disso, ao redor da Baía há os terrenos de marinha, que também são bens da União, conforme art.20 da nossa Constituição Federal de 1988, e correspondem a uma faixa tem 33 metros, contados a partir da Linha do Preamar Média (LPM), que considera as marés máximas do ano de 1831, em direção ao continente ou ao interior das ilhas costeiras com sede de município, conforme Decreto-Lei supracitado.

Outro fato que reafirma a necessidade de atuação da União para implantação e expansão do transporte hidroviário na Baía é que esta possui grande potencial para cabotagem e com o Programa de Estímulo ao Transporte por Cabotagem no Brasil (BR do MAR), instituído pela Lei 14.301/2022, poderia haver ampliação dos portos na região, estimulando a concorrência, promovendo a competitividade e expansão da cabotagem em território nacional.

Na esteira do tema, o que se interpreta, baseado na Constituição Federal e na Lei 9.433/1997, é que para implantação de hidrovia há necessidade de atuação direta do poder público federal, pois trata-se de tema relacionado: a segurança nacional; a questões aduaneiras (transporte de cargas internacionais); a influência de áreas estuarinas e da intrusão salina; a cabotagem e; aos terrenos de marinha, o que inviabiliza uma atuação isolada por partes do estados que compõem a República Federativa do Brasil.

Essa interpretação supracitada e que traz um novo paradigma para o transporte hidroviário no país, a qual foi chancelada pela Procuradoria Federal Especializada (PFE), conforme PARECER n. 00010/2025/CONS./RJ/PFE-DNIT/PGF/AGU, de 02/06/2025, afirma que a União pode realizar estudos, implantar e operar hidrovias e instalações portuárias públicas de pequeno porte (IP4) em corpos d'água sob jurisdição estadual, como é o caso da Baía de Guanabara, desde que essas hidrovias integrem o Sistema Rodoviário Nacional (SNV), especificamente o Sistema Rodoviário Federal (SFV) e o Subsistema Aquaviário Federal, conforme detalhado no Anexo IV da Portaria MINFRA nº 1.429, de 21 de outubro de 2022.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, verifica-se que a proposta de expansão hidroviária na Baía da Guanabara revela potencialidades para o desenvolvimento do transporte na região, o qual poderá fomentar outras atividades econômicas e dinamizar as já existentes.

Cabe destacar que, o DNIT, atualmente, é o responsável pelo planejamento, implantação e operação de hidrovias no país, assim como das instalações portuárias públicas de pequeno porte (IP4) e vem conduzindo estudos preliminares na Baía de Guanabara, considerando o posicionamento da Procuradoria Federal Especializada (PFE/DNIT), de que o DNIT pode atuar no planejamento e realização de estudos no curso d'água em questão, ainda que este seja de dominialidade estadual.

Assim, com base no diagnóstico preliminar apresentado, que evidencia o potencial de expansão hidroviária na Baía da Guanabara, entende-se como fundamental e estratégico para o desenvolvimento do modo aquaviário no país, a elaboração do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA), o qual embasará, de forma mais substancial, a tomada de decisão, na esfera federal, para o de desenvolvimento de projetos hidroviários no referido corpo d'água.

No caso da elaboração do EVTEA, em especial, na fase de levantamentos hidrográficos, conforme NORMAM 501/DHN, elaborada pela Marinha do Brasil, será possível obter dados das características hidrosedimentológicas e batimetria atualizada do corpo hídrico. Esses levantamentos permitirão a realização de modelagem hidrodinâmica e das taxas de sedimentação, permitindo a análise de diferentes cenários e contribuindo para uma avaliação mais robusta da viabilidade técnica de novas hidrovias, sem prejuízo da condução dos demais estudos ambientais e socioeconômicos necessários a essa tipologia de empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Dominialidade dos corpos hídricos. Disponível em: https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/mapviewer/index.html?webmap=1157c738e4d349e9911af37b9191d23d. Acesso em: maio 2025.

ANTAQ. Anuário Estatístico Aquaviário. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html. Acesso em: junho 2025.

ATLAS RH-V. Atlas da Região Hidrográfica V: Baía de Guanabara e Sistemas Lagunares de Maricá e Jacarepaguá. Disponível em: http://www.comitebaiadeguanabara.org.br/wp-content/uploads/2021/03/Atlas_CBH-BG.pdf. Acesso em: fev. 2022.

BRASIL. Ministério de Transportes. Sistema Federal de Viação – SFV. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/sistema-federal-de-viacao. Acesso em: maio de 2025.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

_____. Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre no âmbito da Administração Federal, institui o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT e a Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 6 jun. 2001.

_____. Lei nº 14.301, de 7 de janeiro de 2022. Institui o Programa de Estímulo ao Transporte por Cabotagem – BR do Mar, e altera as Leis nº 9.432, de 8 de janeiro de 1997, nº 10.893, de 13 de julho de 2004, nº 9.718, de 27 de novembro de 1998, nº 10.683, de 28 de maio de 2003, e nº 12.815, de 5 de junho de 2013. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 10 jan. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Transporte hidroviário no Brasil. Brasília: CNT, 2019.

CONSÓRCIO BARCAS RIO. Dados operacionais. Disponível em: https://barcasrio.com.br/barcas-rio/. Acesso em: maio 2025.

CONSÓRCIO ECOLOGUS-AGRAR. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara: Relatório Final. Rio de Janeiro, 2005. 190 p.

DHN – DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. NORMAM-501/DHN: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos. Marinha do Brasil, 2023.

ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI/RMRJ). Rio Metrópole Instituto. Rio de Janeiro, 2018.

FIRJAN. Novas linhas hidroviárias como alternativa para melhorar a mobilidade urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: https://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8F5BFEBAA1015C1CEBBCB07C3D. Acesso em: nov. 2024.

_____. Panorama do roubo de carga no estado do Rio de Janeiro – 2025. Nota Técnica de fevereiro de 2025. Disponível em: <www.firjan.com.br/publicacoes>. Acesso em: junho 2025.

GRUPO CCR. Frota da CCR Barcas (Embarcações). 2022. Disponível em: https://www.grupoccr.com.br/barcas/embarcacoes. Acesso em: fev. 2022.

IBGE; SEA. Projeto RJ25 – Base Hidrográfica do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:25.000. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: http://www.visualizador.inde.gov.br/. Acesso em: nov. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS (INPH). Diretrizes de projeto para o dimensionamento de hidrovias interiores: baseado nas normas PIANC nº 141/2019. Relatório INPH 008/2025. Código: Brasil 100/01 (especificação técnica). Tradução: Eng. Denise Paravato Tavares da Silva. Rio de Janeiro: INPH, 2025.

PREFEITURA DO RIO. Licitação para transporte aquaviário entre aeroportos do Rio. Disponível em: https://www.ccpar.rio/noticias/prefeitura-do-rio-abre-licitacao-para-transporte-aquaviario-entre-aeroportos-do-rio/. Acesso em: maio 2025.

RIO DE JANEIRO (Estado). Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Resolução CERHI nº 107, de 22 de maio de 2013. Estabelece diretrizes para a delegação da gestão de corpos hídricos de domínio estadual para entidades de bacia hidrográfica. Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 24 maio 2013.

INFRAESTRUTUAS PORTUÁRIAS E MUDANÇA DO CLIMA: O PAPEL DAS SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA NA RESILIÊNCIA COSTEIRA

Rafael Ferraz dos Santos[1], Victor Hugo Souza de Abreu[2], Andrea Souza Santos[1]
[1]PET/COPPE/UFRJ, [2]POLI/UFRJ

RESUMO
A intensificação de eventos extremos vem impondo novos desafios à resiliência de zonas costeiras e infraestruturas portuárias. Neste contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) surgem como alternativas frente às limitações das abordagens convencionais, ao combinarem mitigação de impactos com benefícios ecológicos, sociais e econômicos. Este artigo tem como objetivo analisar o estado da arte das SbNs aplicadas ao ambiente portuário em diferentes contextos internacionais. A metodologia baseia-se em revisão da literatura indexada na Base de dados *Web of Science,* que apresenta alcance e cobertura safistarórios. Os resultados revelam um aumento da produção científica sobre o tema a partir de 2020, concentrada em países europeus. A análise temática evidenciou casos de sucesso em portos de Portugal, China e Bangladesh, com destaque para infraestruturas híbridas, uso de vegetação costeira e regeneração de manguezais. Estudos complementares demonstraram o papel das SbNs na redução de riscos hidrológicos, os critérios técnicos para sua escolha e os desafios operacionais ainda persistentes.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A intensificação dos impactos climáticos em zonas costeiras tem exposto infraestruturas portuárias e assentamentos humanos a riscos crescentes, o que demanda respostas adaptativas mais integradas, resilientes e ambientalmente sustentáveis. Nesse contexto, as Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) têm se destacado como alternativas promissoras às abordagens convencionais, em virtude dos co-benefícios ecológicos, sociais e econômicos que proporcionam (PITTMAN *et al.*, 2024; SINGHVI et al., 2024). Apesar de seu potencial, a adoção de SbNs no setor portuário enfrenta entraves de ordem conceitual, normativa e operacional. A literatura internacional revela avanços no desenvolvimento de estruturas híbridas que conciliam atenuação de ondas e serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, por meio da integração entre modelagens hidrodinâmicas, critérios estruturais e materiais biodegradáveis (FOTOPOULOS et al., 2024).

Em contextos urbanos litorâneos marcados por degradação ambiental, iniciativas de reabilitação ecológica demonstraram que intervenções locais bem planejadas podem recuperar canais estuarinos e restabelecer a funcionalidade hidrológica comprometida (CHOWDHOOREE et al., 2024). Outras pesquisas apontam para o potencial de soluções geotécnicas, como estruturas de quebra-mares compostas por rochas naturais, que por sua vez reduzem as emissões associadas à construção civil (ESKAFI et al., 2024). De forma complementar, abordagens inovadoras baseadas na implantação de barreiras vegetadas flutuantes têm se mostrado eficazes na contenção da sobrelevação por ondas e na proteção de estruturas portuárias em cenários extremos (MIRANDA et al., 2024). As *Living Shorelines,* ou "linhas costeiras vivas", também figuram como estratégias recorrentes, com destaque para o uso combinado de técnicas de bioengenharia e regeneração de vegetação costeira, como manguezais, para mitigar processos erosivos e proteger áreas de alta vulnerabilidade (CHATTERJEE et al., 2024). Em casos em que se observa a articulação de múltiplas intervenções ecológicas em escalas complementares, como muros de gabião, cinturões vegetais e reabilitação de praias, verifica-se que a efetividade das SbNs depende diretamente da integração entre esferas de planejamento urbano e ambiental (LIU et al., 2024). No caso brasileiro, a incorporação de SbNs ao planejamento portuário ainda se mostra incipiente, limitada por barreiras institucionais, carência de normativas específicas e ausência de diretrizes técnicas adequadas.

Diante desse cenário, este artigo tem por objetivo examinar o papel das Soluções Baseadas na Natureza como estratégia de adaptação climática aplicada ao ambiente portuário, com especial atenção à interface entre zonas costeiras urbanizadas e os riscos crescentes associados. A partir de uma análise sistemática da literatura científica internacional, busca-se também identificar diretrizes e aprendizados aplicáveis ao contexto brasileiro.

2. METODOLOGIA

Este artigo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada na análise da literatura científica indexada na base de dados *Web of Science* (WoS), com o objetivo de identificar e examinar o estado da arte

sobre a aplicação de Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) em contextos portuários e costeiros, com foco na adaptação às mudanças do clima. Os termos de busca, os critérios de inclusão e qualificação, assim como os procedimentos para recuperação e extração de informações na base de dados, foram rigorosamente definidos para garantir alinhamento com os objetivos da pesquisa, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros meteorológicos.

Aspecto	Descrição
Temos de Busca	*TS=(("port*" OR "harbor*" OR "port infrastructure") AND ("climate adaptation" OR "resilience" OR "climate change") AND ("nature-based solution*" OR "ecosystem-based adaptation"))*
Base de Dados	*Web of Science*
Critérios de Inclusão	✓ Estudos publicados em periódicos indexados e conferências de relevância internacional. ✓ Trabalhos que abordem explicitamente a infraestrutura portuária em interface com riscos climáticos. ✓ Artigos que apresentem metodologias claras e replicáveis. ✓ Pesquisas que analisem projeções climáticas e impactos socioeconômicos no setor portuário. ✓ Contribuições que discutam impactos dos eventos extremos e soluções sustentáveis.
Critérios de Qualificação	✓ Clareza na formulação da questão de pesquisa e coerência metodológica. ✓ Uso de dados robustos e fontes confiáveis para fundamentação teórica e empírica. ✓ Aplicabilidade dos resultados para o desenvolvimento de políticas e estratégias de adaptação. ✓ Relevância e atualidade do estudo dentro do contexto da mudança clima e seus impactos no setor portuário.

Fonte. Elaborado pelos autores (2025).

Dos 105 artigos inicialmente identificados na etapa de levantamento bibliográfico, todos foram submetidos a uma análise individual criteriosa, com base em critérios de exclusão previamente estabelecidos, a fim de assegurar a aderência temática ao escopo específico desta pesquisa. O processo de triagem buscou filtrar estudos com relevância direta para o contexto investigado, especialmente no que se refere à interface entre soluções baseadas na natureza e infraestrutura adaptativa em áreas portuárias e costeiras.

Assim, foram descartados os artigos que não apresentavam conexão explícita com ambientes portuários ou regiões costeiras, aqueles que abordavam intervenções restritas à microescala urbana — como jardins de chuva ou praças verdes isoladas — e também os estudos centrados em soluções baseadas na natureza que não estavam integradas a estratégias de adaptação às mudanças climáticas ou de suporte a infraestruturas físicas existentes. Essa filtragem resultou em um conjunto mais coerente e representativo de publicações com potencial para contribuir substancialmente com os objetivos da pesquisa. Após essa triagem, permaneceram 58 estudos considerados relevantes, cuja distribuição por categorias analíticas e etapas metodológicas está sintetizada na Figura 1.

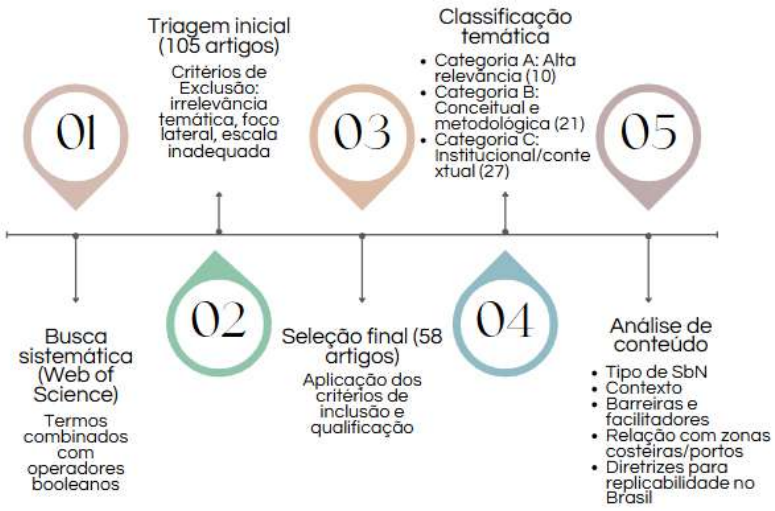


Figura 1: Etapas da metodologia de seleção e análise dos estudos científicos.

3. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

A análise dos artigos revela um crescimento expressivo e recente da produção científica sobre Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) aplicadas a contextos costeiros e portuários. A maior parte das publicações concentra-se entre 2022 e 2025, evidenciando a consolidação do tema na agenda climática global.

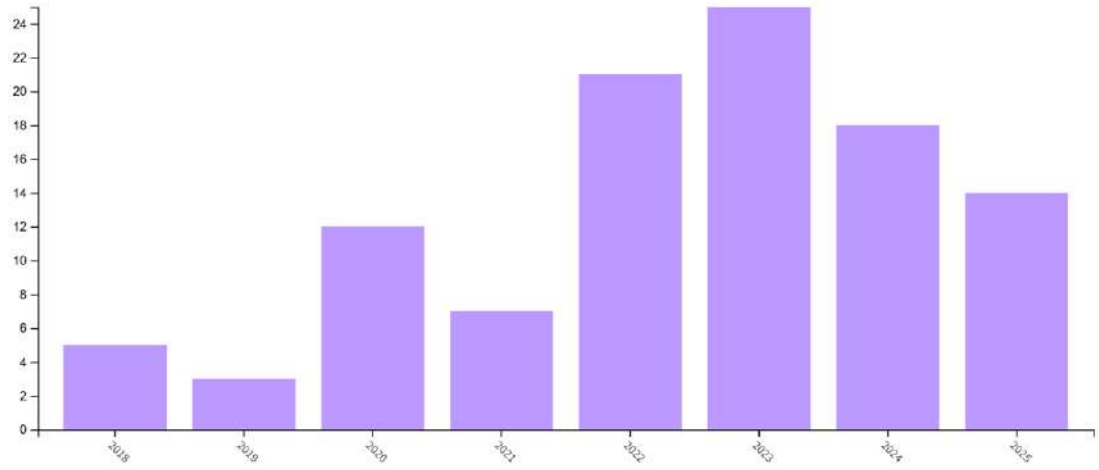


Figura 2: Evolução temporal das publicações.

Geograficamente, a produção é fortemente dominada por países europeus, especialmente Portugal (25) e Itália (22), seguidos por Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra e Países Baixos. O Brasil, com apenas 4 registros, ainda tem participação discreta, o que revela uma lacuna importante considerando sua extensão litorânea e dependência logística de infraestruturas portuárias.

4. APLICAÇÕES, DESEMPENHO E DESAFIOS

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da análise temática de estudos recentes sobre Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) aplicadas a ambientes costeiros e portuários. A discussão se organiza em quatro eixos centrais: (i) o uso de SbNs em infraestrutura portuária e zonas costeiras adjacentes; (ii) a avaliação da eficácia hidrológica e funcional dessas soluções; (iii) os critérios técnicos, classificações existentes e obstáculos operacionais à sua implementação; e (iv) reflexões sobre a aplicabilidade e os desafios específicos para o contexto brasileiro.

4.1 Aplicações portuárias e costeiras das SbNs

A literatura aponta o avanço de infraestruturas híbridas no contexto portuário como uma resposta promissora às limitações das abordagens tradicionais de proteção costeira. Em Portugal, destacam-se os *living breakwaters*, quebra-mares vivos compostos por materiais biodegradáveis, projetados para dissipar a energia das ondas e contribuir para o sequestro de carbono, por meio da combinação entre análise estrutural, modelagem hidrodinâmica e avaliação de fadiga dos materiais (FOTOPOULOS et al., 2024). Outras estratégias envolvem o uso de *kelp farms* flutuantes, cultivos de algas marinhas ancorados próximos à costa, capazes de reduzir a sobrelevação provocada pelas ondas em estruturas de contenção, como observado no Porto de Leixões (MIRANDA et al., 2024). Já a regeneração de manguezais constitui uma forma de *Living Shoreline*, abordagem que emprega vegetação nativa e técnicas de bioengenharia para estabilizar margens e encostas de maneira ecológica, promovendo a contenção natural em áreas vulneráveis à erosão (CHATTERJEE et al., 2024). No Porto de Chaoyang, na China, a combinação entre reabilitação de praias, implantação de cinturões vegetais e uso de muros de gabião (estruturas modulares preenchidas com pedras para estabilização de encostas) só foi viabilizada por meio da articulação entre políticas urbanas e ambientais. O caso evidencia que a efetividade das Soluções Baseadas na Natureza depende diretamente da integração institucional e da governança em múltiplos níveis (LIU et al., 2024).

4.2 Efetividade e desempenho

Parte significativa dos estudos reforçam a capacidade das Soluções Baseadas na Natureza (SbNs) em mitigar riscos hidrológicos, com destaque para intervenções em zonas costeiras e áreas adjacentes. Embora parte das evidências derive de contextos urbanos, como o uso de telhados verdes em Aveiro ou a reabilitação de áreas de montante em Portugal (FERREIRA et al., 2024; QUAGLIOLO et al., 2024), essas experiências oferecem lições aplicáveis à gestão integrada de drenagem e controle de inundações em ambientes portuários, especialmente aqueles inseridos em áreas densamente urbanizadas. Ainda assim, estudos como o de Dubo et al. (2024) alertam para a desconexão frequente entre os locais de implementação das SbNs e os pontos de maior vulnerabilidade climática, evidenciando desafios institucionais e desigualdades na distribuição de recursos. Para os portos, tal alerta é relevante na medida em que a localização estratégica das intervenções pode ser determinante para sua efetividade adaptativa.

4.3 Classificação, critérios de escolha e desafios operacionais

Do ponto de vista técnico, a literatura apresenta avanços na definição de tipologias e critérios para seleção de SbNs. Estudos recentes propuseram matrizes classificatórias que consideram barreiras técnicas, projeções climáticas e desvantagens operacionais (MARTIN et al., 2024; GOMEZ-MARTIN et al., 2024). Além disso, a revisão de ROEMER et al. (2024) identificou mais de 100 ferramentas de apoio à decisão (DSS) voltadas à implementação de SbNs, embora a maioria exija conhecimento técnico especializado, limitando seu uso por gestores locais. Isso reforça a urgência de políticas públicas que promovam capacitação, articulação interinstitucional e integração entre ciência e prática.

4.4 Considerações para o contexto brasileiro

Apesar da predominância de casos internacionais, os achados são diretamente aplicáveis ao Brasil. A crescente exposição de zonas portuárias brasileiras à intensificação de eventos extremos demanda estratégias integradas que combinem infraestrutura verde, ordenamento territorial e gestão costeira adaptativa. A escassez de estudos aplicados em portos nacionais revela uma lacuna a ser superada tanto por meio da produção científica quanto do aprimoramento normativo e institucional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As SbNs constituem alternativas viáveis para a resiliência portuária diante dos impactos da mudança do clima. Intervenções como *living breakwaters*, recifes vegetados, cinturões verdes e regeneração de ecossistemas revelam potencial para conjugar proteção física, restauração ambiental e benefícios sociais. Entretanto, sua efetividade está condicionada à correta localização, ao suporte institucional e à existência de capacidades técnicas. A literatura evidencia a importância de ferramentas de apoio à decisão, metodologias de avaliação robustas e estratégias de governança adaptativa. No Brasil, o uso sistemático de SbNs em portos ainda é incipiente. A urgência imposta pelos riscos climáticos requer a formulação de políticas baseadas em evidências, compatíveis com as realidades locais e articuladas ao planejamento urbano e à gestão costeira. O aprendizado internacional oferece subsídios valiosos, desde que adaptado às especificidades nacionais, em

direção a uma infraestrutura portuária mais justa e ambientalmente sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHATTERJEE, P.; SARKAR, D.; MAITY, A.; BHAUMIK, R. Living shoreline: preliminary observations on nature-based solution for toe-line protection of estuarine embankments and mangrove regeneration. *Sustainability*, v. 17, n. 7, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su17073168.

CHOWDHOOREE, I.; JAHAN, F.; FARUQUE, A.; ISLAM, N. Climate change adaptation through nature-based solution: examining the case of Thakurani Khal of Mongla Port Municipality, Bagerhat Bangladesh. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 2024. DOI: https://doi.org/10.1108/IJDRBE-02-2023-0014.

DUBO, T.; PALOMO, I.; CAMACHO, L. L.; LOCATELLI, B.; CUGNIET, A.; RACINAIS, N.; LAVOREL, S. Nature-based solutions for climate change adaptation are not located where they are most needed across the Alps. *Regional Environmental Change*, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-022-01998-w.

ESKAFI, M.; JAHANBAKHSH, Z.; FATTAHI, A. Icelandic-type berm breakwater: a nature-based structure with a low carbon footprint. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2024. DOI: https://doi.org/10.1061/JWPED5.WWENG-2010.

FERREIRA, C. S. S.; MOURATO, S.; KASANIN-GRUBIN, M.; FERREIRA, A. J. D. Effectiveness of nature-based solutions in mitigating flood hazard in a Mediterranean peri-urban catchment. *Water*, v. 12, n. 10, p. 2893, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/w12102893.

FOTOPOULOS, K. T.; KARYOTIS, C.; GEORGOULIAS, S.; PAVLIDIS, P. A numerical methodology for design of a living breakwater for coastal resilience under critical wave conditions. *Alexandria Engineering Journal*, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.03.086.

GOMEZ MARTIN, E.; COSTA, M. M.; MANEZ, K. S. An operationalized classification of nature-based solutions for water-related hazards: from theory to practice. *Ecological Economics*, v. 167, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106460.

KNIGHT, J. The green infrastructure of sandy coastlines: a nature-based solution for mitigation of climate change risks. *Sustainability*, v. 16, n. 3, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16031056.

LIU, S.; SONG, J.; YANG, X.; WANG, Y. Nature-based solutions for coastal restoration during urbanization: implications of a case study along Chaoyang Port Coast, China. *Ocean & Coastal Management*, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107691.

MIRANDA, F.; TORRES, R.; SANTOS, P.; BRITO, A. Reducing wave overtopping on rubble mound breakwaters using floating kelp farms. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 13, n. 5, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse13050850.

PITTMAN, S. J.; COSTA, B. M.; LEÓN, R.; SMITH, T. J. Rapid site selection to prioritize coastal seascapes for nature-based solutions with multiple benefits. *Frontiers in Marine Science*, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2022.832480.

QUAGLIOLO, C.; ROEBELING, P.; MATOS, F.; PEZZOLI, A.; COMINO, E. Pluvial flood adaptation using nature-based solutions: an integrated biophysical-economic assessment. *Science of the Total Environment*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166202.

ROEMER, J.; KOMULAINEN, T. M. M.; SCHOLZ, M.; MOATAMEDI, M. The review of 102 design support tools for nature-based solutions applications. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1504/IJHST.2023.131169.

SINGHVI, A.; RODRIGUES, M.; KANNAN, R. The grey - green spectrum: a review of coastal protection interventions. *Journal of Environmental Management*, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824.

VERRI, G.; VERHOEVEN, R.; NICOLO, A.; BEZZINA, E.; BATEMAN, I. Salt-wedge estuary's response to rising sea level, reduced discharge, and nature-based solution. *Frontiers in Climate*, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1408038.

UMA ANÁLISE PROSPECTIVA SOBRE A IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO DE EMBARCAÇÕES NOS PORTOS BRASILEIROS

Pedro Luiz Neves Scucuglia, Pastor Willy Gonzales Taco
Universidade de Brasília

RESUMO
Este artigo apresenta uma análise prospectiva sobre os sistemas de gerenciamento do tráfego de embarcações (VTS e VTMIS) nos portos brasileiros, considerando aspectos tecnológicos, operacionais e regulatórios, a partir das percepções de oito especialistas de diferentes áreas, coletadas mediante a aplicação de um questionário estruturado. Os resultados indicam uma tendência de crescimento contínuo na movimentação portuária nos próximos cinco anos. Diante desse panorama, os gestores portuários precisam investir na adaptação de suas instalações para receber embarcações de maior porte e na melhoria das condições de acesso marítimo. Ademais, os sistemas de gerenciamento de tráfego se mostram fundamentais para garantir a segurança da navegação, a proteção da vida humana e a preservação ambiental. No entanto, desafios significativos devem ser superados: o alto custo dos softwares de gestão, a necessidade de infraestrutura específica e a escassez de profissionais qualificados para a sua operação representam barreiras à implementação dessas tecnologias.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os portos brasileiros vêm crescendo a taxas anuais superiores a 3%, muito acima do PIB (ANTAQ, 2024). Em 2023, foram movimentadas 1,3 bilhão de toneladas de cargas, enquanto em 2010, movimentavam-se 840 milhões de toneladas. O número de atracações de embarcações com carga, no mesmo ínterim, passou de 58,6 mil para 75,9 mil. Similarmente, acompanhando uma tendência global, temos observado um avanço significativo nas dimensões físicas dos navios que frequentam a costa brasileira. Nesse sentido, a gestão eficiente do tráfego de embarcações é essencial para garantir a segurança, fluidez e eficiência das operações portuárias. Sob essas perspectivas, os sistemas de gerenciamento de tráfego de embarcações desempenham um papel central, ajudando na monitorização e orientação do tráfego marítimo, prevenindo acidentes e otimizado a utilização da infraestrutura portuária. Além disso, estudos demonstram que a implementação de ferramentas dessa natureza vem possibilitando ganhos econômicos e reduções de custos nos portos. Assim, o presente estudo tem por objetivo realizar uma análise prospectiva sobre o uso desses sistemas nos portos brasileiros, considerando os avanços tecnológicos, as tendências do mercado e os desafios operacionais e regulatórios que se apresentam. Para alcançar esse objetivo, abordaremos a evolução do Vessel Traffic Service (VTS) ao longo das décadas e a sua evolução contemporânea, passando gradualmente para o conceito de VTMIS (Vessel Traffic Management Information System). Verificaremos o ponto de situação e perspectivas para a implantação e operacionalização dessas ferramentas nos principais portos do país. Ademais, aplicaremos um formulário e obteremos a percepção de especialistas com relação ao futuro dos sistemas de gerenciamento de tráfego de navios no país, no qual se manifestarão sobre assertivas relacionadas aos pilares tecnológico, operacional e regulatório.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Participação brasileira no comércio exterior e contexto da infraestrutura portuária do país

O comércio marítimo global apresentou expansão de 2,4% em 2023, totalizando 12,3 bilhões t., após uma retração observada em 2022 (UNCTAD, 2024). Projeções indicam crescimento de 2% em 2024 e uma taxa média anual de 2,4% até 2029. A demanda por commodities permanece alta, enquanto o comércio conteinerizado, que registrou incremento marginal de 0,3% em 2023, possui expectativa de recuperação de 3,5% em 2024, condicionada à estabilização das cadeias logísticas. Destaca-se, ainda, o recorde de aproximadamente 250 mil escalas portuárias de navios porta-contêineres no 2º semestre de 2023, impulsionado pela intensificação do comércio e pela adoção de rotas mais extensas, resultando em episódios de congestionamento, especialmente na Ásia. No que tange à inserção brasileira no comércio marítimo global, observa-se participação ainda limitada: em 2020, o país foi responsável por aproximadamente 7% do volume global de mercadorias embarcadas e 4% das desembarcadas (OCDE, 2022). Todavia, nos últimos anos, tem-se verificado expansão significativa das exportações brasileiras, com ênfase em produtos como soja, minério de ferro, petróleo e carnes.

A infraestrutura portuária brasileira caracteriza-se por sua elevada complexidade, sendo composta por 34 portos organizados e mais de duas centenas de instalações portuárias autorizadas, distribuídas ao longo de um

extenso litoral superior a 8,5 mil quilômetros, considerando os recortes litorâneos (Alfredini & Arasaki, 2014). Essas instalações operam sob condições geográficas e operacionais heterogêneas, possuindo diferentes atributos, tais como profundidade natural dos canais e taxas de sedimentação, operando distintos perfis de carga, que requerem embarcações com características específicas. Tal diversidade impõe a necessidade de sistemas de gerenciamento do tráfego aquaviário adaptáveis, capazes de contemplar as especificidades operacionais de cada porto, as características das embarcações e as variáveis ambientais locais.

O mencionado crescimento das exportações brasileiras vem refletindo em maior intensidade no tráfego aquaviário nacional. Em 2023, a movimentação portuária alcançou 1,3 bilhão t., com taxa média de crescimento anual superior a 3% entre 2010 e 2023. Observou-se, concomitantemente, o aumento do número de atracações e das dimensões físicas das embarcações em operação nos portos brasileiros. Exemplo ilustrativo é a recepção do navio CMA CGM Vela (247 m. de comprimento) pelo Porto de Santos em outubro de 2022 e, posteriormente, do MSC Natasha (366 m.) em 2024. Essa tendência de crescimento no porte dos navios evidencia a necessidade de adoção de boas práticas de gestão do tráfego portuário, visando à manutenção de elevados padrões de eficiência operacional, segurança e sustentabilidade.

2.2. Os sistemas de gerenciamento de tráfego de navios e seus benefícios ao setor portuário

2.2.1. Vessel Traffic Systems e Vessel Traffic Management Information Systems – conceito e objetivos

Conforme o Relatório Técnico da Fundação Ezute (2021), o VTS nasce como consequência do avanço evolutivo nas tecnologias de monitoramento e rastreamento do tráfego de embarcações, sendo um conceito no porto de Liverpool, em 1949, objetivando controlar e regular o tráfego de embarcações numa época em que o fluxo das rotas marítimas após a segunda guerra mundial foi intensificado, trazendo um aumento do número de acidentes no ambiente marítimo. Partindo para a conceituação técnica, a IMO (2025) conceitua o VTS como: "(...) *sistemas em terra que vão desde o fornecimento de simples mensagens de informação aos navios, como a posição de outro tráfego ou avisos de perigo meteorológico, até à gestão extensiva do tráfego dentro de um porto ou via navegável*" (tradução livre). Quando acrescido de recursos de telemática que permitam serviços aliados, compartilhamento de dados ou gerenciamento da atividade marítima, o VTS pode ser ampliado para o denominado *Vessel Traffic Management Information System* – VTMIS (ANTAQ, 2024). Dada a relevância do setor marítimo-portuário, que é responsável por cerca de 90% da corrente de comércio do país, é mister que estudos concentrem ações voltadas ao gerenciamento de riscos no contexto do tráfego marítimo. Deste modo, os sistemas de gestão de tráfego de embarcações se apresentam, precipuamente, como um conjunto ferramental que possibilita aumentar a segurança do tráfego marítimo. Kwang (2011, apud Ribeiro, 2018), argumenta que outra função primária reside na busca por uma melhora na eficiência da movimentação de cargas, da utilização dos recursos e infraestrutura do porto e da organização do tráfego aquaviário na área portuária, canais de acesso e fundeadouros, ao passo em que esses serviços oportunizam a capacidade de detectar uma situação perigosa e a capacidade de fornecer advertência oportuna de tais perigos.

2.2.2. Benefícios decorrentes da implantação do VTMIS

O TCU (2025), no âmbito do processo de desestatização do canal de acesso ao porto de Paranaguá/PR, debruçou-se sobre questões de vantajosidade no uso do VTMIS sobre ferramentas de VTS. O órgão indica que a adoção de sistema mais abrangente como o VTMIS, pode apresentar benefícios sociais que superam significativamente seu custo marginal em relação ao VTS, proporcionando ganhos de produtividade para toda a cadeia portuária, e ressalta que o VTMIS proporciona uma gestão integrada das operações portuárias, possibilitando a otimização da utilização de berços, o monitoramento em tempo real das movimentações de carga, de tal sorte a maximizar a capacidade operacional do porto. Por sua vez, o Relatório Técnico da Fundação Ezute (2021) apresenta diversos benefícios tangíveis e intangíveis associados à implantação do VTMIS, considerando os domínios e subdomínios que constituem os portos inteligentes (Operações, Ambiental, Energético e Safe and Security), destacando que o VTMIS, apesar de estar diretamente ligado ao tráfego marítimo, se relaciona com todas as áreas das atividades portuárias, trazendo benefícios em termos de integração de informações, otimização da tomada de decisões, dentre outros. Especificamente sob as perspectivas operacional e econômica, Gomes (2017) enfatiza o potencial da implantação do VTMIS na modernização do sistema portuário brasileiro e na redução do Custo-Brasil, concluindo que a implantação do sistema é capaz de mitigar ineficiências relativas à segurança marítima, propiciando elevação da confiança nos produtos e serviços ofertados pelas Autoridades Marítima e Portuária, reduzindo as possibilidades de sinistros e proporcionando aos diversos segmentos portuários melhores negociações nos valores de fretes e seguros.

2.2.3. Ponto de situação da implantação e operação do VTS e do VTMIS nos principais portos brasileiros
A partir de um levantamento junto aos sítios eletrônicos das gestoras de diversos portos organizados, foi possível verificar que a implantação e a operação dos sistemas de gestão de tráfego de navios estão na pauta de diversos dos maiores portos brasileiros, como Santos, Paranaguá, Rio de Janeiro e Itaguaí. O Porto de Açu (RJ) dispõe de VTS homologado em 2016, e o de Vitória (ES) dispõe de VTMIS homologado em 2017.

3. MÉTODO
A pesquisa adotou uma abordagem qualitativo-quantitativa, baseada na percepção de oito especialistas do setor portuário sobre a implementação de sistemas de gestão do tráfego de navios. A opção por essa metodologia se justifica pelo caráter exploratório do estudo, buscando aprofundar o entendimento sobre desafios e oportunidades desses atores a partir da perspectiva de atores-chave (Creswell, 2014). Para tanto, foi aplicado um formulário estruturado utilizando a escala Likert, permitindo avaliar o grau de concordância dos participantes em relação a diferentes aspectos do tema, considerando, sobretudo, os aspectos tecnológicos, operacionais e regulatórios.

A seleção dos participantes não seguiu um critério probabilístico, pois o objetivo da pesquisa não era a obtenção de uma amostra representativa da população geral, mas a coleta de *insights* qualificados a partir de indivíduos com conhecimento profundo sobre o tema. Nesse sentido, selecionou-se um grupo composto por especialistas com reconhecida experiência no setor, incluindo profissionais de autoridades portuárias, operadores portuários e acadêmicos com expertise no campo. Priorizou-se a seleção de respondentes de nível profissional sênior e/ou gerencial, e cuja atuação se concentra em áreas como operação e planejamento portuário, dada a aderência com o foco da pesquisa. Outro critério foi a atuação profissional/acadêmica em diferentes regiões do país, a fim de obter uma visão mais compreensiva sobre o tema.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO
4.1. Análise dos perfis profissional e acadêmico dos especialistas
A tabela a seguir apresenta o perfil acadêmico e profissional dos respondentes.

Tabela 1: Perfil profissional e acadêmico dos profissionais. Elaboração própria.

Respondente	Formação	Escolaridade	Área de atuação	Experiência
1	Engenharia	Mestrado	Operador privado	Mais de 20 anos
2	Engenharia	Pós-graduação (lato sensu)	Autoridade Portuária	Mais de 20 anos
3	Outros	Pós-graduação (lato sensu)	Operador Privado	Entre 15 e 20 anos
4	Administração	Mestrado	Outros	Entre 5 e 10 anos
5	Engenharia	Pós-graduação (lato sensu)	Autoridade Portuária	Mais de 20 anos
6	Administração	Pós-graduação (lato sensu)	Autoridade Portuária	Entre 15 e 20 anos
7	Engenharia	Pós-graduação (lato sensu)	Operador Privado	Entre 15 e 20 anos
8	Engenharia	Doutorado	Autoridade Portuária	Mais de 20 anos

4.2. Análise das respostas
Sobre os aspectos relacionados à movimentação e ao tráfego de navios nos portos, os especialistas observam um aumento gradual no perfil das embarcações que frequentam os portos nacionais, bem como têm um prognóstico positivo para a movimentação portuária nos próximos 5 anos, impulsionada, dentre outros, pela previsão de uma nova safra recorde. Diante disto, há convergência para o entendimento de que os gestores devem envidar esforços para dotar os portos de condições adequadas para receber navios de portes maiores. Outro ponto de convergência está na afirmação de que o aumento do tráfego de navios evidencia a necessidade de investir na manutenção e melhoria das condições de acesso marítimo. Contudo, indagados sobre se os canais de acesso apresentam profundidades e condições de manobrabilidade adequadas, não houve consenso. Ademais, não foi possível obter consenso sobre se o crescimento na movimentação de cargas nos últimos 10 anos foi acompanhado de uma melhora geral nos indicadores operacionais. A divergência pode estar atrelada

à realidade local, uma vez que há diferença notória entre os níveis de serviço nos diferentes portos pelo país. Quanto aos aspectos tecnológicos dos sistemas de gestão do tráfego de navios, houve consenso no sentido de que os gestores portuários devem investir em tecnologia para garantir competitividade. No mesmo sentido, os especialistas tendem a concordar que, em termos de tecnologia, Big Data, IoT e IA são tendências para a operação portuária no Brasil. De igual maneira, os especialistas tendem a concordar com a afirmação de que o VTMIS e VTS formam um conjunto de ferramentas tecnológicas capaz de contribuir significativamente para a segurança da navegação. Contudo, indagados sobre se os gestores devem objetivar a implantação dessas tecnologias nas respectivas instalações, há um menor nível de concordância, o que pode estar relacionado à percepção de que tais funções poderiam estar alocadas, exclusivamente, à Autoridade Marítima.

Sobre os aspectos operacionais, os especialistas apontam como desafios a baixa disponibilidade de pessoal qualificado e a ausência de mão-de-obra especializada para a operação de centros de controle operacional. Indagados sobre se a aquisição e implantação de infraestrutura física e de software representam desafios relevantes, houve uma tendência a concordar. Observou-se ainda uma convergência para a assertiva de que um VTMIS implantado e homologado traz vantagem competitiva ao porto. Os respondentes tendem a concordar que eventos climáticos extremos já são sentidos nos portos, reforçando a necessidade da implantação de sistemas para fins de resiliência portuária. Não houve consenso sobre se os orçamentos financeiros dos portos seriam suficientes para o investimento necessário à implantação e operação dos sistemas de gestão, o que pode estar associado à percepção das assimetrias existentes entre as autoridades portuárias brasileiras, de tal sorte que a disponibilidade de recursos para investimentos pode variar drasticamente de uma para outra.

No tocante à temática da regulação, não houve consenso sobre se a Normam-26-DHN disciplina suficientemente o assunto, considerando os requisitos técnicos e operacionais, bem como de pessoal. Tampouco se, a fim de operacionalizar o VTS, em termos de formação e aprimoramento contínuo de pessoal, existe um número adequado e suficiente de instituições de ensino credenciadas junto à Autoridade Marítima. Todavia, os especialistas tendem a concordar que a edição de uma Normam específica acerca do VTMIS apresenta-se como uma oportunidade para a normatização desta ferramenta no setor portuário brasileiro.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de gerenciamento de tráfego de navios se apresentam como ferramentas importantes para a segurança da navegação e da vida humana, bem como para a proteção do meio ambiente, tal qual prescreve a Normam-26/DHN. Diante do crescimento da movimentação portuária brasileira observado nos últimos anos, bem como das perspectivas futuras acerca do aumento das dimensões dos navios que frequentam a costa brasileira, observa-se que a implantação e operacionalização desses equipamentos está na pauta prioritária dos principais portos do país: Açu e Vitória, pioneiros no país, que já têm um sistema gerenciamento de tráfego homologado há alguns anos. Além dos fatores anteriormente mencionados, é fundamental destacar que diversos estudos indicam benefícios econômicos potencialmente associados à implementação do VTMIS. Entre eles, destaca-se a possível redução de custos com seguros, dado que tais sistemas contribuem significativamente para a mitigação de riscos operacionais e a diminuição da sinistralidade. Isso ocorre porque o VTMIS aprimora o monitoramento do tráfego marítimo, reduzindo a probabilidade de incidentes, como colisões e encalhes, o que, por sua vez, pode resultar em menores prêmios de seguro.

Ademais, a maior previsibilidade e segurança proporcionados pelo sistema tendem a otimizar a eficiência logística e a atratividade dos portos a investidores e operadores, gerando impactos positivos adicionais na competitividade do setor. Diante deste cenário, conduzimos um questionário com oito especialistas, de diferentes setores relacionados aos portos e transportes aquaviários, com o intuito de colher sua percepção sobre os desafios e tendências para a implantação e operacionalização dos sistemas de gestão de tráfego de navios nos portos do país, com foco nos aspectos de tecnologia, operacionalidade e regulação. Pôde-se concluir que o VTS e o VTMIS formam um conjunto de ferramentas tecnológicas capaz de contribuir de forma significativa para a segurança da navegação e, nesse mesmo sentido, foi possível obter o entendimento de que Big Data, Internet das Coisas e Inteligência Artificial são tendências para a operação portuária no Brasil. A implementação do VTMIS nos portos brasileiros enfrenta desafios significativos que vão além dos altos custos de aquisição e das frequentes restrições orçamentárias das administrações portuárias. A complexidade da infraestrutura necessária para seu funcionamento representa um obstáculo adicional, uma vez que a instalação do sistema exige a integração de torres de monitoramento, radares, boias e outros equipamentos tecnológicos,

além de uma rede robusta de comunicação e transmissão de dados. Soma-se a isso a necessidade de garantir a interoperabilidade entre diferentes sistemas já em uso, o que demanda planejamento e investimentos adicionais. Outro aspecto crucial é a disponibilidade de mão de obra especializada para operar e manter o VTMIS. À medida que mais portos adotam essa tecnologia, será essencial ampliar a oferta de capacitação técnica e fortalecer centros de formação continuada, garantindo que profissionais estejam aptos a lidar com as especificidades do sistema. O desenvolvimento de programas de treinamento e certificação torna-se, assim, um elemento estratégico para a consolidação do VTMIS no Brasil. Além dos desafios técnicos e operacionais, há a necessidade de um arcabouço regulatório adequado: a criação de uma norma específica para a implantação e operação do VTMIS surge como uma oportunidade para estabelecer diretrizes claras e harmonizadas, conferindo segurança jurídica aos operadores e incentivando investimentos. A norma pode ainda contribuir para padronizar procedimentos, facilitando a integração do sistema com outras iniciativas voltadas à modernização e segurança da navegação nos portos. Diante dos desafios e oportunidades relacionados à implementação dos sistemas de gestão do tráfego de navios nos portos brasileiros, sugere-se que estudos futuros aprofundem a análise dos impactos econômicos e operacionais desses sistemas, considerando tanto a redução de custos com seguros e sinistralidade como os efeitos sobre a eficiência logística e a competitividade portuária. Por fim, investigações sobre modelos de financiamento e parcerias público-privadas podem contribuir para viabilizar a adoção dessas ferramentas, sobretudo em contextos de restrições orçamentárias.

Como restrições à pesquisa devemos reconhecer os desafios metodológicos, sobretudo no que concerne às críticas a modelos de mensuração de atitudes e percepções que se valem de escalas ordinais para tanto, que podem dificultar as respectivas análises estatísticas. O número restrito de especialistas consultados resultou na falta de consenso para algumas proposições. Contudo, considerando o elevado tempo de experiência, bem como o distinto perfil acadêmico dos respondentes, pode-se conferir legitimidade aos principais pontos destacados e discutidos no artigo.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Professor Francisco Gildemir Ferreira da Silva, do Programa de Pós-graduação em Transportes – PPGT/UnB, pelas valiosas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfredini, P., & Arasaki, E. (2014). *Engenharia portuária*. Editora Blucher

ANTAQ (2023). *Audiência Pública nº 07/2023*. Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Brasília, DF.

_____ (2024) *Anuário Estatístico Aquaviário*. Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Brasília, DF.

Brasil, M. M., Costa, M. P.; Nolasco, P. H. O. (2022) Análise da Implantação do Vessel Traffic Service em portos brasileiros: Um estudo sobre os portos do Açu e Vitória. *Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy – MLAW International Law and Business Review*. Vol. 2, nº 2, Julho a Dezembro-2022. pp 16-36.

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches.* Sage publications.

Escola de Guerra Naval - Fundação EZUTE (2021) *Logística Marítima e a Importância do VTMIS: Relatório de Pesquisa.* Rio de Janeiro.

Gomes, A.C. A importância da implantação do Vessel traffic information system na modernização dos portos e na redução do Custo-Brasil: Perspectivas e oportunidades referentes às atividades da Autoridade Marítima brasileira, com a implementação do VTMIS. Tese). Escola de Guerra Naval. Rio de Janeiro. P. 84. 2017.

IMO – International Maritime Organization (2025). Vessel Traffic Services. Disponível em https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/VesselTrafficServices.aspx#:~:text=Vessel%20traffic%20services%20(VTS)%20are,of%20risk%20justifies%20such%20services. Acesso em jan 2025.

Marinha do Brasil. NORMAM26DHN. Normas da Autoridade Portuária para serviços de tráfego de embarcações. 2018

OECD (2022), *Relatórios de Avaliação Concorrencial da OCDE: Brasil*, OECD Publishing. Paris.

Ribeiro, F.F.O. Aplicação de ferramentas de análise de risco para prevenção de acidentes marítimos: contribuição para implementação de VTS em portos brasileiros. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Escola Politécnica e Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. P. 130. 2018.

TCU – Tribunal de Contas da União. Acórdão 881/2025 – Plenário. Processo: TC 019.089/2024-4

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2024). *Handbook of Statistics 2024*.

Pedro Luiz Neves Scucuglia (Pedro.scucuglia@gmail.com)
Pastor Willy Gonzales Taco (pastor@unb.br)
Programa de Pós-graduação em Transportes, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília-DF

Projeto de vias

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

BIM PARA INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES: UMA REVISÃO DOS DESAFIOS PARA SUA IMPLANTAÇÃO NO BRASIL

Alice Giardini, Eloisa Dezen-Kempter
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Tecnologia

RESUMO
Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação do Building Information Modeling (BIM) em infraestruturas de transporte, com foco nos desafios à sua implementação no Brasil. Foram analisados estudos de caso internacionais nos modais ferroviário, rodoviário e de pontes, identificando aplicações em fases de projeto, execução, operação e manutenção. Observam-se benefícios como redução de custos, eliminação de retrabalho e aumento da eficiência, com o uso de tecnologias como nuvem de pontos, integração BIM-GIS e modelagem 4D/5D. No entanto, barreiras como o alto custo inicial, a falta de padronização e a escassez de profissionais capacitados ainda dificultam sua adoção. A análise de cursos superiores no Brasil indica inserção limitada do BIM na graduação, embora cursos de pós-graduação especializados já existam. Conclui-se que políticas públicas, capacitação técnica e padronização são fundamentais para ampliar a adoção do BIM em transportes no país.

1. INTRODUÇÃO

A implementação do *Building Information Modeling* (BIM) no Brasil tem recebido significativa atenção, especialmente após a publicação do decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020, que estabelece um cronograma em três fases para a adoção do modelo no país. A atual fase teve início em 1° de janeiro de 2024 e passa a incluir a estimativa de custos e o controle da execução de obras nos modelos BIM. A terceira e última fase, prevista para 2028, deverá incorporar o uso do BIM no gerenciamento e a manutenção das infraestruturas.

O BIM, além de constituir uma modelagem digital, possibilita a representação e o compartilhamento de informações de forma coordenada entre os diferentes membros de uma equipe multidisciplinar. Dessa maneira, estabelece uma base de dados confiável para auxiliar a tomada de decisão e viabiliza um ambiente integrado para a operação e manutenção da infraestrutura (Autodesk, 2015).

Durante as fases de projeto e construção, a utilização do BIM permite a visualização antecipada de um modelo digital da infraestrutura, facilitando a colaboração entre os diferentes profissionais envolvidos e possibilitando a avaliação dos espaços para mitigar conflitos, erros e omissões no projeto. Além disso, a pré-visualização do modelo viabiliza a quantificação precisa dos materiais necessários, resultando em uma análise de custos com antecedência (Costin et al., 2018).

Do mesmo modo, o modelo BIM possibilita a atualização contínua das modificações realizadas ao longo da construção, fornecendo uma base de dados precisa e atualizada para o gerenciamento e a operação da infraestrutura (Sacks et al., 2021). No entanto, desafios como a escassez de mão de obra especializada, a falta de padronização e o elevado investimento inicial ainda representam obstáculos à implementação do BIM (Gou et al., 2022).

É evidente que as potencialidades do BIM podem trazer benefícios para a construção civil, sobretudo para os clientes que, em infraestruturas de transporte, correspondem majoritariamente ao setor público. Nesse contexto, políticas e regulamentos governamentais podem atuar como incentivo à adoção do BIM em projetos e na gestão de infraestruturas viárias, além de contribuir para a criação de um ambiente favorável ao desenvolvimento de novas tecnologias (Belay, 2021).

Diante desse cenário, este artigo apresenta uma investigação, por meio de revisão de literatura, da implementação do BIM em infraestruturas de transporte em diferentes países. Adicionalmente, foram analisados os cursos de ensino superior na área de transportes no Brasil que incorporam a metodologia BIM em suas disciplinas. A metodologia adotada e os resultados obtidos são detalhados nos tópicos a seguir.

2. METODOLOGIA

Com objetivo de investigar a aplicação do BIM em infraestruturas de transportes em diferentes países, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A busca de artigos foi conduzida na base Science Direct, utilizando as palavras-chave implementation, management e asset performance, em combinação com Building information modelling e Transportation infrastructure.

A metodologia desta revisão de literatura baseia-se no Protocolo PRISMA (“Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses”) para conduzir a análise. Inicialmente, foram identificados 221 artigos, dos quais 124 eram duplicados. Após a remoção das duplicatas, os 97 artigos restantes foram

submetidos à triagem inicial com base na leitura dos títulos e resumos. Nessa etapa, foram selecionados estudos que abordassem a aplicação do BIM em infraestruturas de transportes de forma aplicada. Os artigos que se concentravam em revisões de literatura ou tratavam o tema de forma empírica foram excluídos. Foram selecionados para leitura integral dos textos 17 artigos.

Outro levantamento realizado analisou a grade curricular de cursos de engenharia de transportes e áreas correlacionadas, identificando disciplinas que abordam a aplicação do BIM para infraestrutura de transporte no Brasil. A investigação foi conduzida por meio de pesquisas exploratórias em mecanismos de busca e da análise dos planos de ensino disponibilizados pelas coordenações dos cursos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os artigos selecionados fornecem um panorama sobre a aplicação do BIM em infraestruturas de transportes na Europa, na Ásia, no Marrocos e nos Estados Unidos, evidenciando o modal rodoviário como o mais recorrente nos estudos de caso analisados.

A China destacou-se como país com maior número de publicações (3), sendo duas publicadas em 2019, com foco em infraestruturas de túneis e pontes, e uma em 2020, voltada ao setor ferroviário. A Itália foi o país europeu com maior representatividade (2), com uma publicação em 2019 sobre ferrovias e outra, em 2020, relacionada a rodovias. Nos Estados Unidos, os estudos selecionados abordaram tanto políticas de implementação do BIM no estado de Indiana quanto aspectos ligados à infraestrutura de pontes.

Além dos Estados Unidos, na Suécia, Itália e Inglaterra foram citadas iniciativas governamentais para implementação do BIM no país (Gou et al., 2022; Li; Stephens; Ryba, 2014; Lindblad; Guerrero, 2020; Pasetto et al., 2020). Em particular, o papel das organizações públicas na adoção do BIM na Suécia será detalhado posteriormente neste tópico.

Além disso, o governo de Hong Kong foi citado por tornar obrigatória a utilização do BIM em projetos públicos com orçamento superior a 30 milhões de dólares (Shi et al., 2023).

3.1. Modal ferroviário

Shi et al. (2023) propõem uma abordagem baseada em BIM para a construção de uma nova estação de metrô em Singapura, localizada em uma área com edificações subterrâneas. Foram realizadas perfurações para coleta de dados do solo, convertidos em arquivos .npy e analisados por elementos finitos no software Plaxis 3D. Com isso, foi possível estimar os recalques e otimizar a instalação dos trilhos, reduzindo deformações.

Li, Stephens e Ryba (2014) relatam a aplicação do BIM 4D na estação Tottenham Court Road, em Londres. A modelagem 3D foi desenvolvida a partir de varredura a laser, e todo o ciclo de projeto e construção foi coordenado com o mesmo software para evitar perdas de dados. Um sistema de atualização contínua indicava aos profissionais os elementos novos, modificados ou removidos, permitindo controle mais preciso das etapas construtivas.

Na Bélgica, Nuttens et al. (2018) examinam a experiência da TUC RAIL, que adotou um banco de dados centralizado com elementos 2D e 3D por meio do Trimble Quadri, integrando diferentes fontes (nuvens de pontos, ortofotos, dados geológicos e cadastrais) via Novapoint Base. O uso desses modelos permitiu prever conflitos e aumentou a precisão, garantindo o cumprimento de prazos e orçamentos.

Por outro lado, na Itália, Pasetto et al. (2020) enfrentaram dificuldades devido à ausência de bibliotecas específicas para o modal ferroviário, o que comprometeu a interoperabilidade entre ferramentas, especialmente com o Civil 3D. Após modelagem de três traçados alternativos, a seleção do layout final considerou aspectos ambientais, custos e eficiência, mas a falta de componentes padronizados dificultou o desenvolvimento detalhado.

Na China, Wang e Zhang (2021) estudaram a aplicação do BIM em uma linha ferroviária subterrânea, com foco nas fases futuras de operação e manutenção. Foram definidos, ainda na etapa de projeto, critérios de classificação e codificação dos ativos, além do uso de “big rooms” e plataforma colaborativa baseada na nuvem Ali Cloud, facilitando a comunicação e a gestão integrada.

Lindblad e Guerrero (2020) destacam o papel estratégico de órgãos públicos na liderança da adoção do BIM, enquanto Gou et al. (2022), a partir de pesquisa nos Estados Unidos, identificaram quatro fatores essenciais: informação (produtos entregáveis e compartilhamento de dados), processo (gestão do ciclo de vida dos

ativos), tecnologia (interoperabilidade e formatos) e pessoas (capacitação e estrutura organizacional). A ausência de um equilíbrio entre esses fatores pode comprometer a maturidade BIM dos projetos.

3.2. Pontes

Nos Estados Unidos, Fanning et al. (2014) compararam a construção de duas pontes no Colorado: uma utilizando ferramentas BIM (Pecos Street over I-70) e outra sem essa tecnologia (Fort Lyon Canal Bridge). Embora o uso do BIM tenha exigido investimento inicial elevado, os resultados demonstraram redução do cronograma, eliminação de retrabalhos e economia de cerca de 5% nos custos totais da obra.

Buscando otimizar a manutenção e o gerenciamento de pontes, Wan et al. (2019) propuseram um sistema baseado em BIM integrado ao Sistema de Informação Geográfica (SIG), resultando em uma plataforma Web-BIM leve e acessível. O sistema, ao eliminar a dependência de softwares pesados, facilitou a colaboração entre usuários e melhorou a detecção de defeitos estruturais.

Na Índia, Rajadurai e Vilventhan (2022) aplicaram um modelo BIM-GIS para apoiar a realocação de serviços públicos em projetos viários. Utilizando arquivos CAD 2D fornecidos por agências públicas, o modelo permitiu a identificação antecipada de conflitos, mitigando atrasos e otimizando o planejamento das obras.

3.3. Modal Rodoviário

Khalil, Mohamed e Smail (2021) aplicaram ferramentas BIM no projeto de requalificação de um trecho rodoviário de 20 km no Marrocos. Utilizaram o Civil 3D para modelagem e o Robot Structural Analysis para cálculo de muros de contenção, além de simulações 3D para planejamento e controle do fluxo de caixa. Os autores consideram os resultados positivos, especialmente em um contexto de baixa adoção do BIM no país.

Na Coreia do Sul, Jang e Kim (2022) desenvolveram malhas computacionais para otimizar recursos na construção de túneis acústicos em Incheon, utilizando o Rhino 3D. Contudo, a base de dados foi insuficiente para alimentar algoritmos de aprendizado de máquina com eficácia.

Biancardo et al. (2020) compararam abordagens de modelagem viária com OpenSCAD, Rhinoceros e Civil 3D, concluindo que o Rhinoceros oferece suporte compatível com aplicações BIM, similar às ferramentas tradicionais de projeto. Enquanto em Nemea, Grécia, Tsikas, Giavi e Chassiakos (2024) utilizaram o Revit para modelar o anel viário da cidade com alto nível de detalhamento e análises de custo, embora tenham enfrentado dificuldades na adaptação ao relevo e sobreposição de camadas do pavimento.

Na Espanha, Aranda et al. (2021) criaram um modelo BIM para definir o traçado ideal de uma estrada em região montanhosa, considerando sombreamento e formação de gelo. A interoperabilidade foi garantida pelo uso do formato IFC. Adicionalmente, Slobodchikov et al. (2019), na Noruega, desenvolveram um aplicativo para calcular impactos ambientais diretamente em modelos BIM. O estudo apontou as máquinas de terraplanagem como principais fontes de emissões em uma rodovia de quatro faixas.

Ding e Liao (2019), por sua vez, abordaram a construção do túnel Kinmen, na China, com o desenvolvimento de uma biblioteca BIM específica e uma plataforma integrada para gerenciamento de dados geológicos e processos construtivos, que também serve como base para operação e manutenção da infraestrutura.

4. RESULTADOS ANALÍTICOS DA RSL

Os estudos analisados apontam uma predominância da aplicação do BIM em infraestruturas rodoviárias, com destaque para a definição de traçados, interoperabilidade entre componentes e comparações entre softwares de modelagem. Em diversos casos, também foram considerados aspectos geológicos do terreno.

No modal ferroviário, o BIM foi adotado desde o projeto até a operação e manutenção, sobretudo em linhas subterrâneas, onde a integração entre aspectos geotécnicos e cronogramas de obra é fundamental (Li; Stephens; Ryba, 2014; Shi et al., 2023). Um dos principais entraves nesse setor é a ausência de bibliotecas padronizadas, como destacado por Pasetto et al. (2020). Para superar essa limitação, a TUC RAIL desenvolveu um banco de dados próprio com elementos 2D e 3D no Trimble Quadri (Nuttens et al., 2018).

Diversas tecnologias foram aplicadas nos estudos revisados: nuvens de pontos (Li; Stephens; Ryba, 2014), monitoramento de construção (Wang; Zhang, 2021), integração BIM-GIS (Rajadurai; Vilventhan, 2022), simulações numéricas (Shi et al., 2023) e plataformas Web-BIM para inspeção e manutenção (Wan et al., 2019). Modelos 4D e 5D também foram usados para incorporar dimensões temporais e estimativas de custos.

Os benefícios mais recorrentes incluem redução de custos, eliminação de retrabalho e maior precisão no planejamento, potencializados pelo uso de plataformas colaborativas como Trimble Quadri e Ali Cloud (Nuttens et al., 2018; Wang; Zhang, 2021). Além disso, a implementação do BIM demonstrou acelerar prazos de entrega e aumentar a eficiência global dos projetos. Em contrapartida, os principais desafios referem-se ao alto custo de implantação, incompatibilidades entre softwares, formatos não padronizados e escassez de profissionais qualificados, como discutido por Gou et al. (2022).

Regionalmente, países como China, Estados Unidos e membros da União Europeia apresentam políticas mais maduras e estruturadas para adoção do BIM, ao contrário de países como Marrocos e Índia, onde a aplicação ainda é incipiente. Essa diferença institucional se reflete diretamente na quantidade e qualidade dos estudos de caso analisados.

5. PRESENÇA DO BIM NOS CURSOS DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES NO BRASIL

A falta de conhecimento técnico é apontada como um dos principais entraves à adoção do BIM. Wang e Zhang (2021) destacam a baixa proficiência das equipes como um desafio crítico no desenvolvimento de projetos. Da mesma forma, a empresa TUC RAIL enfrentou limitações similares e, para superá-las, implementou treinamentos internos e criou manuais e fluxos de trabalho específicos (Nuttens et al., 2018).

No Brasil, foram identificados 24 cursos relacionados à área de transportes que abordam, em diferentes níveis, a metodologia BIM: 8 de graduação, 13 de pós-graduação, 1 MBA, 1 especialização e 1 tecnólogo. Entre eles estão cursos de Engenharia de Transportes, Engenharia Ferroviária, Infraestrutura de Transportes, Engenharia de Pontes e Viadutos, entre outros.

A distribuição regional revela maior concentração no estado de São Paulo (4 cursos), seguido por Minas Gerais (3) e outros estados com 1 ou 2 ofertas. Cinco cursos são oferecidos em formato online.

A instituição privada EBPÓS se destaca por integrar o BIM de forma transversal nos programas de pós-graduação em Infraestrutura de Transportes, Engenharia Ferroviária e Engenharia de Pontes e Viadutos. No ensino superior público, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e o CEFET-MG oferecem disciplinas específicas sobre BIM.

Na Unicamp, a temática é tratada na disciplina obrigatória “Projeto e Construção de Estradas” e em eletivas como “Computação Gráfica Avançada e Modelagem 3D” e “IPD – Integrated Project Delivery”. Já no CEFET-MG, a disciplina “Projetos Viários Automatizados” é ofertada a alunos que tenham cursado conteúdos como Topografia, Geoprocessamento e Projetos Viários. Em ambas as instituições, destaca-se o uso do software Civil 3D, da Autodesk, como ferramenta principal para aplicação prática dos conteúdos.

6. CONCLUSÃO

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) revelou que o BIM tem sido amplamente empregado nas diversas fases dos projetos de infraestrutura de transportes, desde o planejamento do traçado até a gestão e manutenção de ativos. Rodovias e ferrovias foram os modais mais recorrentes nos estudos analisados, enquanto pontes, apesar de sua importância e do avanço do BrIM (Bridge Information Modeling), foram menos representadas.

Os principais benefícios apontados incluem redução de retrabalhos, maior precisão na estimativa de prazos e custos, e melhoria na comunicação entre equipes, especialmente quando apoiada por plataformas colaborativas. Contudo, os desafios mais citados foram o alto custo de implementação, a falta de padronização nos formatos de arquivos e softwares, e a carência de profissionais capacitados.

No Brasil, o mapeamento identificou 24 cursos voltados à infraestrutura de transportes com inserção do BIM — majoritariamente em níveis de pós-graduação. Apenas duas instituições públicas oferecem disciplinas sobre BIM em seus cursos de graduação, refletindo ainda uma inserção incipiente no ensino superior. Por outro lado, a presença de cursos especializados e o uso de ferramentas como o Civil 3D demonstram uma tentativa de alinhamento com as demandas do mercado.

A análise também evidenciou que a adoção do BIM está mais consolidada em países com regulamentações específicas e políticas públicas bem definidas, como China, Estados Unidos e nações europeias. Em

contraste, países como Marrocos e Índia enfrentam maior dificuldade de implementação. Esses resultados reforçam a necessidade de investimentos em capacitação, normalização e fomento à pesquisa aplicada como caminhos para ampliar a adoção do BIM no setor de transportes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMMAR, Ashtarout; DADI, Gabriel; NASSEREDDINE, Hala. Transportation asset data management: BIM as a holistic data management approach. In: Construction Research Congress 2022. 2022. p. 208-217.

ARANDA, José Ángel et al. Minimizing shadow area in mountain roads for improving the sustainability of infrastructures. Sustainability, v. 13, n. 10, p. 5392, 2021.

AUTODESK. How BIM Changes the game for transportation. Informed Infrastructure White Paper, 2015. Disponível em: www.informedinfrastructure.com. Acesso em: 5 set. 2022.

BELAY, Solomon et al. Comparison of BIM adoption models between public and private sectors through empirical investigation. Advances in Civil Engineering, v. 2021, p. 1-13, 2021.

BIANCARDO, Salvatore Antonio et al. Integration of BIM and procedural modeling tools for road design. Infrastructures, v. 5, n. 4, p. 37, 2020.

COSTIN, Aaron et al. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure–Literature review, applications, challenges, and recommendations. Automation in construction, v. 94, p. 257-281, 2018.

DING, H., LIAO, J. Design and Research of Tunnel Engineering Information Platform Based on BIM Technology. Tunnel Construction, v. 39, Issue 0, p. 60-68, 2019.

FANNING, Blaine et al. Implementing BIM on infrastructure: Comparison of two bridge construction projects. Practice periodical on structural design and construction, v. 20, n. 4, p. 04014044, 2014.

GUO, Xingzhou et al. Case study of building information modeling implementation in infrastructure projects. Transportation research record, v. 2676, n. 2, p. 663-679, 2022.

JANG, Do-Jin; KIM, Sung-Ah. Optimization design method for noise barrier tunnel junction on merging lanes using quad meshes. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, v. 21, n. 2, p. 211-223, 2022.

KHALIL, Idrissi Gartoumi; MOHAMED, Aboussaleh; SMAIL, Zaki. Building Information Modeling for rural road design: a case study. In: 2021 16th international conference on electronics computer and computation (ICECCO). IEEE, 2021. p. 1-7.

LI, Yazhe; STEPHENS, Jeff; RYBA, Aleksandra. Four-dimensional modelling on Tottenham court road station, London, UK. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. Thomas Telford Ltd, 2014. p. 33-40.

LINDBLAD, Hannes; GUERRERO, Jacob Rudolphsson. Client's role in promoting BIM implementation and innovation in construction. Construction management and economics, v. 38, n. 5, p. 468-482, 2020.

MOURAD OUZZANI, Hossam Hammady, Zbys Fedorowicz, and Ahmed Elmagarmid. Rayyan — a web and mobile app for systematic reviews. Systematic Reviews (2016) 5:210, DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4.

NEATH, Stephanie; HULSE, Rod; CODD, Andy. Building information modelling in practice: transforming Gatwick airport, UK. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. Thomas Telford Ltd, 2014. p. 81-87.

NUTTENS, Timothy et al. Using BIM models for the design of large rail infrastructure projects: key factors for a successful implementation. Building information systems in the construction industry, v. 77, 2018.

PASETTO, Marco et al. Integrated railway design using Infrastructure-Building Information Modeling. The case study of the port of Venice. Transportation research procedia, v. 45, p. 850-857, 2020.

SACKS, Rafael et al. Manual de BIM-: Um Guia de Modelagem da Informação da Construção Para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores. Bookman Editora, 2021

SHI, Chao et al. A BIM-based framework for automatic numerical modelling and geotechnical analysis of a large-scale deep excavation for transportation infrastructures. Intelligent Transportation Infrastructure, v. 2, p. liad012, 2023.

SLOBODCHIKOV, Roman et al. Implementing climate impacts in road infrastructure in the design phase by combining BIM with LCA. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. p. 012089.

SMART MARKET REPORT. The Business Value of BIM for Infrastructure 2017. Bedford, MA, 2017.

RAJADURAI, R.; VILVENTHAN, Aneetha. Integrating road information modeling (RIM) and geographic information system (GIS) for effective utility relocations in infrastructure projects. Engineering, Construction and Architectural Management, v. 29, n. 9, p. 3647-3663, 2022.

TSIKAS, Panagiotis; GIAVI, Rebeca; CHASSIAKOS, Athanasios. Optimizing Road Infrastructure Design using I-BIM Technology. In: EC3 Conference 2024. European Council on Computing in Construction, 2024. p. 0-0.

WAN, Chunfeng et al. Development of a bridge management system based on the building information modeling technology. Sustainability, v. 11, n. 17, p. 4583, 2019.

WANG, Guangbin; ZHANG, Zhujing. BIM implementation in handover management for underground rail transit project: A case study approach. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 108, p. 103684, 2021.Fulano, I.; J. Beltrano Neto e Sicrano Filho, K. (2016) Título do artigo. *Nome do periódico*, v. 19, n. 20, p. 107–110. DOI: 10.14295/transportes.v99i9.9999

CONSTRUÇÃO DE MODELOS VIRTUAIS A PARTIR DE MAPEAMENTOS TOPOGRÁFICOS POR DRONES: PRECISÃO E ACURÁCIA

Caroline da Luz Soares[1], **Daniel Sergio Presta Garcia**[1], **LeticiaDexheimer**[2]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Universidade Federal de Pelotas

RESUMO
Os métodos para obtenção de dados de terreno através de levantamentos topográficos podem ser realizados de maneira mais eficaz, atualmente, com o uso de ferramentas mais precisas para uso em projetos rodoviários. Atuando em conjunto com o levantamento por RTK, (*Real Time Kinematic*) o aerolevantamento por Drone é conhecido por ser um recurso novo a frente dos métodos tradicionais de coleta de dados topográficos que proporciona maior precisão, acurácia e agilidade em relação ao processamento de dados, levando a redução de erros manuais. Este artigo propõe analisar a precisão e acurácia dos levantamentos topográficos realizados por drones, para o uso rodoviário, através de um estudo de caso na BR-448, até o entroncamento com a RSC-240, no estado do Rio Grande do Sul. Os resultados mostram que os erros obtidos estiveram dentro dos parâmetros estabelecidos nas diferentes normas, indicando que o uso de drones é eficaz para uso em levantamentos de campo para projetos de rodovias.

1. INTRODUÇÃO

Os levantamentos topográficos são utilizados para representar a superfície e forma da Terra, da maneira mais próxima possível da realidade, a fim de possibilitar a construção de modelos topográficos digitais de terreno, fundamentais para conseguir as melhores possibilidades de traçado para uma rodovia. O surgimento de novas tecnologias proporciona o uso de ferramentas com maior precisão reduzindo o tempo no levantamento de campo.

Atualmente, existem diversos métodos para a representação de superfícies de terreno. O mais conhecido está relacionado ao levantamento de campo convencional, que envolve o uso de instrumentos e técnicas para medir ângulos, elevações e distâncias do terreno, utilizando estações totais eletrônicas e GPS (Sistema de Posicionamento Global). Já os métodos mais avançados, também conhecidos como levantamentos aerofotogramétricos, são definidos pela coleta de imagens de satélite de alta resolução, ortorretificadas e de escaneamento embarcado, onde os dados são coletados através de fotografias obtidas por veículos aéreos não tripulados (também conhecidos como VANTs ou drones). Estes dispositivos podem ser equipados com sensores que, dependendo do tipo, os dados obtidos podem ser: imagens – podendo ter sobreposições entre si, gerando um mosaico de imagens georreferenciadas, que formam a superfície de terreno, apresentada em um Modelo Digital de Elevação (MDE); e nuvem de pontos – onde a leitura dos alvos é feita por laser scanner.

O principal objetivo deste trabalho é analisar a precisão e acurácia dos levantamentos topográficos realizado por drone, para o uso rodoviário, através de um estudo de caso na BR-448, até o entroncamento com a RSC-240, no estado do Rio Grande do Sul.

2. MÉTODO

O trabalho foi realizado, conforme Neto (2019), em três etapas: (i) Levantamento topográfico por RTK; (ii) Levantamento topográfico por Drone; (iii) Cálculo dos erros para avaliar a acurácia e precisão do levantamento por drone. (iv) Resultados e discussão.

2.1. Levantamento Topográfico por RTK

Para realizar esse levantamento utiliza-se uma base fixada em solo, conectada diretamente ao sistema de satélites (Trindade, 2028). Junto com a base é utilizado o *rover*, coletor móvel de dados, e locações dos pontos recebidos pela transmissão de dados vindos através dos sinais de satélites (MundoGEO, 2018). Os procedimentos necessários são regulamentados pelas normativas NBR 13.133: Execução de levantamento topográfico – Procedimento (ABNT, 2021), que define os procedimentos para levantamentos topográficos; NBR 14.166: Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento (ABNT, 1998), que trata das condições exigidas para implantação e manutenção da rede de referências cadastral municipal; Lei nº 10.267 (2021), que indica as alterações referentes aos documentos necessários para comprovar as informações de registro de imóveis rurais; e Lei nº 89.817 (1984), que delimita as instruções reguladoras das normas técnicas de cartografia nacional, necessárias para execução de projetos (IBGE, 2008). O procedimento realizado está apresentado na Figura 1.

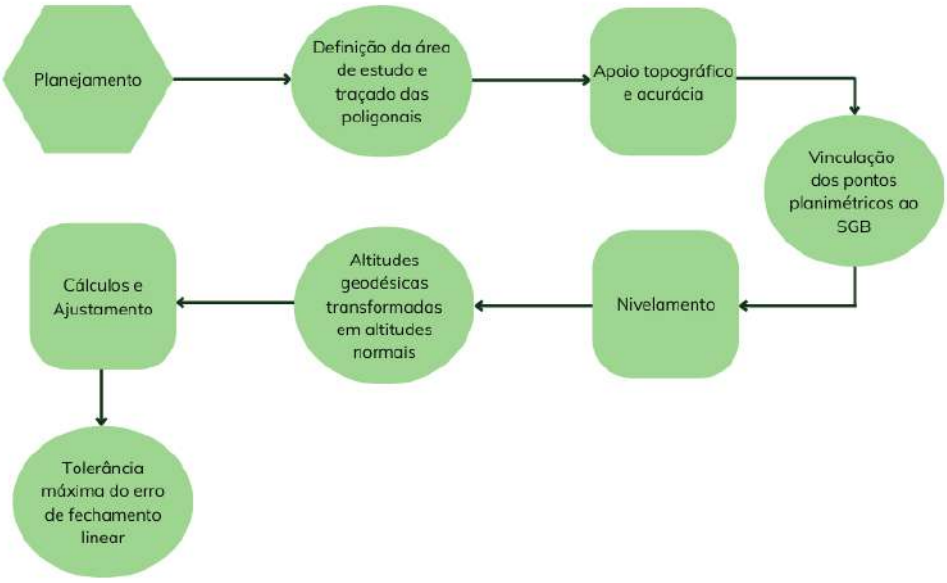


Figura 1: Fluxograma de execução para levantamento RTK

2.2. Levantamento Topográfico por Drone

Os aerolevantamentos são baseados nos processos de fotogrametria. Atualmente é possível utilizar equipamentos como os VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) ou Drones, que são dispositivos eletrônicos que possuem autonomia para realização de voos controlados de forma remota e sem nenhum piloto a bordo (Souza et al., 2020). O levantamento topográfico por drone consiste na definição de um plano de voo com alvos, para determinar as cotas de terreno da área a ser estudada (Rodrigues et al., 2029).

Os procedimentos necessários são regulamentados pelas normativas ISF-201 – Levantamento Aerofotogramétrico para Projetos Básicos de Ferrovias (DNIT, 2016a), que especifica os serviços necessários para execução de levantamento aerofotogramétrico para elaboração de projetos desenvolvidos somente na fase preliminar de projeto básico; ISF-202 – Levantamento Aerofotogramétrico para Projetos Executivos de Ferrovia (DNIT, 2016b), especifica os levantamentos aerofotogramétricos que devem ser realizados para elaboração de projetos executivos. O procedimento realizado está apresentado na Figura 2. climáticas .

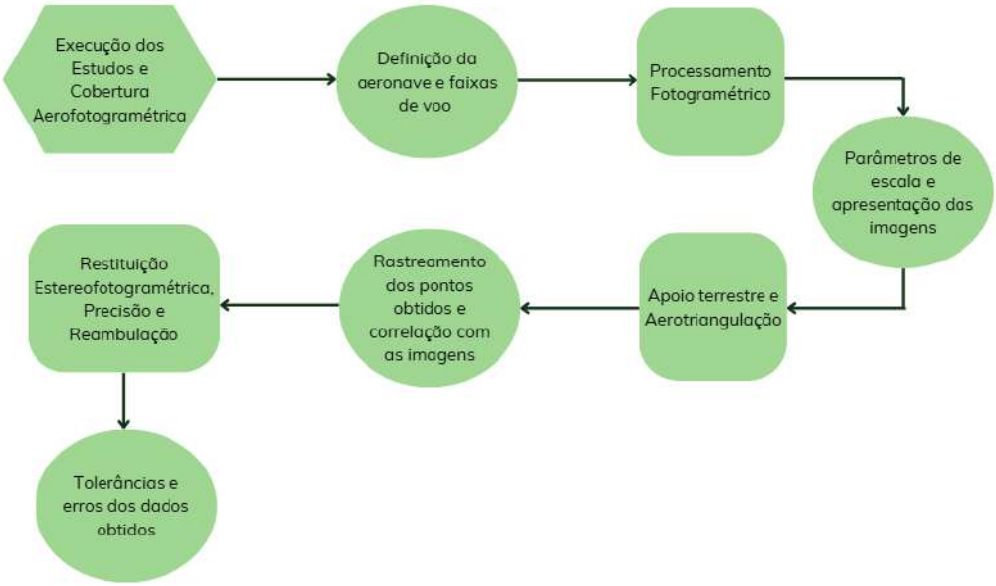


Figura 2: Fluxograma de execução para levantamento por drone

O sucesso do levantamento está relacionado ao planejamento das missões, onde são consideradas algumas condições climáticas, como velocidade de vento local para evitar instabilidade durante o voo, assim como

ausência de neblina ou chuva, que pode comprometer a visibilidade e desempenho dos equipamentos. Os critérios de altura e largura da banda de voo devem ser previamente estabelecidos, em levantamentos realizados com sensor laser ou câmera, a fim de garantir maior qualidade e confiabilidade dos dados capturados.

3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi feito considerando as instruções de serviços ISF-201 e ISF-202, além das metodologias descritas na NBR 13.133. Os levantamentos foram realizados na rodovia BR-448, até o entroncamento com a RSC-240 (Figura 3a). Primeiramente, foi implementado o sistema de georreferenciamento, com a definição do sistema de coordenadas para os pontos de controle necessários para o transporte de coordenadas realizado a partir de estações geodésicas por Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), para determinar o desnível entre dois pontos (Figura 3b). Foi estabelecido o o sistema UTM (Universal Transversa de Mercator), Datum SIRGAS 2000, no Fuso 22 S (Zona SS - Hemisfério Sul).



(a) Localização dos levantamentos



(b) Alvo de Ponto de controle

Figura 3: Estudo de caso - BR-448

As bases utilizadas no levantamento foram ocupadas por receptores GNSS no módulo estático, com registros realizados a cada 1”, máscara de elevação de 10º (ângulo que possibilita o rastreio do satélite), por aproximadamente 6h, para garantir a maior precisão possível. Os marcos e referências de nível foram alocados entre as estações PPP, distanciados a aproximadamente 500m entre si e implantados por receptores GNSS, porém no modo RTK por um período de 45’. Na sequência, foram calculadas as altitudes normais de todos os pontos levantados no projeto, levando em conta as cotas geométricas destes pontos (Guimarães, 2021).

Para que seja possível a obtenção de uma melhor precisão, foi implantada uma poligonal enquadrada entre os marcos e a rede de nível, em conjunto de pontos auxiliares utilizando o sistema de GPS Geodésico de dupla frequência. Os rastreios foram obtidos pelos receptores, fazendo com que o dispositivo recebesse uma frequência de sinal melhor, devido ao fato de que cada satélite emite frequências de sinais diferentes. Os dados dos pontos foram capturados pelo *rover* em RMS do sigma do valor, no tipo de “solução fixa”.

Como o estudo de caso se encontra na fase de projeto executivo, foi definido que, durante o planejamento e aquisição das imagens, o GSD limite (Ground Sample Distance - tamanho dos pixels que compõem a imagem) fosse de 10cm. Já o MDE foi gerado a partir do Laser Scanner aerotransportado, permitindo um nível de precisão mais elevado para coleta de dados topográficos, se comparado com levantamento tradicional.

As missões foram realizadas utilizando o Laser Scanner e a câmera RGB, numa altura de 239m em relação ao solo, a fim de atingir um GSD (Ground Sampling Distance) de 3 centímetros por pixel. Definiu-se uma largura de 100m para cada lado do eixo central e um comprimento máximo de banda de 4km, permitindo a identificação dos marcos ou RNs mais próximos do centro de cada banda para posicionar a base RTK. Para essa altura de voo, a largura da banda foi de pelo menos duas linhas de voo paralelas ao eixo principal, para

garantir a sobreposição longitudinal e transversal das imagens, tendo uma maior qualidade e confiabilidade dos dados capturados. Para as missões com sensor laser, foi adotada uma altura de voo de 85m, sendo necessário uma largura de banda igual a definida para a câmera RGB.

4. RESULTADOS

O processamento dos dados foi realizado de forma independente para gerar a ortoimagem e para os levantamentos a laser. As imagens capturadas foram processadas no software DJI Terra, onde todos os alvos previamente estabelecidos foram "apontados", permitindo a associação das imagens capturadas com as coordenadas obtidas por meio do RTK no solo. O objetivo foi utilizar os pontos de controle para realização de um ajuste fino, corrigindo erros existentes no momento da captura das fotografias. Após o processamento das imagens, o software correlacionou os apontamentos dos pontos de checagem, gerando um relatório com os erros totais identificados.

A ortoimagem gerada a partir desse processo apresenta erros específicos em cada ponto de controle e checagem, que foram analisados para calcular os erros globais e determinar a precisão do levantamento, conforme os critérios estabelecidos pela PEC. Para avaliar se o levantamento atende aos requisitos estabelecidos, é possível verificar o erro máximo planimétrico e altimétrico dos pontos de checagem em comparação com os limites definidos e valores permitidos conforme apresentados na Tabela 1. Pode-se observar na tabela que o levantamento atende aos limites estabelecidos, assim como supera a precisão estabelecida.

Tabela 1: Erros obtidos nos pontos de checagem, de controle e no processamento

	Erro máximo permitido	**Erro Calculado**		
		Pontos de checagem	**Pontos de Controle**	**Processamento a laser**
Planimétrico	0,20m	0,064m	0,124m	0,046m
Altimétrico	0,50m	0,088m	0,099m	0,084m
Padrão de exatidão cartográfico				
Planimétrico	0,10	0,039m	0,074m	0,0266m
Altimétrico	0,25	0,052m	0,059m	0,0519m

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo analisar a precisão e acurácia dos levantamentos topográficos realizados por drones, para o uso rodoviário, através de um estudo de caso na BR-448, até o entroncamento com a RSC-240, no estado do Rio Grande do Sul. Foram apresentadas as normas vigentes para os serviços de levantamentos topográficos estudados a fim de caracterizar as etapas necessárias para sua execução.

Os resultados mostram que os erros obtidos estiveram dentro dos parâmetros estabelecidos nas diferentes normas, mas principalmente que eles estiveram dentro dos limites de precisão satisfazendo as etapas necessárias para realização dos serviços. Pode-se inferir que o uso de drones para levantamentos topográficos com uso em projetos de rodovias se mostra eficaz.

Destaca-se que o levantamento por drone sempre estará atrelado a um levantamento RTK, devido a necessidade de relacionar os dados existentes do terreno, para servir como parâmetro de referência para o levantamento aéreo. A implantação da rede geodésica do sistema de georreferenciamento serviu como definição dos pontos de controle utilizados (também dados como alvos nas missões do levantamento aéreo), assim como os marcos geodésicos já existentes no local, os quais geraram a poligonal do nivelamento RTK. Portanto, apesar de serem serviços destintos, os dois tipos de levantamentos estão atrelados entre si.

As precisões obtidas pelos pontos do levantamento RTK foram calculadas considerando tolerância máxima e o erro linear obtido, estimando uma tolerância total do nivelamento. Após, foram definidos os critérios para a

coleta de dados que geram o Modelo Digital de Elevação (feito pelo Scanner), levando em conta os parâmetros do Programa de Exatidão Cartográfica, utilizado para precisão dos dados. Com a definição dos pontos de controle, foi feito o ajuste da precisão de dados utilizados para o levantamento por drone.

Conclui-se que os objetivos iniciais foram alcançados. Salienta-se que, em um primeiro momento, um levantamento por drone realizado de maneira individual não pode ser dado como eficaz para levantar os dados topográficos requeridos. Os processos e decisões a serem tomadas precisam levar em consideração os dados já existentes no terreno, sejam por pontos já conhecidos por redes topográficas ou equiparando com as informações oriundas de um levantamento tradicional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

José da Silva Souza -, D., Tadeu de Campos, J., Morais -, J., Martella, K., e Vicente Denser Pamboukian, S. (2020) LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS UTILIZANDO DRONES E GNSS.

Rodrigues, M. T., Rodrigues, B. T., Otani, T. M., Tagliarini, F. D. S. N., e Campos, S. (2019) LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO POR MEIO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT). ENERGIA NA AGRICULTURA, 33(4), 367–372. doi:10.17224/energagric.2018v33n4p367-372

Trindade, Edgard G. B. (2018) GPS, GNSS, RTK, PPK: O QUE SÃO E COMO FUNCIONAM? GEOSENSE, 2018. Disponível em: <https://geosense.com.br/2024/01/12/gps-gnss-rtk-ppk-o-que-sao-e-como-funcionam/> Acesso em: 15/11/2024.

Neto, Manoel S. (2019) ACURÁCIA E PRECISÃO NO MAPEAMENTO AÉREO COM DRONES. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://blog.droneng.com.br/acuracia-e-precisao/>. Acesso em: 17/10/2024.

MundoGEO (2018) COMPARAÇÃO ENTRE TOPOGRAFIA COM DRONES X TOPOGRAFIA TRADICIONAL. Disponível em: <https://mundogeo.com/2018/06/26/artigo-comparacao-entre-topografia-com-drones-x-topografia-tradicional/>. Acesso em: 17/10/2024.

ABNT (2021) NBR 13133: EXECUÇÃO DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO – PROCEDIMENTO. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

DNIT (2016a) ISF-201: LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO PARA PROJETOS BÁSICOS DE FERROVIA. DNIT, Brasil.

DNIT (2021b) ISF-202: LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO PARA PROJETOS EXECUTIVOS DE FERROVIA. DNIT, Brasil.

IBGE (2008) RECOMENDAÇÕES PARA LEVANTAMENTOS RELATIVOS ESTÁTICOS. IBGE, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_internet.pdf>. Acesso em: 26/09/2024.

Guimarães, Carlos A. (2021) NOVO APLICATIVO PARA CONVERSÃO DE ALTITUDES AMPLIA PRECISÃO E ACELERA CÁLCULOS. Agência de Notícias do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31291-novo-aplicativo-do-ibge-para-conversao-de-altitudes-amplia-precisao-e-acelera-calculos>. Acesso em: 19/08/2024.

Caroline da Luz Soares (00304130@ufrgs.br)
Graduanda pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Produção e Transportes
Av. Osvaldo Aranha, 99 - Farroupilha, Porto Alegre, RS, Brasil

Daniel Sergio Presta García (daniel.garcia@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Pós-Doutor pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Produção e Transportes
Av. Osvaldo Aranha, 99 - Farroupilha, Porto Alegre, RS, Brasil

Leticia Dexheimer (leticiadex@yahoo.com.br)
Universidade Federal de Pelotas
Pós Doutoranda na Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Produção e Transportes
Av. Osvaldo Aranha, 99 - Farroupilha, Porto Alegre, RS, Brasil

ESTRATEGIAS TECNOLÓGICAS EN LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y SELECCIÓN DE SISTEMAS DE CONTENCIÓN VEHICULAR EN COLOMBIA

Ricardo José Peña Lindarte, Samuel Fernando Mesa Giraldo, Aquiles Enrique Darghan Contreras, Oscar Alberto Alvarado Bello, Diego Fernando Muñoz Acosta
Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN
La integración tecnológica en fases tempranas del diseño vial es fundamental para tomar decisiones efectivas en infraestructura segura como el diseño, selección e instalación de sistemas de contención vehicular (SCV). Esto requiere una base metodológica sólida que considere insumos técnicos confiables, criterios de priorización espacial y un análisis del entorno para mitigar la severidad de los siniestros. Este artículo expone tres estrategias tecnológicas desarrolladas para enriquecer el proceso metodológico en el ámbito colombiano: (i) modelo de priorización de tramos viales basado en el método estadístico de muestreo hipercubo latino condicionado (CLHS); (ii) herramienta digital para la recolección de datos técnicos en campo; y (iii) modelo de diagnóstico del entorno vial y sus condiciones laterales, construido a partir del procesamiento de información geoespacial. Estas estrategias fortalecen la capacidad analítica y operativa en el diseño técnico de SCV, promoviendo intervenciones más eficientes, seguras y contextualizadas a las condiciones de las carreteras colombianas.

1. INTRODUCCIÓN

Según, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), los siniestros viales constituyen una crisis sanitaria mundial que pone en riesgo la vida de peatones, ciclistas y otros actores viales vulnerables, indicando que anualmente 1,19 millones de personas fallecen por esta causa. Por otra parte, la Comunidad Andina (2023) señala que para la vigencia 2023 se presentaron 178.707 siniestros viales en el espacio urbano, obedeciendo a un 88% del total y en zonas rurales se registraron 24.461 siniestros equivalente al 12% del total presenciados en la región andina, representados por Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú.

De esta forma, la seguridad vial se ha posicionado como una prioridad en las agendas de política pública y desarrollo sostenible, reconociendo su impacto directo en aspectos como la salud pública, la movilidad segura y la equidad territorial. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), más del 90% de las víctimas fatales por siniestros viales se producen en los países de ingreso medio y bajo, donde en muchos casos se tienen rezagos significativos en materia de seguridad y diseño de la infraestructura vial convirtiéndolo así en un factor de riesgo.

En este contexto, el enfoque del *Sistema Seguro* (OECD/ITF, 2008) propone un diseño vial que asuma el error humano como inevitable, buscando reducir sus consecuencias fatales; inspirado en iniciativas como *Visión Cero* de Suecia, este enfoque promueve la corresponsabilidad entre usuarios y autoridades en la gestión de la seguridad vial. Uno de sus pilares, la infraestructura segura, impulsa el concepto de vías perdonadoras, donde los Sistemas de Contención Vehicular (SCV) juegan un rol clave al redireccionar vehículos fuera de control, prevenir salidas de calzada y proteger a los usuarios vulnerables. En la actualidad se cuentan con sistemas de contención vial que están enfocados y diseñados para contener y retornar los vehículos a las vías cuidando la integridad de las personas que van dentro del vehículo (Moncada et al, 2020); en este caso existen los sistemas de contención con certificación internacional para carreteras y se caracterizan por un alto nivel de seguridad debidamente validado conforme a las normativas en vigor, por la eficacia de su comportamiento, por su permanente innovación tecnológica y por el estricto control de calidad durante la fabricación.

Colombia, como parte de sus compromisos frente al Plan Nacional de Seguridad Vial (PNSV) y en línea con el Plan Mundial Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2021-2030, ha venido avanzando en la incorporación del enfoque de seguridad vial proactiva en el diseño de su infraestructura. En este marco, se han adoptado instrumentos normativos como el Reglamento Técnico aplicable a Sistemas de Contención Vehicular (ANSV, 2022) y la Metodología para el Diseño, Selección e Instalación de Sistemas de Contención Vehicular (ANSV, 2023), los cuales proporcionan lineamientos y criterios técnicos para mejorar la seguridad vial en las zonas laterales de las vías desde el diseño. No obstante, persisten retos significativos en cuanto a la adecuación de las carreteras existente, especialmente en corredores de alta siniestralidad, topografía compleja y geometría deficiente.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló en el marco del Contrato Interadministrativo No. ANSV-028-2024, cuyo objeto es aplicar la Metodología para el Diseño, Selección e Instalación de Sistemas de Contención Vehicular (MDSISCV) en tramos viales piloto bajo la administración del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Durante el curso del proyecto se implementaron distintas estrategias con el fin de dar solución a los desafíos propios y que permitieran focalizar intervenciones orientadas a la reducción de muertes y lesiones graves en 120 kilómetros de vías nacionales. A continuación, se describe la metodología general para tres de las estrategias tecnológicas implementadas.

2.1. Aplicativo de priorización de tramos viales

Desarrollo de una estrategia para la identificación, caracterización y priorización de tramos viales, implementada mediante un aplicativo construido en R/Shiny con arquitectura modular. Esta herramienta integra un proceso completo de selección de variables, análisis de información georreferenciada para la evaluación de tramos viales y la priorización a través de un algoritmo de muestreo espacial condicionado (Minasny y McBratney, 2006). El estudio consideró inicialmente 10.183 kilómetros de la red vial nacional configurando 36 variables clave para su caracterización. Estas variables incluyeron aspectos técnicos tales como pendiente longitudinal, tipo de calzada; operacionales, así como el tránsito promedio diario (TPD) y velocidad de operación; y finalmente, de seguridad vial tales como puntos críticos de siniestralidad, accidentes fatales, entre otros criterios relevantes. La Tabla 1 resume la selección de variables de acuerdo con los principios del Sistema Seguro y las áreas de acción definidas en el Plan Nacional de Seguridad Vial.

Tabla 1: Clasificación de variables según las áreas de acción del PNSV.

Local	Número de variables
Infraestructura vial segura	25
Comportamiento seguro	3
Velocidades seguras	1
Gestión del conocimiento	4
Gobernanza	3

Fuente: propia

Para el proceso de priorización, se aplicó un muestreo mediante el algoritmo de *Hipercubo Latino Condicionado* (CLHS), técnica especialmente adecuada para conjuntos de datos con múltiples variables auxiliares. Este método consideró tanto las características de los tramos como su ubicación geográfica con opción de aplicar un muestreo para seleccionar un subconjunto representativo de tramos viales a priorizar según los pesos que asigne el tomador de decisiones.

2.2. Aplicación móvil para toma de información de infraestructura y zonas laterales

La recolección de información primaria es un proceso fundamental para el diagnóstico y correcta aplicación de la metodología de los SCV, de esta forma la recolección de información primaria requiere ser planeada con anticipación, y realizada por el personal idóneo con el fin de contar con los insumos correctos para el diagnóstico que permita su registro y gestión sobre una base cartográfica que corresponda con las características geométricas del área de influencia y del propio tramo vial, para realizar posteriormente la selección y el diseño de los SCV. Es así como se plantea la arquitectura de una aplicación móvil en cinco niveles para la recolección de información así:

- Nivel 1 - Información general: variables de caracterización y ubicación, particularmente se definen los segmentos homogéneos que se definan en el tramo vial sujeto a toma de información en campo.
- Nivel 2 - Caracterización de la infraestructura vial: para cada tramo segmento homogéneo definido se registran las condiciones referentes a la infraestructura vial tales como número de calzadas, ancho, sentido de circulación, bermas y estado del pavimento.
- Nivel 3 - Caracterización y ubicación de objetos y/o condiciones peligrosas: por cada segmento homogéneo, se identifican los objetos o condiciones de peligro, recolectando las características físicas de estos tales como ancho, longitud, altura y coordenadas.
- Nivel 4 – Inventarios de elementos de contención vehicular y señalización: levantamiento del inventario de señalización tales como señales verticales, horizontales y elevadas; así como los sistemas de contención vehicular existentes.

- Nivel 5 - Equipamientos y accesos vehiculares a predios: elementos que requieran de especial atención como centros de concentración de peatones o accesos en sitios críticos que afecten la instalación de SCV.

Adicionalmente, el aplicativo resulta operativo en condiciones de difícil cobertura, razón por la cual puede ser operada de forma offline, para este caso particular se mantiene la geolocalización activada con la finalidad de registrar las coordenadas de los puntos levantados, sin necesidad de tener cobertura o conexión a la red y una vez restablecida la conexión se realiza la sincronización con la base de datos remota. El prototipo de la APP y su versatilidad tecnológica se expondrá en la disertación de la ponencia.

2.3. Modelo de Diagnóstico de Entorno y Condiciones Laterales (DECLA)

Considerando el enfoque de diseño integral requerido para las carreteras y apoyado en procesamientos geoespaciales, el modelo DECLA está planeado para obtener una caracterización de las zonas laterales de la carretera, donde se involucren los elementos peligrosos, condiciones de riesgo presentes en los entorno adyacentes a la carretera y las características operacionales de la vía para así identificar posibles zonas de diseño de sistemas de contención vehicular tipo barrera longitudinal de acuerdo con lo establecido en la MDSISCV.

Dentro del proceso de diseño de barreras longitudinales, la metodología establece ciertos insumos necesarios, como volúmenes de tránsito y composiciones vehiculares, velocidades de operación, características geométricas de la vía, información topográfica de las zonas laterales, características de peligros potenciales, entre otros. Partiendo de esto, para la ejecución del modelo DECLA se definieron como elementos de entrada los siguientes:

- Productos fotogramétricos del Modelo Digital del Terreno (MDT) y ortofoto como referencia.
- Línea de silueta de la vía con coordenadas 3D de altura Z.
- Eje del corredor con atributos de TPD, composiciones vehiculares y velocidad de operación -V_{85}.
- Base de datos de elementos peligrosos o condiciones de riesgo georreferenciadas: nivel 3 del aplicativo de toma de información de campo.

Haciendo uso de herramientas de software libre SIG – QGIS, PostgreSQL/PostGIS y otras, se construyó una caja de herramientas (Toolbox) con una serie de algoritmos desarrollado principalmente en el lenguaje Python con el siguiente flujo de trabajo: el modelo inicia con la densificación de vértices de la silueta vial a intervalos de un metro, preservando los atributos operacionales. A partir del anterior resultado se generan en cada vértice secciones transversales ortogonales de 30 cm × 3 m como unidades de muestreo para el análisis geomorfológico. Se construye un plano 3D basado en la línea de silueta y posterior el buffer 3D lateral de 20 m, sobre el cual se calcula la diferencia con las pendientes del terreno natural mediante álgebra de mapas. Los valores resultantes se clasifican según la Tabla 35 de la MDSISCV y de la guía para el análisis de márgenes de carreteras (Valverde González, 2011), generando un ráster temático que codifica rangos de pendiente relevantes para la seguridad vial. A cada sección transversal se le asigna un valor estadístico representativo de las celdas analizadas del ráster, el cual se transfiere a los vértices densificados como base para definir un valor de coordenadas M, correspondiente al ancho lateral requerido según los criterios normativos. Estos valores se utilizan para generar una capa poligonal que representa las zonas de despeje laterales.

Simultáneamente, se identifican taludes críticos considerando dos condiciones: pendientes negativas respecto al plano de referencia y cambios altimétricos locales en el rango $\Delta h \geq 2$ m. De esta combinación se deriva una variable de gravedad del siniestro esperado denominada como *gravedad_talud*, clasificado según la MDSISCV en tres niveles: baja, moderada y alta. Finalmente, se realiza una intersección espacial entre las zonas de despeje generadas y los objetos de riesgo por ejemplo obstáculos fijos y taludes, identificando aquellos que requieren tratamiento. Entre las medidas sugeridas se incluye la instalación de SCV conforme a los criterios del reglamento técnico.

3. RESULTADOS

En el presente numeral se exponen los resultados obtenidos explicando lo relativo al aplicativo de priorización, donde se procesó una matriz de 274 sectores de tramos viales y 36 variables, gran parte de la información se

basó en la información suministrada por la Agencia Nacional de Seguridad Vial en los 22.000 km de carreteras a nivel Colombia donde se aplicó la metodología *International Road Assessment Programm (iRAP)*. Dentro de las variables más relevantes y que fueron seleccionadas se destacan la pendiente, la curvatura, el TPD, la velocidad de operación y el número de siniestros con fallecidos como se muestra en la Figura 1. Partiendo de ello, se seleccionó un conjunto de 14 tramos viales para evaluación y selección de los tramos piloto definitivos.



Figura 1: Aplicativo de priorización de tramos, los puntos en color rojo indican los centroides de cada tramo vial.

En cuanto al modelo *DECLA* se presenta una muestra de los resultados obtenidos con el modelo aplicado a la carretera sector Peaje Cocorná – Cruce Ruta 45, considerando como insumos:

- TPD: 6.407 vehículos mixtos.
- Composición vehicular: 59% autos, 6% buses, 18% camiones de dos ejes, 5% camiones de 3 y 4 ejes, 4% camiones de 5 ejes, y 8% camiones de más de 5 ejes.
- Velocidad de operación (V_{85}): 86.4 km/h para segmento con pendientes pronunciadas, y 74.9 km/h para segmento plano según las mediciones realizadas en campo y definición de tramos homogéneos.

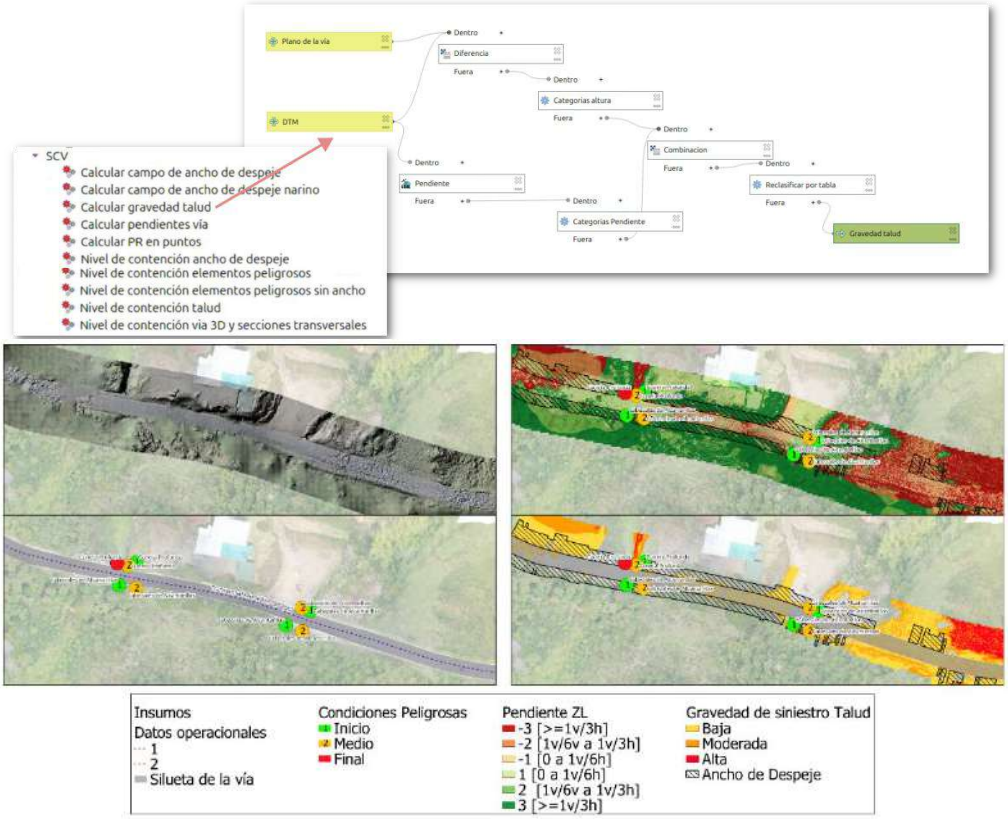


Figura 2: Estructura de los módulos de procesamiento y resultados de la aplicación sobre un tramo vial.

La Figura 2 presenta la caja de herramientas del modelo *DECLA*, desarrollada a partir de los insumos de fotogrametría y datos recolectados en campo, junto con una implementación gráfica en QGIS. La imagen superior izquierda muestra el MDT, mientras la inferior izquierda registra condiciones de riesgo identificadas en campo. Los resultados, imagen superior derecha, incluyen el análisis de pendientes transversales y la ubicación de obstáculos peligrosos. La imagen inferior derecha destaca el mapa temático de gravedad de siniestros por talud, clave para priorizar soluciones de contención vehicular según su nivel de riesgo.

4. CONCLUSIONES

El aplicativo de priorización se plantea como un insumo para los tomadores de decisiones de las diferentes entidades, la herramienta permite elegir las cantidades de muestras o sectores a analizar y variables que se considera pertinente incluir dentro de la priorización de acuerdo con el objetivo final que se requiera. Esta herramienta además tiene la opción de considerar la distribución espacial, de manera que se puede obtener un muestreo distribuido equitativamente a lo largo de todo el territorio o si se permite que las muestras obtenidas dependan solamente de las variables seleccionadas y puedan generar concentraciones en el territorio.

La integración entre la información recolectada en campo mediante fotogrametría aérea con aeronave pilotada a distancia, aplicación móvil, y los modelos digitales del terreno y de superficie permiten obtener un acercamiento preciso de la realidad frente a los objetos peligrosos; y las características geométricas de las carreteras. Es así como la aplicación del modelo *DECLA* está sujeto a la calidad de la información y recurre al uso de tecnologías que permitan obtener información precisa tanto de la vía como del terreno circundante, de manera que al generar el modelo digital del terreno sea lo más preciso posible.

Finalmente, se plantea que el modelo de diagnóstico del entorno y de las condiciones laterales puede consolidarse, tras un proceso riguroso de mejora, optimización y validación, como una herramienta estandarizada de apoyo para los diseñadores que apliquen la MDSISCV en Colombia. Aunque la selección de las zonas de intervención continúa dependiendo del criterio técnico del diseñador, los resultados obtenidos con esta herramienta ofrecen insumos relevantes para identificar condiciones del entorno que, en muchos casos, no son fácilmente detectables mediante trabajo de campo o metodologías convencionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo técnico de la Universidad Nacional de Colombia por el respaldo institucional y metodológico brindado durante el desarrollo del estudio, así como a la Agencia Nacional de Seguridad Vial por su apoyo técnico y estratégico en el marco del Contrato Interadministrativo No. 028 de 2024, suscrito entre ambas entidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2023) *Metodología para el Diseño, Selección e Instalación de Sistemas de Contención Vehicular* (2ª. ed.). Bogotá D.C.: Centro Nacional de Proyectos CNP S.A.S.

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2023) *Metodología para el diseño de zonas laterales* (1ª. ed.). Bogotá D.C.

Comunidad Andina (CAN) Secretaría General (2023) *ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN LA COMUNIDAD ANDINA – CAN en Cifras*.

ITF (2016), *Zero Road Deaths and Serious Injuries: Leading a Paradigm Shift to a Safe System*, OECDPublishing, Paris. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/9789282108055-en

Minasny, B., A.B. McBratney (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Comput. Geosci*., v. 32, p. 1378-1388. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009

Ministerio de Transporte. (2022) *Resolución 20223040044065 de 2022. Por la cual se adopta el reglamento técnico aplicable a sistemas de contención vehicular*.

Ministerio de Transporte. (2022) *Resolución 20243040022485 de 2024. Por la cual se adopta la Metodología para el Diseño, Selección e Instalación de Sistemas de Contención Vehicular y se dictan otras disposiciones*.

Moncada Villa, P.; L. Yepes Tejada y D. Jaimes Mejía (2020) *Estudio de viabilidad para la migración de los sistemas de contención vial actual en Colombia según la norma invias 730 del 2012, a los sistemas de seguridad internacionalmente certificados (ensayos de choque a escala real) para implementar en las carreteras de cuarta generación 4G*. Disertación (especialización). Especialización en Gerencia de Proyectos. Corporación Universitaria Minuto de Dios.

Organización Mundial de la Salud. (2023) *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2023*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

Valverde González G. (2011) *Guía para el análisis y diseño de seguridad vial de márgenes de carreteras*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Ricardo José Peña Lindarte (rjpenal@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Samuel Fernando Mesa Giraldo (femesagi@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Aquiles Enrique Darghan Contreras (aqedarghanco@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Oscar Alberto Alvarado Bello (oaalvaradob@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

Diego Fernando Muñoz Acosta (dimunoza@unal.edu.co)
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Carrera 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia.

INVESTIGAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM CURVAS HORIZONTAIS POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS COM ÊNFASE NA SEGURANÇA VIÁRIA

Alison Kaio Dantas Pereira[1], **Veronica Teixeira Franco Castelo Branco** [1], **Wellington Lorran Gaia Ferreira**[2]
[1] Universidade Federal do Ceará, [2] Universidade Federal Rural do Semiárido

RESUMO
Este estudo tem o objetivo avaliar a variação dos coeficientes de atrito do pavimento numa curva horizontal simples. A análise do coeficiente foi feita considerando 11 pontos numa curva horizontal, tanto nas tangentes quanto no centro. Para quantificar o atrito, foi utilizada uma correlação entre o Volume Médio dos Picos (V_{mp}) e a Densidade dos Picos (S_{pd}), anteriormente descrita na literatura. Além disso, a técnica de análise de imagens foi utilizada para obter esses parâmetros. Os resultados indicaram que o coeficiente de atrito varia de acordo com a localização da via, com diminuição de aproximadamente 13% nas zonas mais propícias a frenagens e rotações dos pneus, como na entrada e no centro da curva. Esse estudo evidencia a necessidade de avaliar o atrito como um indicador dinâmico, que varia dependendo das ações do condutor e da localização da estrada, e pode ser utilizado em estratégias de melhoria da segurança viária.

1. INTRODUÇÃO

A segurança viária é influenciada por vários fatores, incluindo elementos de conceção geométrica, condições ambientais e comportamento humano. Entre estes, as caraterísticas da superfície do pavimento representam um componente importante, uma vez que podem influenciar diretamente a segurança dos veículos e usuários. Superfícies de pavimento mais suaves podem melhorar a sensação de conforto dos condutores, mas estão normalmente associadas a um menor atrito pneu-pavimento, o que aumenta a probabilidade de sinistros relacionados a derrapagem (Xie *et al.*, 2019). Nos primeiros anos de vida, as superfícies dos pavimentos apresentam caraterísticas de textura favoráveis com relação a resistência a derrapagem. No entanto, estas propriedades deterioram-se gradualmente ao longo do tempo devido a fatores ambientais, ações relacionadas com o tráfego, entre outros. Tais alterações são particularmente perceptíveis em segmentos da via onde os condutores realizam frequentes acelerações, desacelerações e rotações de pneus, como nas curvas horizontais e nas tangentes que as antecedem. Nestas zonas, o polimento dos agregados tende a ocorrer, resultando na redução da rugosidade da superfície, o que, por sua vez, diminui o atrito e aumenta o risco de escorregamento dos veículos (Kumar e Gupta, 2021).

Na investigação sobre segurança viária, estudos estimam geralmente os coeficientes de atrito do pavimento com base nos valores citados em investigações anteriores e normas específicas para geometria de vias. Por exemplo, as pesquisas de Chen *et al.* (2018) e Santos *et al.* (2022) examinaram as ocorrências de acidentes de trânsito e a influência das caraterísticas geométricas da via - como o raio da curva e o comprimento da tangente - na probabilidade de acidentes. Os coeficientes de atrito adotados nestes estudos foram retirados da literatura e fixados em 0,90 e 0,80, respetivamente. Em contrapartida, normas como as publicadas pela AASHTO (2018) definem os coeficientes de atrito em termos de limiares críticos necessários para evitar o capotamento e o escorregamento do veículo, com valores tão baixos como 0,14. Além desses fatores, nas pesquisas que utilizam simuladores de direção nas investigações da segurança viária é comum a utilização de um coeficiente de atrito homogêneo para todo o percurso (Santos *et al.*, 2022). Embora essas estimativas sejam cientificamente fundamentadas, podem não refletir com precisão as condições de campo, levando a possíveis desvios dos cenários reais de desempenho. Essas análises reforçam a importância das medições de atrito na superfície do pavimento para garantir dados mais consistentes e confiáveis.

A investigação sobre as alterações de atrito ao longo das curvas horizontais continua a ser uma lacuna a explorar. Normalmente, o coeficiente de atrito é investigado como uma variável homogênea ao longo de um elemento geométrico mesmo com variações de velocidade do condutor e possível desgaste, como curvas (Choudhary *et al.*, 2024). Contudo, os estudos que investigam desgaste do pavimento mostram indícios de que as passagens dos veículos podem acelerar o processo de desgaste do pavimento e, como consequência, diminuir o atrito. Ma *et al.* (2025) analisaram a redução do atrito durante um processo de desgaste induzido. Apesar da pesquisa ter sido desenvolvida em laboratório, os autores identificaram uma mudança no coeficiente de atrito de 0,53 para 0,40 em pavimentos asfálticos novos e submetidos a 20 mil ciclos, respectivamente. Sobre estudos em campo nesta perspectiva, Yun *et al.* (2025) avaliaram trechos urbanos em pavimentos asfálticos e compararam o desgaste do pavimento em diferentes trilhas de uma mesma faixa. O atrito foi avaliado por meio

do equipamento T2GO e os autores identificaram que os coeficientes de atrito foram próximos de 0,60 e 0,40 para pavimentos secos e molhados, respectivamente. Além disso, os resultados indicaram uma redução de até 25% no coeficiente para as trilhas de roda dos veículos em comparação às demais.

Para quantificar o coeficiente de atrito de forma direta, em campo, alguns equipamentos são utilizados, como o *GripTester* e o Reboque de Resistência (Kogbara *et al.* 2016). Esses métodos são convencionais e estão relacionados com a resistência do pavimento ao rolamento dos pneus. Devido à dificuldade logística e custos operacionais desses equipamentos, a literatura trata sobre alternativas para quantificar o atrito por meio da análise de parâmetros de altura, volumétricos e espaciais da superfície (Zheng *et al.*, 2022). Nesse sentido, a técnica de aquisição de imagens para análise da fotogrametria é uma alternativa promissora para obter esses parâmetros e investigar correlações entre eles (Maia, 2020).

Pesquisas anteriores que identificaram as condições da superfície do pavimento como um potencial fator contribuinte para os sinistros de trânsito basearam-se em grande parte em coeficientes de atrito estimados ou careceram de uma análise abrangente da superfície. Com base nesses aspectos, este estudo tem como objetivo investigar a variação dos coeficientes de atrito do pavimento em uma única curva horizontal. Uma das principais caraterísticas distintivas desta investigação é a medição direta, no terreno, dos parâmetros da superfície do pavimento, combinada com a identificação de segmentos de curva que podem apresentar um risco elevado de escorregamento. Os resultados contribuem para uma melhor compreensão da distribuição do coeficiente de atrito ao longo de seções curvas de vias e oferecem uma contribuição importante para futuras investigações centradas na dinâmica da interação pneu-pavimento.

2. METODOLOGIA

2.1. Definição da Área de Estudo

A pesquisa foi realizada no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. A rodovia selecionada foi a BR-427. É uma estrada de pista simples de mão dupla, com largura de 3 metros por faixa. A curva escolhida tem um raio horizontal de aproximadamente 150 metros, com terreno relativamente plano e sem interferências geométricas. A trilha de roda selecionada para a medição do atrito foi a borda externa do desenvolvimento da curva à esquerda, escolhida devido ao maior desgaste causado pela pressão dos pneus (He *et al.*, 2021). A Figura 1 apresenta um mapa com a localização da curva e dos pontos de análise. Com base em estudos anteriores (Dhahir e Hassan, 2018), a curva foi dividida em sete zonas, das quais 11 pontos foram determinados para a medição do coeficiente de atrito (destacados em amarelo e rotulados de P1 a P11).

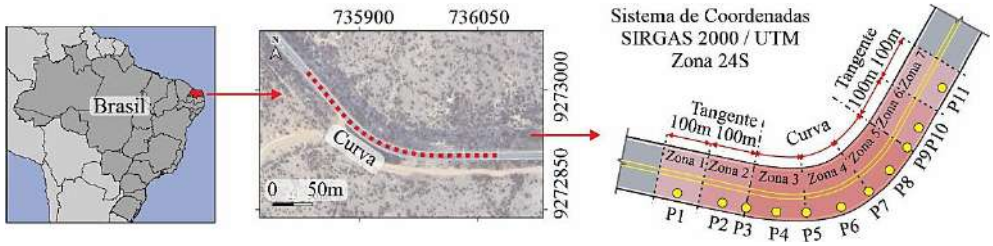


Figura 1: Localização do Estado do Rio Grande do Norte e descrição dos pontos de análise do coeficiente de atrito ao longo da curva horizontal avaliada no estudo.

2.2. Análise dos Parâmetros da Superfície do Pavimento

Para a obtenção dos parâmetros de superfície, a metodologia envolveu a aplicação de princípios de estereoscopia e fotogrametria, junto com a técnica de *Close-Range Photogrammetry* (*CRP*) para gerar imagens de superfície 3D (Kogbara *et al.*, 2018; Maia, 2020). Para o processamento dos dados foi utilizado o software *ReCap Photo 2025.1* (*Autodesk*). Posteriormente, as ferramentas *MeshLab 2025.7* e *MountainsMap Premium 10.3* foram empregadas para gerar mapas topográficos 3D e extrair os parâmetros de textura da superfície. Na Figura 2 é mostrado um fluxograma com as etapas para obtenção dos parâmetros da superfície.



Figura 2: Etapas para obtenção dos parâmetros da superfície do pavimento.

Para determinar o coeficiente de atrito, foi empregado o modelo matemático desenvolvido por Kogbara *et al.* (2018) (Equação 1). Os autores realizaram pesquisas aplicando a técnica de *CRP* e encontraram uma correlação de 0,75 entre os parâmetros "volume máximo de material limitado a 10% das alturas (V_{mp})", "densidade de pico superficial (S_{pd})" e o coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito definido neste estudo foi a média entre os valores mínimo e máximo da Equação 1.

$$0{,}155 + 1{,}404.V_{mp} + 1{,}092.S_{pd} < IFI_{50\,km/h} < 0{,}187 + 2{,}656.V_{mp} + 1{,}834.S_{pd} \quad (1)$$

O parâmetro V_{mp} refere-se ao volume de material que constitui a superfície numa média de 10% das alturas, medido em mm³/mm². Já o S_{pd} representa a densidade de picos por unidade de área (1/mm²). O desgaste do pavimento pode diminuir o V_{mp} devido ao polimento dos agregados. No entanto, o desgaste também pode alterar o ângulo dos picos, razão pela qual as alterações no S_{pd} devem ser cuidadosamente avaliadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta dois mapas que mostram o V_{mp} e o S_{pd} ao longo da curva avaliada. Os pontos intermédios, para além dos apresentados na Figura 1, foram obtidos por interpolação.

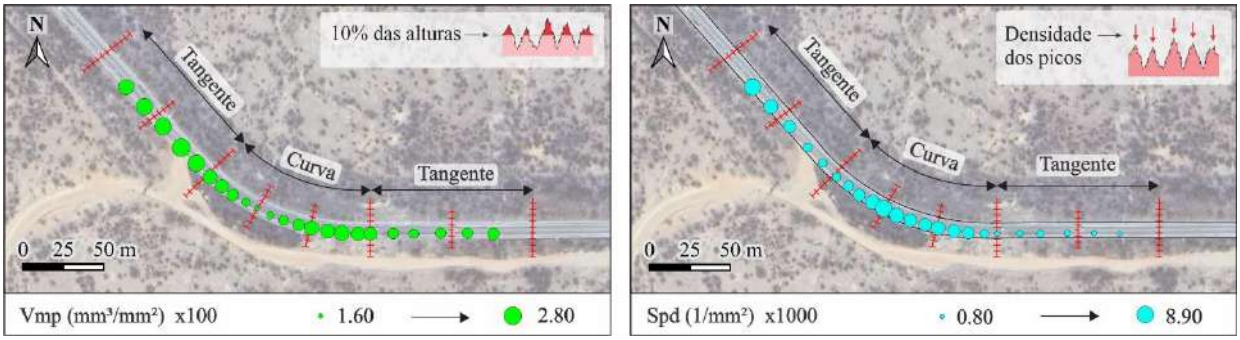
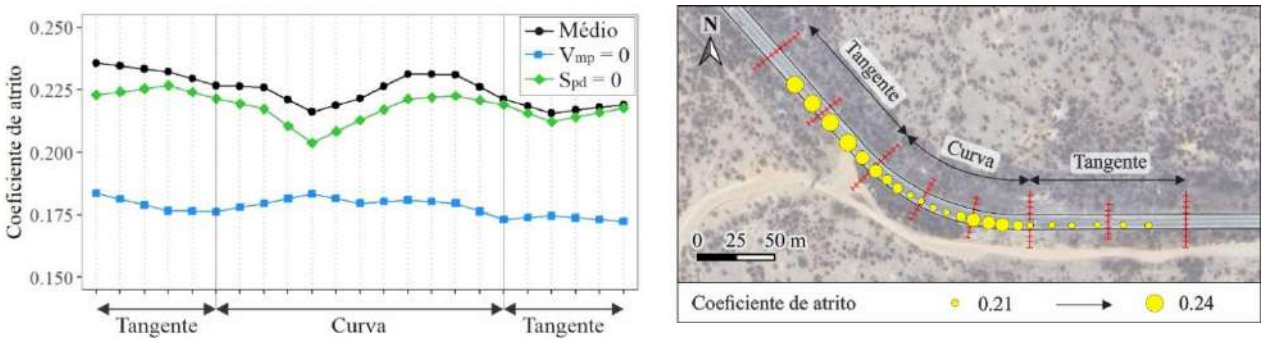


Figura 3: Volume do material de pico (V_{mp}) e densidade dos picos (S_{pd}) na curva horizontal.

Na Figura 3, observa-se que o V_{mp} é menor perto do centro da curva em comparação com as outras zonas. Estes resultados sugerem que pode ter ocorrido desgaste do pavimento nestes locais, levando a uma redução do volume limitada a 10% das alturas. Com relação ao S_{pd}, este tende a ser mais elevado no centro da curva em relação às tangentes, especialmente na zona central (Zona 4). No que se refere à relação entre S_{pd} e V_{mp}, Kogbara *et al.* (2018) não identificaram uma tendência clara entre estes dois parâmetros. No entanto, ambos foram considerados bons estimadores do coeficiente de atrito. Conclusões semelhantes foram observadas por Maia (2020) onde a correlação R^2 entre esses dois parâmetros foi relativamente baixa, cerca de 0,03. Apesar da literatura apontar correlações baixas entre o S_{pd} e o V_{mp}, os estudos que investigam desgaste do pavimento em laboratório indicam que o S_{pd} diminui à medida que os ciclos de rolagem aumentam, com valores de 24 ($x10^{-3}$) em pavimento asfálticos novos e de 18 ($x10^{-3}$) com 20.000 ciclos de desgaste, aproximadamente. Além disso, à medida que o desgaste supera 10.000, os valores referentes ao S_{pd} tendem a ser constantes (Zheng et al., 2022; Ma *et al.*, 2025). Neste estudo, o valor máximo do S_{pd} foi de 8,90 ($x10^{-3}$), abaixo dos citados na literatura para o desgaste referentes a 20.000 ciclos, como exemplo. Como não foi feita a análise do fluxo de veículos na estrada em função do tempo de uso, não foi possível comparar os valores desse parâmetro com os da literatura.

Na Figura 4a são mostrados os coeficientes de atrito nas tangentes e na curva. A linha preta representa o valor médio do coeficiente de acordo com a Equação 1. Já a linha verde é referente aos valores dos coeficientes de atrito com o S_{pd} igual a zero para todos os pontos, enquanto a linha azul representa os valores do coeficiente para o V_{mp} igual a zero nos pontos de análise. O objetivo para essa comparação é entender o peso de cada parâmetro para definir o atrito. Como observado na Figura 4a, o coeficiente de atrito é mais sensível ao V_{mp} em comparação ao S_{pd}, embora os estudos indiquem que esses dois parâmetros sejam importantes para quantificar o atrito, esses resultados das comparações da Figura 4a são essenciais para mostrar que, apesar do V_{mp} e do S_{pd} parecer inversamente proporcionais (Figura 3), o V_{mp} é mais preponderante para definir o atrito

da superfície. Apesar disso, Kogbara *et al.* (2018) afirma que o S_{pd} pode ser um bom indicador do atrito por introduzir o efeito da histerese na interface pneu-pavimento e, como consequência, aumentar o contato entre as duas superfícies. Na Figura 4b é mostrado um mapa com os pontos do coeficiente de atrito da superfície.



a) b)

Figura 4: a) Coeficiente de atrito médio, com Volume do material de pico (V_{mp}) = 0 e a densidade dos picos (S_{pd}) = 0 e b) coeficiente de atrito ao longo da curva horizontal.

Sobre o coeficiente de atrito apresentado na Figura 4b, observa-se que este segue uma tendência de aproximadamente 0,24 nas tangentes, diminuindo para 0,21 nas zonas iniciais e centrais da curva (Zonas 3 e 4), uma redução de 13%. Estas regiões estão particularmente sujeitas a frenagem e rotação de pneus devido à necessidade de ajustamento do veículo à geometria da curva. Uma pesquisa desenvolvida por Pereira *et al.* (2024), avaliou o comportamento do condutor em curvas horizontais reversas, os autores concluíram que eles tendem a diminuir a velocidade na primeira parte da curva. Além disso, as acelerações laterais mais acentuadas foram identificadas no centro da curva. Neste estudo, o coeficiente de atrito mostrou uma redução de 13% nas zonas citadas por Pereira *et al.* (2024), portanto, os resultados sugerem que a diminuição desse coeficiente pode ter relação com as ações dos condutores, principalmente com relação a frenagem e rotação dos pneus.

Ma *et al.* (2025) avaliaram a diferença entre os coeficientes de atrito em um trecho longitudinal de uma mesma faixa. Os autores identificaram que é possível ter reduções de atrito de até 25% na trilha de roda com relação às demais faixas. Esse estudo reforça a hipótese que o atrito pode ter diferentes valores dependendo do ponto de avaliação e não deve ser compreendido como um indicador homogêneo em toda a via. As análises deste estudo são importantes para mostrar que, além da diferença do atrito nas trilhas de roda, é provável que esse índice também tenha variações em trechos com frenagens e rotações dos pneus, como curvas horizontais, e pode caracterizar zonas na qual os condutores estão mais sujeitos a escorregamento e próximo a um sinistro. Em contraste com estudos anteriores, esta investigação teve como objetivo compreender como os parâmetros de superfície podem variar ao longo do mesmo alinhamento, especificamente em diferentes pontos de uma curva horizontal. Embora existam estudos relevantes na literatura, poucos levam em consideração variação do coeficiente de atrito como fator determinante na análise da segurança viária. Este estudo se diferencia dos demais por comparar dados de diferentes zonas dentro da mesma curva, comparando com potenciais comportamentos do condutor, como a frenagem e a rotação dos pneus (Pereira *et al.*, 2024), que contribuem para o desgaste do pavimento.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo indicam que tanto os parâmetros da superfície do pavimento como os coeficientes de atrito variam ao longo da mesma curva horizontal. A análise sugere que o comportamento do condutor - tais como a frenagem e a rotação dos pneus dentro da curva - podem contribuir para o desgaste da superfície, causando redução do atrito disponível, particularmente nos segmentos inicial e central da curva. Além desses resultados, este estudo é importante para mostrar que o coeficiente de atrito pode não ser um parâmetro homogêneo em toda a via, principalmente em curvas, onde o atrito está diretamente relacionado a estabilidade do veículo para que não ocorra escorregamento e, como consequência, risco ao sinistro. As análises mostram a necessidade de avaliar o comportamento do condutor nestas seções e relacioná-lo com as caraterísticas da superfície para compreender melhor a variação destes parâmetros, principalmente na direção transversal ao veículo. Portanto, identificar o comportamento do coeficiente de atrito ao longo da curva pode ser um avanço importante para avaliar o impacto desse parâmetro na segurança viária, principalmente para propor possíveis

intervenções na via com a finalidade de garantir a sua funcionalidade quanto a segurança. Com relação a utilização de imagens para quantificar os parâmetros da superfície do pavimento, a técnica de *Close-Range Photogrammetry* (*CRP*) mostrou ser promissora para as análises, com a aquisição das imagens em campo de forma rápida e a possibilidade de quantificar o coeficiente de atrito da superfície sem a necessidade de outros equipamentos de alto custo utilizados na literatura, como o *GripTester*. Como sugestões para trabalhos futuros, esta pesquisa indica que devem ser realizados mais levantamentos em curvas com raios distintos, além de avaliar as trilhas de roda internas e investigar possíveis diferenças do atrito no mesmo eixo da via.

Agradecimentos
Os autores agradecem o apoio do CNPq, da CAPES e da FUNCAP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A policy on geometric design of roadways and streets. 7th ed., Washington D.C., 2018.

Chen, T., X. Xu, L. Chen, H. Jiang, Y. Cai, Y. Li. (2018). Estimation of longitudinal force, lateral vehicle speed and yaw rate for four-wheel independent driven electric vehicles. *Mech Syst Signal Process*, v. 101, p. 377–388. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.08.041.

Choudhary, A., R. D. Garg, S. S. Jain. (2024). Estimating impact of pavement surface condition and geometrics design on two-wheeler run-off road crashes on horizontal curves. *IATSS Research*, v. 48, n. 1, p. 108–119. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.02.001.

Dhahir, B., Y., Hassan. (2018). Studying Driving Behavior on Horizontal Curves using Naturalistic Driving Study Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2672, n. 17, p. 83–95. https://doi.org/10.1177/0361198118784384.

He, H., R. Li, Q. Yang, J. Pei, F. Guo. (2021). Analysis of the Tire-Pavement Contact Stress Characteristics during Vehicle Maneuvering. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 25, n. 7. https://doi.org/10.1007/s12205-021-1306-0.

Kogbara, R. B., E. A., Masad, E., Kassem, A. (Tom) Scarpas, K. Anupam. (2016). A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Constr Build Mater*, v. 114, p. 602–617. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.

Kogbara, R. B., E. A. Masad, D. Woodward, P. Millar. (2018). Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. *Constr Build Mater*, v. 166, p. 227–240. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102.

Kumar, A., A. Gupta. (2021). Review of Factors Controlling Skid Resistance at Tire-Pavement Interface. *Advances in Civil Engineering*, v. 2021, p. 1–16. https://doi.org/10.1155/2021/2733054.

Ma, Z., H. Wang, Y. Zhang, D. Jelagin, B. Hui. (2025). Study of the surface texture evolution and friction degradation in asphalt pavements during wear process. *Wear*, p. 564–565: 205714. https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205714.

Maia, R. S. (2020). Contributions to the Tire-Pavement Friction Characterization From the Traffic Safety Perspective. Dissertação de mestrado. Fortaleza - CE: Universidade Federal do Ceará.

Santos, M. I., P. T. M. S. Oliveira, A. P. C. Larocca. (2022). Investigation the Influence of Risk Factors on the Occurrence of Road Accidents Using the Driver Performance Model. *Transportation in Developing Economies*, v. 8, n. 1, p. 10. https://doi.org/10.1007/s40890-021-00148-x.

Xie, X., C. Wang, D. Wang, Q. Fan, M. Oeser. (2019). Evaluation of Polishing Behavior of Fine Aggregates Using an Accelerated Polishing Machine with Real Tires. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, p. 145 (2): 04019015. https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000116.

Pereira, A. K. D., Souza, T. J., Vital, P. M. S., Ferreira, W. L. G., Castelo Branco, V. F. T. (2024). Investigação da relação entre curvas horizontais reversas e o padrão de condução veicular. In 38º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC, Brasil. Galoá, Campinas.

Yun, D., L. Hu, U. Sandberg, and C. Tang. (2025). Skid resistance performance and texture lateral distribution within the lanes of asphalt pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 12, n. 1, p. 87–107. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.010.

Zheng, N., J. Bi, S. Dong, J. Lei, Y. He, Z. Cui, L. Chen. (2022). Testing and evaluation for long-term skid resistance of asphalt pavement composite seal using texture characteristics. *Constr Build Mater*, v. 356, p. 129241. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129241.

Alison Kaio Dantas Pereira (alison.pereira@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia dos Transportes, bairro PICI, Fortaleza, Ceará, Brasil.
Veronica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia dos Transportes, bairro PICI, Fortaleza, Ceará, Brasil.
Wellington Lorran Gaia Ferreira (wellington.ferreira@ufersa.edu.br)
Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Engenharias, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil.

USO DE SOFTWARES BIM PARA ELABORAÇÃO DE UM PROJETO PILOTO DE INTERSEÇÃO RODOVIÁRIA: PROJETOS GEOMÉTRICO E DE DRENAGEM

Anna Luiza Braga Amaral, Rosemberg Ferreira Nunes, Aline Rose Pinto Melo, Estéfany de Araújo Santos
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER-MG

RESUMO
A adoção do Building Information Modeling (BIM) tem revolucionado a engenharia rodoviária, promovendo eficiência e integração no desenvolvimento de projetos de infraestrutura. No Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), a metodologia BIM tem avançado e foi aplicada em um projeto piloto, a interseção de acesso a Capitão Enéas, destacando-se pela modelagem digital, compatibilização interdisciplinar e precisão nas análises técnicas e detecção de problemas. A combinação entre tecnologias avançadas, processos estruturados e foco no treinamento de pessoas possibilita melhor planejamento dos estudos e projetos e geração de modelos federados detalhados. O uso de softwares potencializa decisões assertivas e a qualidade dos serviços, evidenciando o BIM como ferramenta estratégica para a modernização e inovação na engenharia de infraestrutura, com resultados satisfatórios e contribuição para o desenvolvimento econômico e regional.

1. INTRODUÇÃO

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais (DER-MG), por meio da Diretoria de Planejamento, Engenharia e Inovação (DPEI), é responsável por coordenar e estabelecer diretrizes para a aplicação da metodologia BIM *(Building Information Modeling)* em seus projetos. Nesse contexto, foi desenvolvido um projeto piloto para o acesso ao município de Capitão Enéas, localizado entre as rodovias CMG-122 e LMG-631, sob jurisdição da 32ª Unidade Regional de Janaúba (URG). O projeto prevê a implantação de uma interseção em nível do tipo "Rotatória Alongada" e foi inteiramente elaborado com base nas normas e recomendações técnicas do DER-MG, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O projeto piloto foi desenvolvido envolvendo todas as disciplinas, passando por toda metodologia BIM, desde o ambiente comum de dados, aos estudos, desenvolvimento dos projetos, compatibilização das disciplinas e criação do modelo federado. Neste artigo, o foco será nos projetos e estudos de geometria e drenagem.

O conceito BIM se sustenta em três pilares fundamentais: tecnologia, processos e pessoas. Em outras palavras, para a implementação BIM em um empreendimento, faz-se necessário um modelo virtual parametrizado, que permita a comunicação entre diversas ferramentas computacionais (interoperabilidade); um estudo detalhado dos fluxos de informações e documentos durante todas as etapas do ciclo de vida, satisfazendo os requisitos de gestão e planejamento; e, por fim, uma colaboração e integração entre equipes, para que cada indivíduo tenha um pensamento multidisciplinar, orientado ao projeto e não à sua disciplina apenas (EASTMAN, 2014).

2. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

2.1. Estudos de traçado e hidrológico

A gestão sustentável dos recursos hídricos e o planejamento eficiente do traçado rodoviário são etapas essenciais em projetos de infraestrutura. O estudo de traçado tem por objetivo selecionar, entre as diferentes alternativas possíveis, aquela que proporcione o melhor equilíbrio entre segurança, conforto, economia e preservação ambiental, em conformidade com os condicionantes técnicos e legais.

O BIM permite que o traçado seja estudado em um ambiente tridimensional interativo, com dados integrados de topografia, hidrologia, geotecnia e uso e manejo do solo. Softwares como o Civil 3D e o InfraWorks, por exemplo, permitem simulações de alternativas de traçado, análise de cortes e aterros, visualização de interferências e estimativas de volumes de movimentação de terra.

A ferramenta também oferece recursos avançados para otimização do corredor, estabelecendo zonas de custo, restrições geométricas e avaliação da viabilidade técnica. Além disso, ela permite a análise da distância de visibilidade, considerando topografia, vegetação e edificações, contribuindo para a segurança viária ao identificar pontos críticos e orientar o projeto de sinalização. A interoperabilidade entre InfraWorks e Civil 3D permite exportar modelos para fases posteriores, garantindo continuidade e precisão no desenvolvimento dos projetos. Assim, o uso combinado dessas tecnologias torna os estudos hidrológicos e de traçado mais precisos, eficientes e sustentáveis.

Os estudos hidrológicos, que analisam o ciclo da água, tempo de concentração, coeficiente de escoamento e vazão de projeto, embasam o dimensionamento de obras hidráulicas. Tradicionalmente baseados em mapas analógicos, esses estudos ganharam precisão com o uso do BIM aliado ao software InfraWorks, que permite a delimitação automática de bacias hidrográficas por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE), identificando até mesmo bacias imperceptíveis em cartas topográficas.
O InfraWorks possibilita o cálculo da vazão para eventos extremos (tempo de recorrência de 100 anos), usando métodos como o racional, embora apresente limitações para cálculos hidráulicos detalhados, uma vez que não é possível confirmar qual o critério para o cálculo dessa vazão, como aplicação do coeficiente de retardo, cálculo do tempo de concentração etc.

2.2. Projeto Geométrico

Baseado no estudo de traçado, o projeto geométrico define a forma e as dimensões da rodovia, incluindo o alinhamento horizontal e vertical, larguras de pista, acostamentos, raios de curva, inclinações e elementos de segurança. Segundo o Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais (DNER, 1999), "O projeto geométrico de uma rodovia é a arte de estabelecer a forma e as dimensões da via, de tal maneira que ela seja segura, confortável, econômica e compatível com o meio ambiente". O BIM facilita a criação de projetos geométricos paramétricos, que podem ser facilmente ajustados conforme normas técnicas vigentes, garantindo a interoperabilidade entre as disciplinas envolvidas no projeto rodoviário (Silva et al., 2021). A interoperabilidade entre softwares permite a coordenação entre disciplinas e visualização de conflitos.
O levantamento topográfico, realizado convencionalmente, foi transformado em modelo digital do terreno (MDT) para embasar o desenvolvimento do projeto. A organização da informação seguiu o Plano de Execução BIM (PEB), priorizando o uso de vínculos dinâmicos entre disciplinas, para garantir atualizações automáticas e maior eficiência na coordenação.
Boas práticas adotadas incluem a definição precisa dos alinhamentos centrais, uso da ferramenta *Vehicle Tracking* (Figura 1) para análise das manobras em interseções e a criação de superfícies específicas para diferentes objetivos, como camadas vegetais, pavimentação e terraplenagem. Além disso, a parametrização dos elementos do projeto com *Property Sets* (Psets) permitiu a inclusão de informações detalhadas para geração de quantitativos e orçamentos, essenciais para a gestão integrada 4D e 5D.

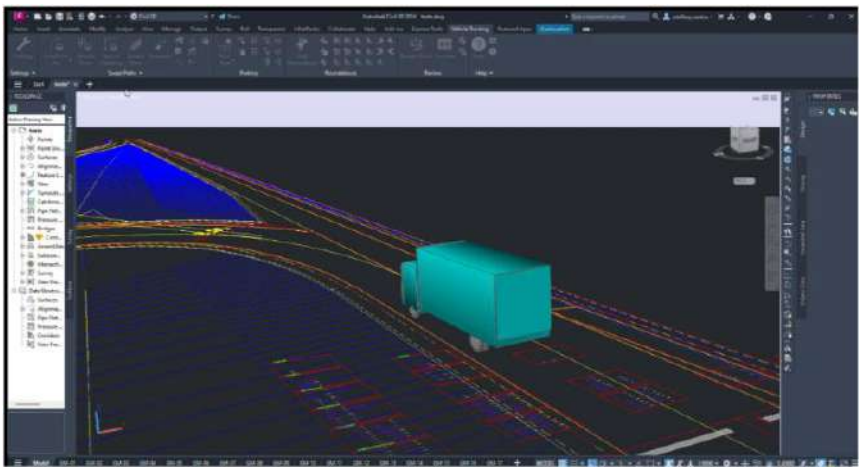


Figura 1: Uso da ferramenta *Vehicle Tracking* para análise das manobras

2.3. Projeto de Drenagem

O projeto de drenagem tem por objetivo prover a rodovia de dispositivos capazes de captar e conduzir adequadamente as águas superficiais e profundas de modo a preservar a sua estrutura, bem como possibilitar o tráfego de forma segura durante a incidência de precipitações intensas.
É fato que em uma rodovia, o efeito do tráfego associado à presença da água, principalmente quando está no interior das camadas do pavimento e por longo período, produz danos significativos e minora seu tempo de vida útil. Também é fato que o seu efeito será tanto menos danoso quanto menor for o período em que a água permanecer sobre ou no interior da plataforma, bem como quanto menor for a sua quantidade (CEDERGREN, 1980).
No Civil 3D, o projeto é facilitado pela modelagem do terreno e análise de microbacias, permitindo identificar

áreas críticas e planejar o escoamento. A modelagem dos dispositivos ocorre em quatro etapas: dispositivos lineares (sarjetas, valetas), redes (bueiros), bacias de captação e blocos (saídas d'água, dissipadores). Para os dispositivos lineares, utiliza-se corredores; para os pontuais, blocos; e para redes, catálogos de tubos e estruturas (Figura 2).



Figura 2: Ferramentas do Civil 3D que foram utilizadas para o dimensionamento dos dispositivos

A modelagem em 3D permite a visualização completa dos dispositivos, que devem ser corretamente nomeados e vinculados a propriedades conforme o Plano de Execução BIM para facilitar a organização e quantificação (Figuras 3 e 4).

Além da modelagem, o Civil 3D possibilita a geração automática de documentos, plantas, perfis e tabelas de quantitativos, essenciais para planejamento, orçamento e execução da obra.

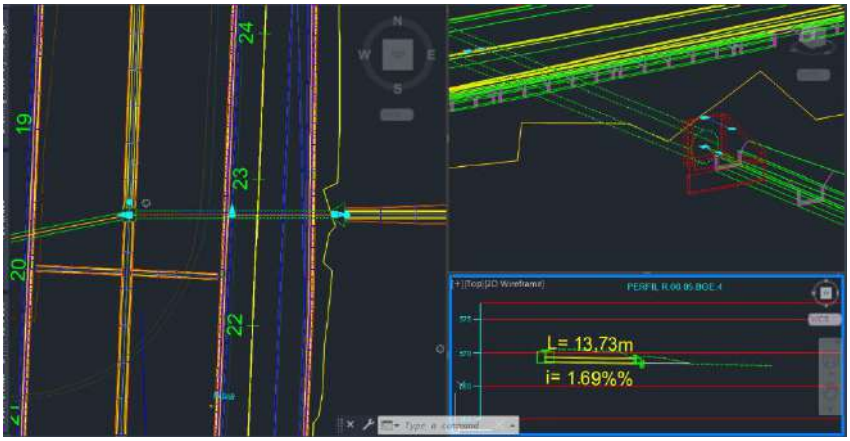


Figura 3: Modelagem de bueiros

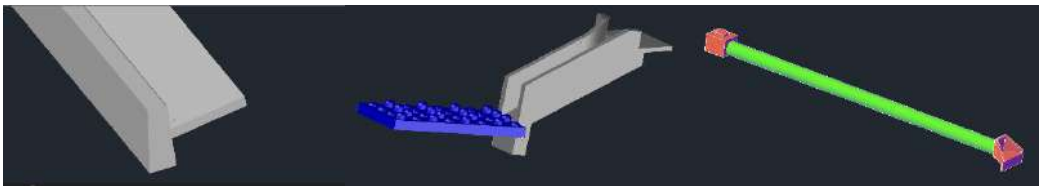


Figura 4: Dispositivos em 3D

3. COMPATIBILIZAÇÃO DO PROJETO

O modelo federado oferece uma visão abrangente do projeto, permitindo a análise simultânea de todas as disciplinas. Essa abordagem possibilita uma compreensão das interações entre diferentes sistemas, otimizando o design e a operabilidade da infraestrutura.

No projeto geométrico, para integrar o projeto ao software de gestão e compatibilização, cria-se o objeto *Solids*, que pode ser extraído do corredor ou da superfície no Civil 3D, utilizando as ferramentas específicas. É importante reduzir a quantidade de *links* (vínculos), *points* (pontos) *e shapes* (formas) para melhorar a

representação 3D do corredor. A extração pode gerar arquivos maiores com vínculo paramétrico, permitindo atualização automática, ou arquivos mais leves que exigem atualização manual — a segunda opção foi adotada no projeto piloto.

No InfraWorks, foi criado um cadastro detalhado de elementos existentes (edificações, árvores, postes, placas, etc.) para facilitar a identificação de interferências. Objetos adicionais, principalmente do SketchUp, foram importados para complementar o modelo. A integração entre Civil 3D e InfraWorks é feita via "Origens de Dados", possibilitando a importação e organização dos elementos do projeto em camadas configuráveis.

Para corrigir diferenças altimétricas entre as topografias do Civil 3D e InfraWorks, substituiu-se a superfície base do InfraWorks pela topografia do levantamento, garantindo maior precisão. Alterações feitas no Civil 3D são automaticamente replicadas no modelo do InfraWorks, reforçando a interoperabilidade entre as plataformas.

Ferramentas de detecção de conflitos são aplicadas para identificar interferências entre diferentes disciplinas. Isso inclui sobreposições, colisões ou incompatibilidades nas geometrias e nos dados incorporados. A detecção precoce de conflitos ajuda a evitar retrabalhos e aprimora a qualidade do projeto. A federação foi realizada utilizando o software Navisworks, incorporando os sólidos e demais documentos gerados por cada disciplina (Figura 5).

No projeto piloto surgiram conflitos, que foram detectados e corrigidos antes da fase de obra. Exemplo de conflitos que ocorreram foram interferências entre placas de sinalização e dispositivos de drenagens (Figura 5).

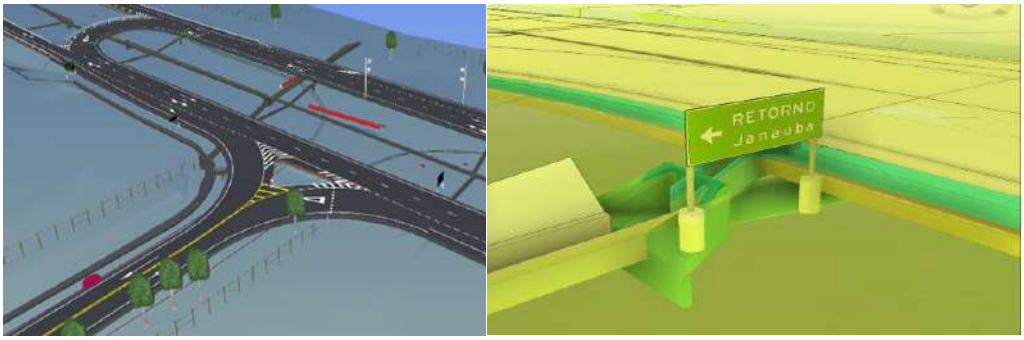


Figura 5: Modelo federado e análise de interferências

4. CONCLUSÕES

A adoção da metodologia BIM representa um avanço para o setor de infraestrutura rodoviária, promovendo maior precisão, integração multidisciplinar, maior controle de qualidade e maior eficiência ao longo do ciclo de vida dos projetos. No projeto piloto analisado, o uso conjunto do Civil 3D e do InfraWorks demonstrou como essas ferramentas podem complementar-se para atender às demandas técnicas, proporcionando um fluxo de trabalho mais integrado e colaborativo.

O InfraWorks revelou-se especialmente eficaz para a visualização tridimensional aprimorada dos traçados e para a realização de estudos preliminares das bacias hidrográficas e análise do terreno, o que favorece a tomada de decisões iniciais. Entretanto, o software apresentou limitações quanto à precisão hidráulica e exigiu ajustes manuais em questões como encaixe de alinhamentos e inserção de pontos em tangentes curtas. Além disso, houve a necessidade de complementar a biblioteca padrão com objetos importados do SketchUp e a correção das discrepâncias altimétricas, que evidenciaram a importância de um gerenciamento cuidadoso dos dados para garantir a coerência do modelo.

Por sua vez, o Civil 3D mostrou-se uma poderosa ferramenta para a modelagem detalhada dos dispositivos de drenagem, geométricos e estruturais, e para a geração automatizada de documentos técnicos, quantitativos e tabelas de materiais. A aplicação das normas e especificações técnicas, por meio de bibliotecas parametrizadas, assegurou a padronização e a qualidade dos resultados, enquanto os recursos BIM facilitaram a organização e rastreabilidade dos elementos do projeto.

A interoperabilidade entre os softwares, por meio da integração de modelos federados, permitiu identificar conflitos e inconsistências antes da execução física, gerando economia significativa de tempo, recursos e

minimizando riscos. Essa abordagem reforça a importância da colaboração multidisciplinar e do uso estratégico das tecnologias digitais para elevar o padrão dos projetos rodoviários.

Apesar dos investimentos e da curva de aprendizado exigidos pela implantação do BIM, os benefícios observados justificam plenamente a continuidade e o aprimoramento do uso dessas tecnologias no DER-MG. Os próximos desafios são a implementação de um ambiente colaborativo mais estruturado, com sistemas robustos de gestão e atualização de dados, além do desenvolvimento contínuo de *templates* e processos padronizados para aumentar a produtividade e qualidade. Além disso, busca-se desenvolver novos projetos com a metodologia BIM, considerando que o projeto realizado é piloto e ainda não dispõe de métricas definidas, de modo a possibilitar, futuramente, a comparação dos ganhos quantitativos em relação ao modelo de projeto convencional.

Por fim, é importante destacar que a metodologia BIM não substitui o conhecimento técnico do engenheiro projetista, mas funciona como um poderoso suporte que potencializa a inovação, a sustentabilidade e a eficiência dos projetos, alinhando-se às demandas contemporâneas da engenharia de infraestrutura. O projeto piloto serviu como base valiosa para ampliar o uso do Civil 3D e InfraWorks em futuros empreendimentos, contribuindo para a melhoria contínua dos serviços prestados e para a modernização da gestão de projetos rodoviários no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTODESK. Vehicle Tracking: software de análise e projeto de trajetória de varredura. Disponível em: <https://www.autodesk.com/br/products/vehicle-tracking/overview?msockid=24552 4cd599b6d9b013430f758a46ce0>. Acesso em: 20 junho, 2025.

CEDERGREN, Harry R. Drenagem dos Pavimentos de Rodovias e Aeródromos. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, IPR, 1980.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais. Rio de Janeiro: DNER, 1999.

EASTMAN, Chuck et al. Manual de BIM: Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Porto Alegre: Bookman. 2014.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L.W. (1999). Digital elevation model issues in water resources modeling. EI, USERS CONFRERENCE, 19. San Diego. Proceedings... San Diego:1999.

SILVA, R. A. et al. BIM em Infraestrutura de Transportes. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

Anna Luiza Braga Amaral (anna.braga@der.mg.gov.br) / *Rosemberg Ferreira Nunes* (rosemberg.nunes@der.mg.gov.br)/ *Aline Rose Pinto Melo* (aline.melo@der.mg.gov.br) / *Estefany de Araujo Santos* (estefany.santos@der.mg.gov.br)
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (Cidade Administrativa - Edifício Gerais, 5º Andar Rodovia Papa João Paulo II, nº 4.001 - Serra Verde, Belo Horizonte, MG)

Projeto de vias

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

BIM COMO FERRAMENTA ESTRATÉGICA EM PROJETO DE INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA: ESTUDO DE CASO SEGREGAÇÕES

Aurenice Cruz Figueira[1]
[1]MRS Logística S.A.

RESUMO
A aplicação da metodologia BIM no Projeto Segregações, da MRS Logística, demonstrou-se estratégica e eficaz desde a fase de projeto básico, resultando em maior precisão, integração e controle. Diante da complexidade da segregação ferroviária de cargas e passageiros em áreas urbanas densamente ocupadas, o uso de BIM permitiu a simulação, coordenação e detecção antecipada de interferências entre disciplinas. O projeto básico atingiu um nível de detalhamento superior ao exigido pelas normativas, proporcionando estimativas de custo mais precisas, redução de riscos e ganhos significativos para a fase de projeto executivo. A experiência reafirma que o BIM não é apenas uma ferramenta, mas um novo modelo de gestão integrada, com benefícios que se estendem à operação, manutenção e futura expansão dos ativos ferroviários.

1. INTRODUÇÃO

A metodologia BIM (*Building Information Modeling*) tem se apresentado como uma ferramenta poderosa quando aplicada à projetos em geral e tende a se expandir nos projetos de infraestrutura com a implementação de novas tecnologias e a evolução das ferramentas e softwares.

Os projetos ferroviários são altamente complexos e envolvem diversas disciplinas (engenharia civil, elétrica, sinalização, telecomunicações, via permanente, drenagem, etc.). Por isso, o uso do BIM nesses projetos traz benefícios ainda mais relevantes do que em projetos convencionais. A aplicação desta metodologia ainda na fase de projeto básico torna o processo de planejamento e execução mais eficiente, reduzindo erros e retrabalhos, e proporcionando maior transparência e controle e com ganhos significativos para as fases subsequentes (Das et al., 2025).

No entanto, estratégias claras de governança são essenciais para orientar a implementação do BIM. A ausência de tais estruturas pode levar à má gestão e ineficiências (Hussain et al., 2024). Diante do desafio de conduzir um empreendimento de grande porte no contexto de concessão ferroviária, a MRS Logística adotou, de forma estratégica, a metodologia BIM desde a fase de projeto básico Segregações, atualmente em fase de conclusão. Este trabalho tem como objetivo apresentar os principais ganhos obtidos e as lições aprendidas sob a perspectiva do proprietário do empreendimento.

2. METODOLOGIA BIM APLICADO À INFRAESTRUTURA

Building Information Modeling (BIM) é um processo abrangente que envolve a criação e o gerenciamento de uma representação digital de um projeto de construção ou infraestrutura ao longo de seu ciclo de vida. A integração e a coordenação de diversas disciplinas, incluindo arquitetura, engenharia, construção e gestão de instalações, constituem uma abordagem colaborativa para um modelo 3D centralizado e inteligente.

O núcleo do BIM é o próprio modelo digital, que é uma representação do projeto rica em dados, orientada a objetos e paramétrica. Este modelo é um recurso de conhecimento compartilhado que contém informações geométricas e dados abrangentes relacionados a materiais, especificações, cronogramas, custos e características de desempenho.

Nos países europeus a metodologia BIM aplicado à infraestrutura ferroviária está em constante crescimento. Essa abordagem ajuda a melhorar a entrega dos projetos, promovendo uma colaboração mais eficiente. Como resultado, os custos ficam mais bem controlados e a execução das obras se torna mais fácil e precisa (Alqatawna et al., 2023; Biancardo et al., 2023; Matejov & Šestáková, 2021; Yilmaz, 2024).

A integração do BIM em projetos ferroviários traz diversas vantagens, como maior precisão no projeto, detecção antecipada de interferências, economia de tempo, otimização de custos, colaboração mais eficiente, melhoria da qualidade das obras e pré-fabricação. Essas experiências também demonstraram que o uso do BIM não representa apenas uma transição tecnológica, mas uma revolução no processo de gerenciamento de projetos (Bensalah et al., 2018).

Além das fases de elaboração do projeto espera-se que o BIM tenha um impacto significativo na fase de operação e manutenção dos ativos ferroviários. As organizações ferroviárias poderão utilizar o modelo digital como um repositório centralizado de informações sobre ativos, integrando o BIM aos sistemas de gestão de ativos. Essa integração inclui dados sobre as condições dos ativos, cronogramas de manutenção e registros históricos, o que permite estratégias de manutenção proativas e preditivas (Alqatawna et al., 2023).

A integração do BIM com tecnologias de Internet das Coisas (IoT) pode aprimorar ainda mais os recursos de gestão de ativos. Dados de sensores de componentes da infraestrutura ferroviária podem ser integrados perfeitamente ao modelo BIM, fornecendo insights em tempo real sobre o desempenho dos ativos e permitindo a manutenção baseada em condições. Essa abordagem proativa pode reduzir significativamente o tempo de inatividade, estender a vida útil dos ativos e otimizar os custos de manutenção.

3. ESTUDO DE CASO PROJETO SEGREGAÇÕES

Em 2022, a MRS Logística S.A. assinou o contrato da renovação da concessão junto ao governo federal, que garantiu investimentos significativos na ampliação da capacidade de volumes transportados pela empresa. Dentre os principais investimentos está o Projeto Segregações, que é um empreendimento de grande magnitude com aproximadamente 100 km de extensão no estado de São Paulo.

A proposta fundamental deste projeto é permitir a separação das operações de transporte ferroviário de cargas e passageiros, que atualmente compartilham a mesma via férrea ao longo das Linhas 7 e 10 da CPTM, entre Rio Grande da Serra e Jundiaí. O transporte de cargas realizado pela MRS Logística passará a ser realizado em nova via férrea exclusiva para esta finalidade.

A limitação do espaço físico disponível para a implantação do empreendimento exige alta precisão desde a elaboração do projeto básico até a fase de execução das obras, devido à inserção em área urbana densamente ocupada e à necessidade de mitigar ao máximo as interferências com as vias CPTM e estruturas existentes.

Sendo a MRS uma empresa privada, sem histórico na elaboração de projetos de grande porte, e considerando a relevância estratégica deste empreendimento, foram realizados investimentos substanciais em um planejamento estruturado e na execução rigorosa de todas as etapas, contando com o suporte de consultorias especializadas. O Termo de Referência (TR) elaborado pela equipe delimitou os escopos das disciplinas em BIM para o projeto básico, especificando os níveis de detalhamento requeridos, os entregáveis obrigatórios, os softwares a serem utilizados e os critérios de medição adotados.

De maneira estratégica, o projeto básico Segregações foi dividido em dois lotes - Sudeste e Noroeste - para fins de licitação e contratação, com o objetivo de otimizar os prazos e assegurar a entrega do projeto no menor tempo possível. Os consórcios responsáveis pela elaboração dos projetos apresentaram os Planos de Execução BIM (PEB) com as diretrizes e processos para a implementação da metodologia.

A contratante realizou o alinhamento dos fluxos de trabalho com as empresas projetistas, preservando os processos e protocolos já consolidados por essas organizações. Essa abordagem visou eliminar a necessidade

de adaptação operacional por parte das equipes envolvidas, reduzindo a curva de aprendizagem e contribuindo para a otimização dos prazos de execução do projeto.

Em paralelo, foi formada a equipe de especialistas MRS composta por profissionais com experiência na elaboração de projetos em BIM. Por se tratar de uma empresa privada adotou-se uma abordagem colaborativa junto à projetistas, buscando auxiliar na tomada de decisão quanto às melhores soluções de engenharia, tornando-se o diferencial no processo de elaboração deste projeto. Ademais, cabe à equipe da MRS a responsabilidade pela validação e aprovação dos entregáveis produzidos.

Considerando as recorrentes incompatibilidades observadas entre diferentes plataformas BIM, especialmente em projetos de maior complexidade, a contratante optou pela adoção do pacote AEC da Autodesk, visando assegurar maior interoperabilidade, padronização dos fluxos de trabalho, redução de perdas de informação e erros de comunicação entre disciplinas e eficiência na coordenação multidisciplinar. De forma complementar, foi utilizado o Autodesk Docs para repositório e gerenciamento dos arquivos do projeto, permitindo a definição fluxos de aprovação para os entregáveis, com controle de rastreabilidade e histórico de versões.

No âmbito do Projeto Segregações, a metodologia BIM foi aplicada em duas frentes distintas: a infraestrutura linear e as estações. A infraestrutura linear contempla a modelagem BIM das disciplinas técnicas associadas à geometria da via, terraplenagem, drenagem, contenções, entre outras. Por sua vez, os modelos BIM das estações (Figura 1) englobam as disciplinas relacionadas às intervenções nas áreas edificadas, como arquitetura, estruturas, paisagismo, instalações hidráulicas, etc. A utilização da metodologia BIM permitiu a visualização, simulação e coordenação integrada dessas disciplinas, viabilizando a identificação e eliminação de interferências geométricas e funcionais — a exemplo de desalinhamentos entre o eixo ferroviário e as plataformas, ou conflitos entre os sistemas prediais e os elementos da infraestrutura ferroviária.

Ainda como escopo do projeto, foram elaborados modelos no Autodesk InfraWorks que contribuiu significativamente para a comunicação do Projeto Segregações com municípios e demais partes interessadas. A visualização tridimensional realista facilitou a compreensão por públicos não técnicos, fortalecendo o poder de convencimento da equipe técnica e favorecendo a aceitação do projeto por parte das autoridades locais e da comunidade. Além disso, o modelo proporcionou um ambiente interativo e de fácil navegação para discussão de alternativas, ajustes e soluções técnicas durante as fases de apresentação e validação institucional.



Figura 1: Renderização do projeto da Passarela na Estação Capuava (Segregação Sudeste).

Cabe ainda destacar que a adoção de protocolos rigorosos para a coleta de dados, utilizando diferentes tecnologias como aerolevantamento, drones e laser scanning, foi fundamental para a obtenção de informações espaciais de alta precisão. Esses dados qualificados foram essenciais para subsidiar as fases de projeto básico e executivo, contribuindo diretamente para o aumento da acurácia e da confiabilidade dos modelos desenvolvidos em BIM. A aquisição de dados espaciais foi fundamentada em uma Rede Geodésica Tridimensional (RGT) de alta acurácia, implantada e monumentalizada especificamente para este projeto (Figueira et al., 2024). E além de garantir a confiabilidade e a consistência dos dados coletados, está dimensionada para atender a demandas futuras, viabilizando sua integração em projetos de expansão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da metodologia BIM foi primordial para a fase de projeto básico Segregações permitindo aos stakeholders e projetistas visualizar e simular os projetos em ambiente virtual antes do início da construção. Isso possibilitou identificar possíveis problemas e otimizar soluções, promovendo maior eficiência, precisão e assertividade nas etapas subsequentes.

A adoção do BIM também proporcionou um nível de detalhamento superior ao exigido pelas normativas vigentes, proporcionando ganhos significativos em termos de qualidade e confiabilidade técnica. Esse maior grau de aprofundamento permitiu a identificação antecipada de interferências e riscos, conferindo mais segurança à tomada de decisões e reduzindo incertezas para a fase de projeto executivo, que impactará diretamente na diminuição de retrabalhos durante a execução. Dessa forma estima-se uma redução no tempo de elaboração do projeto executivo e economia potencial nos custos de compatibilização e ajustes durante a obra.

Adicionalmente, possibilitou estimativas de custos mais precisas, com quantificações mais aderentes à realidade do empreendimento, favorecendo a elaboração de orçamentos mais realistas e o aprimoramento do controle financeiro. Observou-se também uma melhoria expressiva na integração entre disciplinas, viabilizando uma coordenação mais eficiente e a mitigação de conflitos ainda na etapa de projeto. Embora exija um investimento inicial mais elevado, esse nível de desenvolvimento tende a reduzir significativamente o custo global do empreendimento, ao minimizar retrabalhos, atrasos e ajustes corretivos nas fases subsequentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alqatawna, A., Sánchez-Cambronero, S., Gallego, I., & Rivas, A. (2023). BIM-centered high-speed railway line design for full infrastructure lifecycle. *Automation in Construction*, *156*, 105114. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105114

Bensalah, M., Elouadi, A., & Mharzi, H. (2018). Overview: the opportunity of BIM in railway. *Smart and Sustainable Built Environment*, *8*(2), 103–116. https://doi.org/https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2017-0060

Biancardo, S. A., Palazzo, S., Intignano, M., & Dell'Acqua, G. (2023). *BIM for railway infrastructure: the case study of the Ogliastro–Sapri High-Speed rail*. https://doi.org/10.3846/enviro.2023.916

Das, K., Khursheed, S., & Paul, V. K. (2025). The impact of BIM on project time and cost: insights from case studies. *Discover Materials*, *5*(1). https://doi.org/10.1007/s43939-025-00200-2

Figueira, A. C., Torres, A. L., & Russo, L. (2024). Aplicação de Rede Geodésica para o Projeto Segregações - MRS Logística. *30ª Semana de Tecnologia Metroferroviária*.

Matejov, A., & Šestáková, J. (2021). The Experiences with utilization of BIM in railway infrastructure in Slovak Republic and Czech Republic. *Transportation Research Procedia*, *55*, 1139–1146. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.084

Yilmaz, G. (2024). BIM capability assessment for improving the efficiency of design in railway projects. *Infrastructure Asset Management*, *12*(2), 82–93. https://doi.org/https://doi.org/10.1680/jinam.24.00033

Aurenice Cruz Figueira (aurenice.figueira@mrs.com.br)
MRS Logística S.A., Av. Ibirapuera, 2332, Torres Empresariais, Indianópolis, SP, Brasil.

Inteligência artificial aplicada à Infraestrutura de Transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

INFRAESTRUTURA PARA AUTOMAÇÃO DE FROTAS NO BRASIL: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO EM CORREDORES DA BR-116.

Kamila de Fátima Machado Paiva[1], **Luísa Muglia Souza**[2], **Jose Alberto Barroso Castañon**[1]
[1]Universidade Federal De Juiz De Fora - UFJF, [2]Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

RESUMO
Este estudo avaliou o potencial de implantação de caminhões autônomos em corredores rodoviários de alto volume de carga no Brasil. Utilizou-se uma metodologia qualitativa, que incluiu a seleção e caracterização de quatro trechos da BR 116, a definição de critérios de prontidão de infraestrutura (física e digital) e a coleta de dados para mapeamento e classificação. O nível geral de prontidão de cada trecho foi determinado por uma média simples dos níveis atribuídos aos critérios. Os resultados revelaram que o Trecho 1 no Rio de Janeiro é o mais promissor (moderadamente preparado), enquanto o Trecho 3 entre Minas Gerais e Bahia mostrou-se não preparado. Os demais trechos no Rio Grade do Sul e São Paulo foram classificados como ligeiramente preparados. O significado deste estudo reside em identificar as necessidades de investimento em infraestrutura, como faixas adicionais e conectividade, para otimizar a segurança e eficiência do transporte rodoviário nacional com veículos autônomos.

1. INTRODUÇÃO

Os caminhões são responsáveis por cerca de um quinto da demanda global de petróleo, aproximadamente 17 milhões de barris por dia (IEA, 2022), evidenciando a importância do transporte rodoviário de cargas na economia. Nesse contexto, a automação de frotas surge como alternativa promissora para otimizar eficiência e reduzir o consumo de combustível. Isso é alcançado por meio de sistemas inteligentes de comunicação entre veículos (V2V, do inglês *Vehicle-to-Vehicle*) e estratégias de condução em comboio (*platooning*), que mantêm espaçamento dinâmico entre caminhões, diminuindo a resistência do ar e, consequentemente, o gasto energético (Zhang et al., 2020). Grandes fabricantes, como DAF Trucks, Daimler Trucks, Iveco, MAN Truck & Bus, PACCAR, Scania e Volvo Group, já investem fortemente no desenvolvimento e aplicação dessas tecnologias (Konrad e Wangler, 2018; Axelrod, 2019).

Além da economia de combustível, a automação de frotas oferece benefícios significativos do ponto de vista ambiental e logístico. A adoção de caminhões autônomos pode contribuir para reduzir emissões de carbono e melhorar o aproveitamento da capacidade de carga, promovendo práticas logísticas mais sustentáveis, como o compartilhamento de cargas entre empresas (Sindi e Woodman, 2021). Adicionalmente, a eliminação do fator erro humano, uma das principais causas de acidentes, pode reduzir drasticamente os índices de sinistros rodoviários. A automação também tem potencial de diminuir substancialmente os custos operacionais do transporte, considerando que parcela significativa desses custos está associada à remuneração dos motoristas (Murray e Glidewell, 2019). À medida que os custos de adoção de veículos autônomos se tornam mais acessíveis, espera-se impacto direto na cadeia de suprimentos, com redução do custo do transporte e, consequentemente, do preço final das mercadorias ao consumidor (Li, 2020).

No Brasil, o modo rodoviário é predominante, respondendo por 65% das cargas e 95% do transporte de passageiros, conforme a CNT (2024). Com uma das maiores malhas rodoviárias do mundo, o país apresenta cenário propício para implementação de tecnologias de automação em frotas de transporte de cargas. No entanto, a efetividade e a segurança desses sistemas dependem de infraestrutura adequada, como pavimentos de alta qualidade e conectividade, a exemplo do 5G, para o intercâmbio de dados entre veículos e a nuvem (Castello et al., 2024; Boer et al., 2017). A automação de frotas no Brasil pode trazer benefícios, como redução de acidentes rodoviários, que aumentam pelo quinto ano consecutivo (ANTT, 2024), e a otimização dos custos operacionais, especialmente relacionados à mão de obra (Murray e Glidewell, 2019).

Apesar do grande potencial, a literatura ainda carece de estudos aprofundados que avaliem a viabilidade técnica, operacional e logística da implantação de caminhões autônomos em corredores rodoviários brasileiros de alto volume de carga. Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de implantação de caminhões autônomos em corredores rodoviários de alto volume de carga no Brasil, com base em critérios físicos e digitais, a partir de análise exploratória de quatro trechos selecionados da malha federal. Visa, assim, contribuir para o debate técnico-científico sobre transporte inteligente no Brasil e definir

estratégias de planejamento e políticas públicas voltadas à modernização da infraestrutura rodoviária nacional.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da proposta metodológica, é importante destacar que esta é uma pesquisa de abordagem qualitativa e natureza exploratória, voltada à compreensão do significado das experiências a partir da perspectiva dos participantes (Tisdell et al., 2025). Nesse contexto, para identificar as condições mais favoráveis para a inserção de caminhões autônomos nas rodovias brasileiras, a metodologia foi dívida em 3 fases de implantação, sendo estas:

2.1. Fase 1: Seleção e Caracterização dos Corredores Rodoviários

Como primeira abordagem do estudo, a BR-116 foi selecionada devido à importância na logística brasileira, sendo a maior rodovia do Brasil e crucial para o transporte de cargas terrestres, conectando as regiões Nordeste, Sudeste e Sul do país. Com o intuito de promover uma análise transversal abrangente, a rodovia foi segmentada em quatro trechos, conforme tabela 1.

Tabela 1: Definição dos trechos de estudo.

Trecho	VTD de caminhões	Sinistralidade	Concessão	Perfil
Trecho 1 – BR-116/RJ (Km 168 ao Km 339,60)	~21000	1269/ano	Ecovias Rio Minas e Rio SP	Rural com trechos urbanizados
Trecho 2 – BR-116/RS (Km 450 ao Km 659,90)	~850	932/ano	Ecovias Sul	Predominantemente Rural
Trecho 3 BR-116/MG-BA (Km 408 ao Km 611)	~4800	1104/ano	Objeto de futuro leilão para concessão	Rural
Trecho 4 – BR-116/SP (Km 270,10 ao Km 569,10	~25000	857/ano	Autopista Regis Bittencourt	Rural

2.2 Fase 2: Definição de Critérios de Avaliação para Implantação de Caminhões Autônomos

Os critérios para a avaliação da prontidão rodoviária para a implantação de caminhões autônomos foram fundamentados na pesquisa de Souza (2023), que identificou e analisou os requisitos de infraestrutura mais relevantes para a introdução de veículos autônomos em rodovias rurais. Essa fundamentação permitiu o desenvolvimento de uma estrutura de avaliação abrangente, categorizada em infraestrutura física e digital, como definido na figura 1.

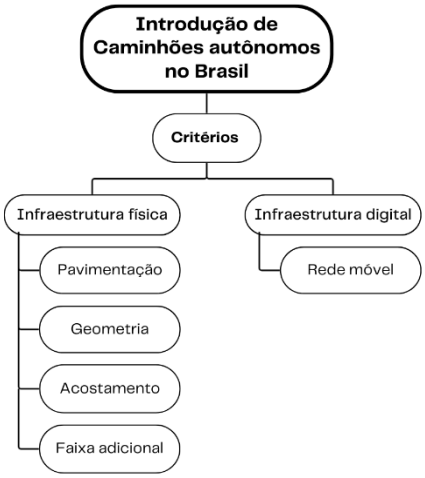


Figura 1: Definição dos critérios para introdução de caminhões autônomos.

A partir da definição dos critérios para introdução de veículos automatizados no Brasil, foram definidos cinco nível de preparo, variando do nível 1 ao nível 5, desde “Não preparado” até “Totalmente preparado”:

•Nível 1 - Não preparado: Rodovias sem infraestrutura e suporte tecnológico adequados para Veículos

Autônomos, apresentando desafios significativos para sua operação.
•Nível 2 - Ligeiramente preparado: Rodovias com preparações limitadas para VAs, onde elementos essenciais de infraestrutura podem existir, mas não estão otimizados.
•Nível 3 - Moderadamente preparado: Rodovias com melhorias de infraestrutura que oferecem suporte razoável para operações de veículos autônomos.
•Nível 4 - Preparado: Rodovias com infraestrutura e tecnologia bem estabelecidas, adequadamente preparadas para VAs.
•Nível 5 - Totalmente preparado: Rodovias extensivamente equipadas com soluções avançadas de infraestrutura e tecnologia para maximizar a segurança e eficiência de veículos autônomos.

2.3. Fase 3: Coleta de Dados e Mapeamento

A coleta de dados foi realizada por meio de uma revisão sistemática da literatura em bases de dados científicas (Scopus, IEEE Xplore e Web of Science), utilizando termos como *"autonomous trucks"* e *"infrastructure"*. Complementarmente, foi conduzida uma pesquisa documental em bases de dados nacionais, incluindo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Polícia Rodoviária Federal (PRF), Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e Confederação Nacional de Transportes (CNT). Dados sobre cobertura de rede móvel foram obtidos junto à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Adicionalmente, uma avaliação sistemática remota do território foi realizada com o auxílio do Google *Street View* para reconhecimento do ambiente rodoviário. Após a coleta de dados, as classificações de prontidão para cada critério foram atribuídas e organizadas em uma tabela comparativa, conforme as definições de Souza (2023). Cada nível qualitativo equivale diretamente à sua nota numérica (Nível 1 = nota 1, …, Nível 5 = nota 5). O nível geral de prontidão de cada trecho rodoviário foi obtido a partir da média aritmética simples das notas atribuídas a todos os critérios de infraestrutura física e digital aplicáveis, conforme Equação (1):

$$I_t = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_{ij}}{n} \qquad (1)$$

onde:
• I_t= índice de prontidão do trecho t;
• C_{it}= nota atribuída ao critério i no trecho t;
• n = número total de critérios avaliados.

Além disso, caso um critério receba nota 0, esse valor é mantido no cálculo e considerado no denominador, refletindo a condição mais crítica possível. O resultado dessa média expressa o nível geral de prontidão do trecho para a implantação de caminhões autônomos, de forma clara e comparável entre diferentes segmentos.

3. RESULTADOS

3.1 Trecho 1 – BR-116/RJ (Km 168 ao Km 339,60)

O trecho da BR-116 no Rio de Janeiro (km 168 ao km 339,60), conhecido como Rodovia Presidente Dutra, apresenta alta complexidade para a introdução de VAs, sobretudo em seus segmentos urbanizados. A interação imprevisível com múltiplos usuários vulneráveis, como pedestres e ciclistas, em áreas de tráfego denso, é desafio para a tecnologia autônoma, que depende de ambiente estruturado para garantir respostas seguras. Por isso, a viabilidade de implementação se concentra em segmentos menos complexos, como a partir do km 168, onde a configuração rodoviária é mais controlada e previsível. Do ponto de vista da infraestrutura física, o trecho exibe características favoráveis que atendem aos padrões do DNIT (2004) para rodovias de Classe I. A presença contínua de acostamentos, por exemplo, é fator crítico de segurança, pois oferece refúgio essencial para que um VA execute parada segura ao atingir o limite de seu domínio operacional de projeto (ODD, do inglês *Operational Design Domain*) ou em caso de falha técnica. Adicionalmente, a boa qualidade do pavimento e da geometria, atestada pela CNT (2024), fornece previsibilidade de superfície e de traçado necessária para que sensores do veículo, como câmeras e LiDAR, operem com máxima eficiência.

Contudo, conforme Chen et al. (2016), a tendência dos VAs de manterem trajetória altamente consistente dentro da faixa, ao contrário da variação natural de motoristas humanos, concentra estresse mecânico em área restrita do pavimento. Esse fenômeno acelera a formação de trilhas de roda, exigindo revisão dos ciclos de manutenção para evitar degradação prematura. Da mesma forma, a implementação de tecnologias como o

platooning de caminhões, que aumenta significativamente as cargas dinâmicas sobre a pista, demanda análise estrutural aprofundada para garantir que o pavimento suporte essa nova demanda operacional, como alertam Xue et al. (2022). O diferencial estratégico deste segmento, no entanto, reside em sua avançada infraestrutura digital. A ampla cobertura de redes 4G e 5G, conforme dados da Anatel (2025), é essencial para Sistemas de Transporte Inteligentes Cooperativos (C-ITS, do inglês *Cooperative Intelligent Transport Systems*). A tecnologia 5G, em particular, é catalisador para segurança e eficiência, dado sua baixíssima latência e alta capacidade de transmissão de dados, pré-requisitos para aplicações críticas. Como destaca a PIARC (2019), essa conectividade permite comunicação V2V e veículo-a-infraestrutura (V2I, do inglês *Vehicle-to-Infrastructure*) em raio de até 2 km, viabilizando o compartilhamento de informações em tempo real sobre as condições da via e o status de outros veículos. Essa troca de dados funciona como camada de redundância, compensando falhas dos sensores embarcados e tornando a operação autônoma mais robusta e segura.

3.2. Trecho 2 – BR-116/RS (Km 450 ao Km 659,9)

Entre São Lourenço do Sul (km 450) e Jaguarão (km 659,9), a rodovia apresenta boas condições de pavimento, duas faixas em sentido único e acostamento, atendendo aos critérios de uma rodovia de Classe 1, conforme o DNIT (2004). Contudo, a partir do km 515,6, nas proximidades da Polícia Rodoviária Federal em Pelotas, a configuração muda: a via passa a ser mão dupla, com apenas uma faixa por sentido e acostamentos estreitos, situação que se mantém até o km 659,9. Essa limitação geométrica inviabiliza a operação segura e eficiente de veículos autônomos, especialmente caminhões. A presença de apenas uma faixa compartilhada entre veículos com características distintas compromete a fluidez do tráfego, eleva os riscos de acidentes e impede a adoção de estratégias como platooning, que exige faixas contínuas e exclusivas (PIARC, 2019). Caminhões autônomos necessitam de maior espaço para manobras, distâncias ampliadas de frenagem e apresentam padrões diferenciados de aceleração e ultrapassagem, dificultando a convivência segura com outros veículos em vias não segregadas.

A previsibilidade do tráfego, fator essencial para o desempenho dos VAs (PIARC, 2019), é comprometida nesse cenário de compartilhamento de faixa. Estudos indicam que a implementação de faixas exclusivas para veículos autônomos pode ser alternativa mais segura do que a segregação total (Amelink et al., 2020; Johnson, 2017). No entanto, essa medida depende da disponibilidade de espaço, o que não ocorre em trechos com configuração simples, como os localizados após Pelotas, limitando até mesmo futuras intervenções na infraestrutura (Mihalji et al., 2022). Apesar disso, o segmento em questão está inserido em região majoritariamente rural, de baixa densidade populacional, o que reduz a complexidade das interações viárias e a presença de usuários vulneráveis, criando ambiente relativamente mais favorável à inserção de tecnologias autônomas. No entanto, a precariedade da conectividade, com baixa cobertura de redes móveis e instabilidade do sinal 4G e 5G, representa entrave significativo. A operação segura de caminhões autônomos depende de conexão constante para atualizações em tempo real, comunicação com a infraestrutura e troca de alertas sobre condições da via, especialmente em cenários dinâmicos, como obras temporárias. Diante dessas restrições, conclui-se que apenas o trecho entre São Lourenço do Sul (km 450) e o km 515,6 apresenta condições mínimas aceitáveis para a introdução gradual de caminhões autônomos, tanto do ponto de vista geométrico e de pavimento, quanto da infraestrutura tecnológica disponível.

3.3 Trecho 3 – BR-116/MG-BA (Km 408 ao Km 116)

O trecho que se inicia em Governador Valadares (km 408) apresenta geometria inadequada e ausência de acostamentos, em desacordo com os padrões do DNIT (2004). Essas deficiências representam um obstáculo relevante à operação de veículos autônomos, sobretudo em segmentos críticos como pontes, túneis ou áreas sem áreas de escape, exigindo medidas de segurança adicionais (Nowakowski et al., 2016; Tengilimoglu et al., 2023). Em áreas urbanas interceptadas pela rodovia, como Teófilo Otoni, a integração direta com o tráfego local, aliada à sinalização insuficiente e à ausência de infraestrutura para pedestres, torna o ambiente ainda mais desafiador. A superação das limitações dos sensores embarcados exige uma infraestrutura de comunicação avançada, capaz de transformar os VAs em elementos ativos de um sistema cooperativo.

A comunicação veículo-infraestrutura, por exemplo, permite antecipar eventos fora do campo visual dos sensores, como a presença de pedestres em curvas fechadas, possibilitando respostas preventivas.Além disso, a comunicação entre veículos e com o ambiente cria uma rede coletiva de segurança, permitindo o compartilhamento de informações críticas em tempo real, funcionando também como redundância em caso de

falhas dos sensores. Outro fator limitante é a má conservação do pavimento. Buracos, trincas e remendos podem ser mal interpretados pelos sensores, gerando manobras incorretas e perigosas. A situação se agrava em trechos com geometria deficiente, como curvas acentuadas e aclives mal projetados, que exigem alta capacidade de adaptação dos algoritmos do VA, aumentando significativamente os riscos de falha operacional. Por fim, a conectividade limitada compromete a segurança do sistema. Sem acesso a redes móveis confiáveis, os veículos não recebem atualizações em tempo real, nem conseguem se comunicar com a infraestrutura para compensar limitações dos sensores. Em contextos com pavimento e geometria deficientes, essa ausência elimina uma importante camada de segurança, comprometendo a viabilidade da operação autônoma.

3.4 Trecho 4 – BR-116/SP (Km 270,10 ao Km 562,10 – Divisa SP/PR)

O segmento da BR-116/SP, entre o km 270,10 e a divisa com o Paraná, revela transição abrupta entre diferentes perfis de risco. A ausência de acostamentos, mesmo em múltiplas faixas, representa não conformidade crítica com requisitos de segurança para VAs. Conforme Souza (2024), a disponibilidade de refúgio lateral é fundamental para manobras de risco, como parada segura de falha sistêmica ou superação do ODD. Sem tal infraestrutura, o veículo seria compelido à imobilização na própria faixa, induzindo elevado potencial de colisão com tráfego subsequente. A complexidade é agravada pelo fator comportamental: a utilização não regulamentada dos acostamentos como faixas. Esse fenômeno representa conflito entre previsibilidade algorítmica, que classifica acostamento como zona estática de segurança, e a imprevisibilidade da conduta humana. A violação dessa premissa normativa força o sistema do VA a reavaliação dinâmica do ambiente, podendo resultar em hesitação ou manobras defensivas, dada a dificuldade de inferir intenções de veículos que operam fora dos padrões.

Adicionalmente, a interação com usuários vulneráveis em áreas urbanas sem segregação adequada introduz cenário crítico. Em alta velocidade, a detecção de pedestres em posição inadequada demanda do VA percepção e atuação nos limites da física veicular e do sensoriamento. Conforme Souza (2024), a questão central não é apenas o Tempo de Percepção e Reação (PRT, do inglês *Perception-Reaction Time*), embora drasticamente inferior ao de um humano, é insuficiente se a distância de visibilidade for menor que a distância mínima de parada (SSD, do inglês *Stopping Sight Distance*) exigida pela física. Confiando apenas em sensores, o VA opera em modo reativo, tornando a mitigação de acidentes altamente complexa. Por fim, a inconsistência das características geométrica e do pavimento ao longo do percurso constitui risco. O segmento transita de condições ótimas, que permitem operação eficiente, para trechos de qualidade inferior. Essa transição abrupta representa vulnerabilidade, qualquer discrepância entre dados cartográficos e a realidade da via pode induzir o sistema a erros de planejamento de trajetória. Em síntese, este segmento da BR-116 não se define por deficiência única, mas pela imprevisibilidade da infraestrutura. A alternância entre zonas de alta e baixa prontidão cria ambiente instável. A tabela 2 indica o índice de prontidão de cada trecho, conforme metodologia e critérios físicos e digitais definidos anteriormente.

Tabela 2: Indice de prontidão para introdução de caminhões autônomos

Trecho	Geometria	Pavimento	Acostamento	Faixa adicional	Cobertura de rede móvel	Índice de prontidão
Trecho 1	4	4	4	0	4	3,2
Trecho 2	3	4	2	0	2	2,2
Trecho 3	1	2	2	0	0	1
Trecho 4	3	3	4	0	4	2,8

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Em síntese esse artigo avaliou o potencial de implantação de caminhões autônomos em corredores rodoviários de alto volume de carga no Brasil, com base em critérios físicos e digitais, a partir de uma análise exploratória de quatro trechos selecionados da malha federal. A partir do estudo foi possível identificar a prontidão dos trechos na introdução de veículos autônomos e assim, destacar as áreas que demandam aprimoramento e aquelas que já oferecem condições favoráveis. O resultado principal da análise revela uma heterogeneidade acentuada na preparação da BR-116. O trecho 1 (BR-116/RJ) emergiu como o mais promissor, com uma pontuação de 3,2, indicando que está moderadamente preparado. Este segmento oferece um suporte razoável para operações autônomas, com destaque para a boa qualidade do pavimento, a presença de acostamentos e a cobertura de rede móvel. Contudo, sua principal deficiência reside na ausência de faixas adicionais

consistentes, um requisito essencial para a implementação de modalidades avançadas como o platooning (comboio de caminhões), demandando investimentos em adaptação para otimizar seu potencial. Em contrapartida, os demais trechos apresentaram níveis de prontidão inferiores.

O trecho 2 (BR-116/RS), com nota 2,2, e o trecho 4 (BR-116/SP), que detém o maior volume de tráfego de caminhões, foram classificados como ligeiramente preparados. Ambos possuem elementos de infraestrutura essenciais, mas que não estão totalmente otimizados, como a cobertura de rede móvel intermitente no trecho gaúcho e a complexa interação em áreas urbanizadas no trecho paulista. Por fim, o trecho 3 (BR-116/MG-BA) foi considerado não preparado, apresentando limitações severas em todos os quesitos, incluindo a ausência de conectividade em longas extensões, o que o torna inviável para a introdução de veículos autônomos sem investimentos massivos e estruturais. Para pesquisas futuras, sugere-se a aplicação da metodologia em outras rodovias de importância logística, a fim de criar um mapa mais abrangente da prontidão da malha rodoviária nacional. Por fim, a incorporação de análises de custo-benefício para as adaptações propostas seria de grande valia para orientar políticas públicas e direcionar investimentos de forma estratégica, acelerando a jornada do Brasil rumo a um futuro com transporte de cargas mais seguro, eficiente e autônomo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Normas para o projeto das estradas de rodagem. Rio de Janeiro: Serviço de Publicações, 1973. 26 p.

C. W. Axelrod (2019) Autonomous Vehicles Meet Inhospitable Roadways. IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), p. 1-6, DOI: 10.1109/LISAT.2019.8816825.

Clements, L. M., e Kockelman, K. M. (2017). Economic Effects of Automated Vehicles. Transportation Research Record, v. 2606, n. 1, p. 106-114. DOI: 10.3141/2606-14

COBERTURA 3G / 4G / 5G TIM MOBILE - NPERF.COM. Disponível em: https://www.nperf.com/pt/map/BR/ /161694.TIM-Mobile/signal?ll=-13.453737213419249&lg=-45.59280382224893&zoom=5. Acesso em: 15 jul. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE; SERVIÇO SOCIAL DO TRANSPORTE; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM DO TRANSPORTE; INSTITUTO DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA. Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL, 2024. 224 p. ISBN 978-85-68865-23-1 (Digital).

IEA.(2017) Study Unveils Key Role for Trucks in Global Oil-Demand Growth—News. Disponível em: https://www.iea.org/news/ iea-study-unveils-key-role-for-trucks-in-global-oil-demand-growth (acesso em 06/07/2025).

Linlin .Z; F. Chen; X. Ma; X. Pan (2020) Fuel Economy in Truck Platooning: A Literature Overview and Directions for Future Research. Jornal od Advanced transportation. v. 2020, p. 10. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/2604012

Luisa M. S (2023) Readiness assessment for autonomous vehicles: a comprehensive evaluation of rural road infrastructure suitability. Disponivel em: https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/16796 (acesso: 06/07/2025)

Murray, D., e Glidewell, S. (2019). An analysis of the operational costs of trucking: 2019 update. Disponível em: An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2019 Update - TRID (acesso: 06/07/2025)

Safaa, S e R. Woodman (2021) Implementing commercial autonomous road haulage in freight operations: An industry perspective. Transportation Research Part A: Policy and Practice,v.152, p. 235-253. DOI: 10.1016/j.tra.2021.08.003

Tisdell, Elizabeth J.; Sharan B. Merriam e Heather L. Stuckey-Peyrot (2025) Qualitative research: A guide to design and implementation. John Wiley & Sons.

Xiang, L (2020) Reducing channel costs by investing in smart supply chain technologies. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. v. 137. Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101927 (acesso: 06/07/2025)

PIARC. Automated Vehicles - Challenges and Opportunities for Road Operators and Road Authorities. 2021. Disponível em: https://www.piarc.org/en/order-library/36683-en-Automated%20Vehicles%20 %20Challenges%20and%20Opportunities%20for%20Road%20Operators%20and%20Road%20Authorities. Acesso em: 15 jul. 2025.

Kamila de Fátima Machado Paiva(kamilafmachpav@gmail.com)
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Departamento de Transportes e Geotecnia, Juiz de Fora -MG, Brasil.
Luisa Muglia de Souza (luisa.muglia@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
José Alberto Barroso Castañon(jose.castanon@ufjf.br)
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Departamento de Transportes e Geotecnia, Juiz de Fora -MG, Brasil.

OTIMIZAÇÃO DE HIPERPARÂMETROS COM ALGORITMO GENÉTICO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ANN E RF PARA PREDIÇÃO DO ÍNDICE DE SUPORTECALIFÓRNIA

Iago de Souza Lopes, Rogério Ramos Moreira, Alexandre Ribeiro, Marta Pereira da Luz
Pontifícia Universidade Católica de Goiás

RESUMO
O tempo demandado para realizar o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) justifica a busca por métodos preditivos computacionais. No entanto, modelos de Machine Learning frequentemente carecem de uma metodologia de validação criteriosa, arriscando conclusões superestimadas. Visando contribuir com esta temática, este trabalho propõe um framework robusto para a otimização e comparação de modelos ANN e RF, via Algoritmo Genético (GA). A metodologia avalia sistematicamente múltiplos cenários experimentais a partir de banco de dados público da COPPE/UFRJ. Os resultados demonstraram que a abordagem de otimização é eficaz, com o modelo GA-ANN, alcançando um R^2 de 0.780 nos dados de teste. O framework apresentado consiste em uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de modelos preditivos, agilizando a estimativa do CBR para dar suporte às análises preliminares e decisões de anteprojeto em pavimentação.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica é fundamental para a estabilidade de projetos de infraestrutura, como as rodovias, que impactam diretamente a economia e a logística de um país. No Brasil, o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis depende fortemente do ensaio do Índice de Suporte Califórnia ou *Califórnia Bearing Ratio* (CBR), um processo laboratorial demorado e caro, representando até 71% do tempo total de identificação de uma amostra de solo (YABI et al., 2024).

Em resposta a esses desafios, pesquisadores têm aplicado algoritmos de Machine Learning (ML), como Artificial Neural Networks (ANN) e Random Forest (RF), para estimar o CBR, modelando as complexas relações não lineares do comportamento do solo (TADO et al., 2025). Contudo, o desempenho desses modelos de ML é altamente sensível à escolha de seus hiperparâmetros. Técnicas de otimização, como os Algoritmos Genéticos (GA) e Algoritmos de Enxame de Partículas (PSO), podem automatizar essa busca possibilitando a diminuição de gastos, em comparação à métodos de tentativa e erro. Como em estudos feitos por Bardhan et al. (2021) e por Yabi et al. (2024).

Para automatizar essa busca, este trabalho emprega a técnica do Algoritmo Genético (GA), que pertence a uma classe de métodos de otimização conhecidos como algoritmos evolucionários. Ele é inspirado em processos da natureza como a seleção natural. Em vez de refinar uma única solução, o GA trabalha com uma população de "indivíduos", neste caso cada um possui diferentes configurações de hiperparâmetros, que estão espalhados pelo espaço de busca. Essa abordagem populacional permite que o algoritmo realize uma busca inerentemente global, reduzindo a tendencia de ficar preso em ótimos locais. Adicionalmente, possui processos como o cruzamento (*crossover*) e a mutação que são utilizados para explorar novas regiões do espaço de busca. Contudo, como uma meta-heurística, o GA não garante matematicamente a convergência para o ótimo global, mas aumenta significativamente a probabilidade de encontrar soluções de melhores em problemas complexos e não-lineares, como a otimização de hiperparâmetros (MARTINS e NING, 2021).

Além disso, apesar do uso de ML na área, muitos trabalhos não empregam uma metodologia de validação robusta, negligenciando uma separação mais criteriosa entre dados de treino, validação e teste, ou a avaliação da variabilidade estocástica dos modelos, o que pode levar a conclusões de desempenho superestimadas devido ao *overfitting*.

Diante deste cenário, este trabalho propõe um *framework* que visa, além de otimizar os hiperparâmetros de ANN e RF via GA, possibilita também a avaliação dos modelos de maneira mais abrangente, através de técnicas de *Cross-Validation*, *Selection Features* e uso de pesos em algumas amostras. Assim, o objetivo central do estudo é analisar como a otimização de hiperparâmetros, realizada pelo Algoritmo Genético afeta o desempenho comparativo dos modelos ANN e RF na predição do CBR, quando avaliados sob uma metodologia robusta.

2. METODOLOGIA

O estudo utilizou um banco de dados público da COPPE/UFRJ (FERREIRA, 2008), originalmente com 463 amostras de solos. O tratamento dos dados envolveu a remoção de colunas não pertinentes à predição de CBR. Sendo que, as colunas de interesse referem-se a parâmetros geotécnicos de caracterização dos solos, como limites de Atterberg (LL, IP) e dados de granulometria (D1-D6), além a exclusão de todas as amostras com valores ausentes em qualquer uma das colunas de interesse, resultando em um conjunto final de cerca de 330 amostras dependendo da seleção das features de input, definidas no *feature selection* dependendo da configuração experimental definida pelo usuário da ferramenta.

A análise exploratória revelou um forte desequilíbrio na variável-alvo (CBR), em que 75% das amostras apresentaram valores de CBR inferiores a 40 (%). O objetivo do modelo é fazer previsões precisas em toda a gama de valores, contudo essa concentração em valores baixos pode distorcer o treinamento, fazendo com que o modelo negligencie valores altos, que são menos presentes no dataset. Para mitigar esse viés, este estudo testa uma estratégia de ponderação atribuindo maior peso durante o treinamento às amostras de CBR alto (maiores do que 40%) que já existem na base de dados (GOOGLE DEVELOPERS, s.d.). O objetivo alvo é fazer com que o modelo ponderado demonstre uma capacidade preditiva mais equilibrada, embora ainda sujeita a limitações, como a subestimação de valores de CBR muito altos.

O conjunto de desenvolvimento é então utilizado no processo de otimização, onde um Algoritmo Genético (GA) busca a melhor combinação de hiperparâmetros para o modelo em questão (ANN ou RF). A aptidão (*fitness*) de cada configuração candidata durante a otimização é avaliada utilizando um dos dois métodos de validação: *Holdout* (divisão interna do conjunto de desenvolvimento) ou *K-Fold*. Para garantir a estabilidade contra a variabilidade estocástica do treinamento, a avaliação de cada indivíduo é repetida múltiplas vezes, e a média dos resultados é utilizada como a pontuação final de *fitness*.

Ao final do processo de otimização, a melhor configuração encontrada é utilizada para treinar um modelo final, cuja performance de generalização é medida no conjunto de teste.

2.1. Configuração experimental

Para avaliar os modelos de forma abrangente foi definida uma matriz de cenários experimentais, variando sistematicamente os seguintes fatores:

- Seleção de Modelo: Otimização para GA-ANN e GA-RF.
- Seleção de Features: Testes com alguns subconjuntos de features: D1: [D6, CH, CY]; D2: [D6, CH, CY, IP]; D3: [D6, CH, CY, IP, LL]; D4: [IG, EXP, D3, D4, D5, D6, CH, CY, IP, LL].
- Tratamento de Desbalanceamento: Execuções com e sem a aplicação de pesos para amostras de CBR alto.
- Método de Validação: Comparação entre *Holdout* e *K-Fold* (com K=5).

2.2. Modelagem e otimização

- Otimização: O GA foi utilizado para encontrar a melhor combinação de hiperparâmetros. A aptidão de cada indivíduo é calculada como a média da performance em múltiplas repetições para reduzir a variação estocástica dos modelos, ou seja, buscar o modelo mais estável.
- Avaliação Robusta: Após encontrar a melhor configuração, o modelo final é treinado e avaliado 10 vezes com diferentes sementes aleatórias. As métricas de performance (R^2 e MAE) são reportadas como a média.
- Análise: Os resultados são salvos em um diretório único, permitindo análises de convergência, viés e importância de features. A reprodutibilidade é garantida pelo uso de uma semente aleatória fixa e pela disponibilização do código-fonte presente no link do projeto: github.com/iagoLopex/TCC.

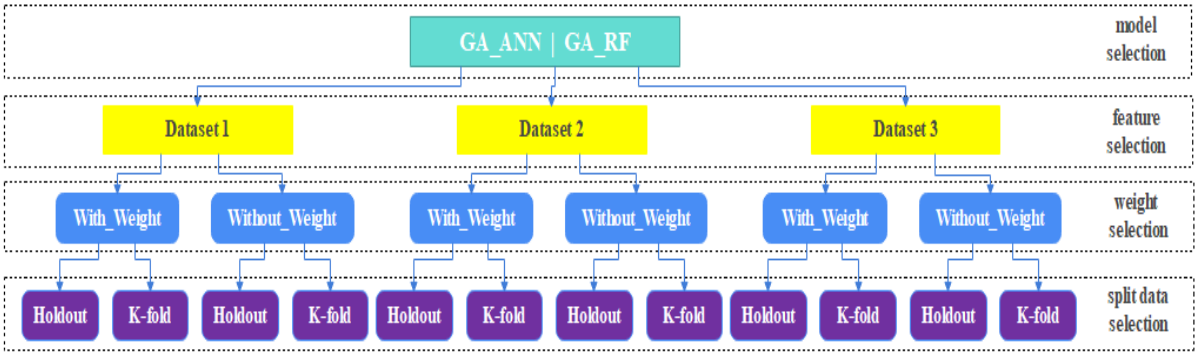


Figura 1: Fluxograma do Framework

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise comparativa de desempenho

A análise da Tabela 1 revela que, ao utilizar o conjunto de features mais completo (D4) e o método de validação Holdout, o modelo GA-ANN alcançou o maior R^2 no conjunto de teste (0.784) e um GAP de +0.007, demonstrando a performance preditiva mais elevada entre os cenários testados e o desenvolvimento de uma melhor generalização tanto das amostras de validação quanto de teste, pelo baixo valor do GAP, além validar que neste caso as redes neurais são melhores para capturar interações complexas entre muitas características. O modelo GA-RF, embora mais estável nos datasets mais simples (D1-D3), atingiu um pico de performance inferior (R^2 = 0.738) nas mesmas condições e um GAP de +0.159 (o modelo conseguiu obter acurácia muito melhor com as amostras de validação do que com as amostras de teste). Isso sugere que a arquitetura flexível das redes neurais, quando otimizada pelo GA, foi mais capaz de extrair padrões preditivos complexos a partir do conjunto de dados com mais informações de *input*.

Tabela 1: Resultados dos modelos de predição do CBR

Modelo	Entrada	Método de Validação	R^2 Validação	R^2 Teste	GAP (Val-Test)
GA-RF	D1	Holdout	0.783	0.718	+0.065
	D2	Holdout	0.786	0.716	+0.070
	D3	Holdout	0.789	0.721	+0.068
	D4	Holdout	0.897	0.738	+0.159
	D4	K-fold	0.753	0.751	+0.002
GA-ANN	D1	Holdout	0.816	0.677	+0.139
	D2	Holdout	0.803	0.694	+0.109
	D3	Holdout	0.852	0.616	+0.236
	D4	Holdout	0.791	0.784	+0.007
	D4	K-fold	0.798	0.756	+0.042

3.2. Análise de overfitting e viés do modelo

A Figura 2 demonstra a capacidade do melhor modelo em aprender a tendência geral dos dados de CBR (%), com a linha de predição próxima aos valores reais, especialmente para CBRs menores, capturando suas variações. Contudo, essa visualização revela uma limitação crítica: o modelo subestima picos de alto valor e superestima outros valores, falhando em alcançar a magnitude dos valores verdadeiros para as amostras mais elevadas (e.g., índices 3, 14, 24). Este comportamento é consistente com o desbalanceamento do dataset, onde a escassez de amostras com CBR elevado dificulta o aprendizado do modelo nessas faixas, reforçando a necessidade de análises de viés e estratégias de tratamento de dados para futuros aprimoramentos.

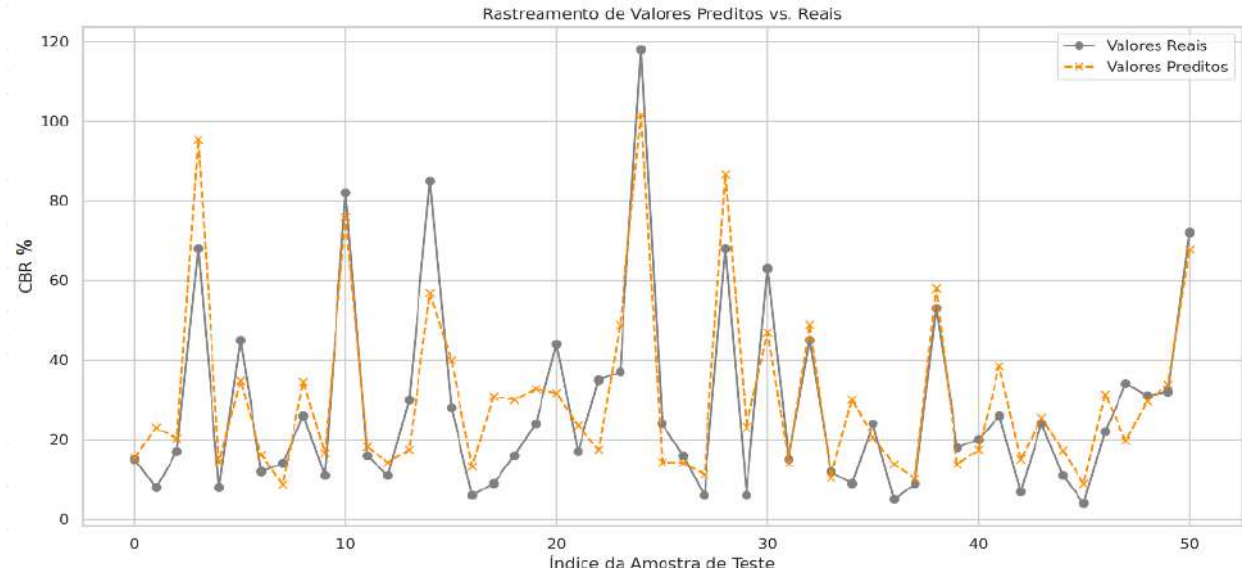


Figura 2: Gráfico Real vs. Predito do melhor modelo

4. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou que a otimização de hiperparâmetros por Algoritmos Genéticos aprimora significativamente modelos de Machine Learning para predição de CBR, com o GA-ANN, aliado ao conjunto de features mais completo (D4), alcançando o R^2 de 0.784 no teste. Além disso, análise comparativa evidenciou que a arquitetura flexível da ANN foi mais capaz de extrair padrões do conjunto de dados expandido, enquanto o GA-RF, apesar da estabilidade, apresentou maior dificuldade de generalização com o mesmo conjunto de features, indicado por um GAP (Val-Teste) superior.

Outro fator foi que a análise de viés do modelo final revelou uma limitação importante, em que a tendência de subestimar picos de alto valor de CBR, é um fator de comportamento consistente com o desbalanceamento identificado no dataset. Futuramente, portanto, sugere-se como passo principal a aplicação de técnicas de reamostragem para mitigar o viés na predição de valores elevados. Adicionalmente, recomenda-se a exploração de outros algoritmos, como o Gradient Boosting, para expandir os resultados obtidos e aplicações novas técnicas de metaheurísticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARDHAN, A.; P. Samui; K. Ghosh; A. H. Gandomi e S. Bhattacharyya (2021) ELM-based adaptive neuro swarm intelligence techniques for predicting the California bearing ratio of soils in soaked conditions. *Applied Soft Computing*, v. 110, p. 107595. DOI: 10.1016/j.asoc.2021.107595.

FERREIRA, J. G. H. M. Tratamento de Dados Geotécnicos Para Predição de Módulos de Resiliência de Solos e Britas Utilizando Ferramentas de Data Mining. 2008. Tese (D.Sc. em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Google Developers. (s.d.). Conjuntos de dados desequilibrados. Machine Learning Crash Course. Disponível em: https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/handling-imbalanced-classes. Acesso em: 5 jun. 2025.

MARTINS, J. R. R. A. e A. Ning (2021) *Engineering Design Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press.

TADO, N.; MEDIHAJIT, S.; PAL, D. Forecasting California bearing ratio (CBR) of soil using machine learning algorithms: A review. Research on Engineering Structures and Materials, v. 11, n. 1, p. 383-398, 2025.

YABI, C. P. et al. Prediction of CBR by Deep Artificial Neural Networks with Hyperparameter Optimization by Simulated Annealing. Indian Geotechnical Journal, v. 54, n. 1, p. 121-137, fev. 2024.

PREVISÃO DO ÍNDICE DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI) EM RODOVIAS FEDERAIS DO CEARÁ COM O USO DE ALGORITMOS DE *MACHINE LEARNING*

Milena V Ribeiro, Arielle Elias Arantes
Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal do Ceará

RESUMO
Este estudo teve como objetivo desenvolver modelos preditivos para estimar o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) em rodovias federais do Ceará, a partir de dados de defeitos superficiais registrados entre 2014 e 2022. Utilizaram-se os algoritmos *Random Forest* e *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost), com técnicas de pré-processamento, normalização e validação cruzada. A base, composta por mais de 150 mil registros, foi tratada para eliminar variáveis com baixa representatividade ou redundância. A análise de importância das variáveis foi realizada com o método SHAP (*SHapley Additive exPlanations*), destacando o percentual de remendos e a quantidade de panelas como principais influências no IRI. O XGBoost apresentou o melhor desempenho preditivo ($R^2 = 0,298$), seguido do *Random Forest* ($R^2 = 0,296$), ambos com erros médios inferiores a 1 m/km. Os resultados evidenciam que, mesmo com variáveis restritas a defeitos visuais, é possível prever o IRI com desempenho satisfatório.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte rodoviário é o principal meio de deslocamento do Brasil, responsável por aproximadamente 95% do transporte de passageiros e 65% do transporte de cargas. No entanto, boa parte da malha rodoviária nacional apresenta deficiências funcionais, agravadas pela falta de manutenção adequada. A qualidade do pavimento é comumente avaliada pelo IRI, métrica amplamente utilizada por refletir o conforto do rolamento e a condição da superfície da via.

A obtenção do IRI por meio de equipamentos como perfilômetros a laser, embora precisa, demanda alto investimento financeiro e logístico. Isso motiva o uso de abordagens preditivas baseadas em dados visuais de fácil obtenção. Estudos como os de Gharaibeh *et al.* (2021) e Rodríguez-Alloza *et al.* (2023) demonstraram que algoritmos como *Random Forest* e XGBoost são eficazes na estimativa do IRI com base em defeitos superficiais e variáveis estruturais.

Neste contexto, o presente estudo propõe a aplicação desses algoritmos na previsão do IRI em rodovias federais do estado do Ceará, com base em dados de inspeção visuais realizadas entre 2014 e 2022. Além da modelagem, o estudo incorpora o método SHAP para interpretação dos modelos e a biblioteca Optuna para calibração de hiperparâmetros, buscando aliar precisão e transparência às predições geradas.

2. METODOLOGIA

2.1. Coleta e preparação dos dados

O conjunto de dados utilizado foi obtido junto ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e abrange trechos de diversas rodovias federais localizadas no estado do Ceará. As inspeções foram realizadas entre 2014 e 2022, com registros a cada 100 metros, totalizando 154.575 observações. A variável dependente foi o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI), expresso em m/km, enquanto as variáveis explicativas incluíram defeitos superficiais como trincamento, remendo, desgaste e quantidade de panelas.

2.2. Pré-processamento dos Dados

Foram realizadas etapas de limpeza, padronização e normalização das variáveis. Variáveis com baixa frequência ou redundância conceitual foram excluídas. A quantidade de panelas, por exemplo, foi normalizada utilizando *Min-Max Scaling*. A base foi dividida em 80% para treino e 20% para teste, de forma aleatória.

2.2. Algoritmos de *Machine Learning*

Foram utilizados dois algoritmos supervisionados de regressão: *Random Forest* e XGBoost, ambos baseados em árvores de decisão, porém com estratégias distintas de construção e aprendizado. O ajuste fino dos hiperparâmetros foi feito via biblioteca Optuna, utilizando validação cruzada com 3 folds e minimização do RMSE como critério. Para o *Random Forest,* por exemplo, os parâmetros otimizados incluíram número de árvores (n_estimators = 117), profundidade máxima (max_depth = 5), e critérios de divisão (min_samples_split = 5, min_samples_leaf = 1). Com base na pesquisa desenvolvida, os modelos preditivos

para estimar o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) foram avaliados por meio de três métricas principais: o Coeficiente de Determinação (R^2), o Erro Médio Absoluto (MAE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

2.2.1. Random Forest

Proposto por Breiman (2001), é um método de *ensemble* que combina várias árvores de decisão construídas a partir de diferentes subconjuntos de dados e variáveis. Cada árvore é treinada com uma amostra aleatória com reposição (*bootstrapping*), e, para problemas de regressão, a previsão final é a média das saídas de todas as árvores. O modelo reduz a variância em relação a uma única árvore e é robusto a *overfitting*. A predição $\hat{y}$ para uma instância x é dada por:

$$\hat{y} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} h_t(x) \quad (1)$$

Onde $h_t(x)$ representa a predição da árvore t, e T é o número total de árvores.

2.2.2. XGBoost

O XGBoost, por sua vez, é um algoritmo de *boosting* baseado em gradientes, onde as árvores são construídas sequencialmente. A cada iteração, uma nova árvore é treinada para corrigir os erros residuais das anteriores, minimizando uma função de perda regularizada. O modelo preditivo é representado como uma soma de funções:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^{k} f_k(x_i) \quad (2)$$

Onde f_k representa uma árvore de decisão, e $\mathcal{F}$ é o espaço das possíveis árvores. A função objetivo a ser minimizada é composta por um termo de erro e um termo de regularização:

$$\zeta = \sum_{i=1} l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^{k} \Omega(f_k) \quad (3)$$

Ambos os modelos foram implementados em *Python*, utilizando as bibliotecas *scikit-learn* e *xgboost*. A escolha dos algoritmos se deve à sua reconhecida eficácia em tarefas de regressão com dados tabulares, capacidade de lidar com não linearidades e facilidade de interpretação com técnicas como SHAP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação dos defeitos superficiais

A análise inicial mostrou que os defeitos mais frequentes nos trechos avaliados foram trincamento (%) e remendo (%), com representatividade de 44,5% e 23,5%, respectivamente. Em contrapartida, variáveis como afundamento, exsudação e escorregamento apresentaram baixa frequência (<5%) e impacto estatístico marginal, sendo excluídas da modelagem final.

A seguir, a Figura 1 apresenta os valores médios absolutos dos impactos SHAP para as variáveis utilizadas no modelo *Random Forest*. O gráfico indica que remendo (%) e quantidade de panelas (normalizada) foram avaliadas as variáveis mais influentes na predição do IRI, seguidas por trincamento (%) e desgaste (%).

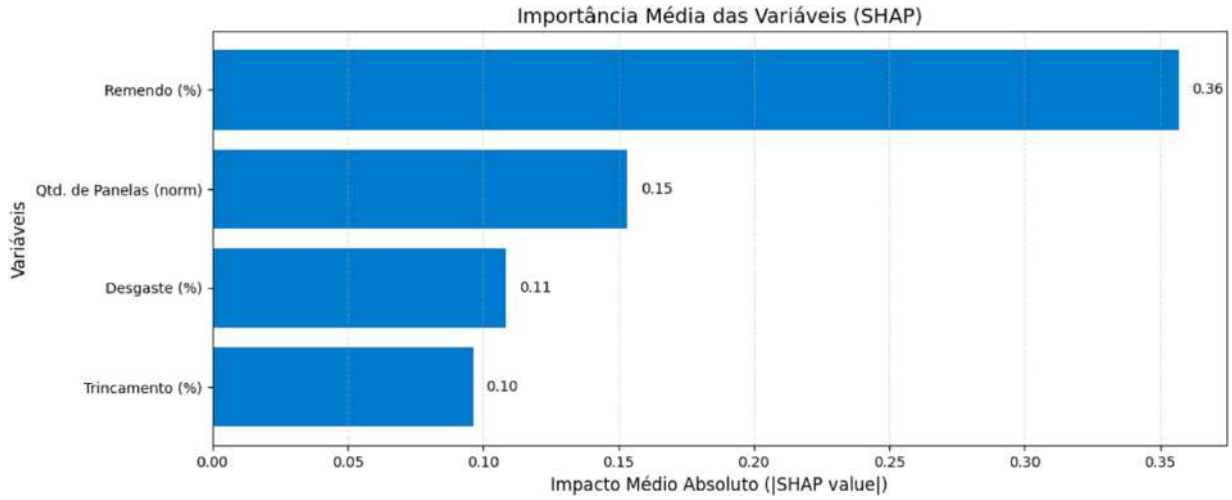


Figura 1: Importância média das variáveis explicativas para o modelo Random Forest.

Importante destacar que o modelo XGBoost apresentou comportamento semelhante em relação à contribuição das variáveis, com destaque também para remendos e panelas como principais preditores. Isso reforça a consistência dos resultados e a relevância desses defeitos na explicação da irregularidade longitudinal.

3.2. Importância das variáveis

Utilizando o método SHAP, foi possível interpretar as contribuições individuais de cada variável para os modelos preditivos. Em ambos os algoritmos, as variáveis remendo (%) e quantidade de panelas apresentaram maior impacto sobre o IRI. Por outro lado, trincamento (%) e desgaste (%) tiveram influência mais moderada, o que está alinhado com a literatura que associa maior influência do IRI a defeitos tridimensionais.

3.3. Desempenho dos modelos

Os modelos foram avaliados com base no conjunto de teste, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Comparação do desempenho dos modelos

Algoritmo	R^2	MAE (m/km)	RMSE (m/km)
Random Forest	0,253	0,797	1,166
XGBoost	0,286	0,780	1,140

O XGBoost apresentou desempenho ligeiramente superior ao XGBoost, explicando cerca de 28% da variabilidade do IRI. Ambos os modelos tiveram erros médios absolutos inferiores a 1 m/km, o que é considerado aceitável para explicação em apoio à manutenção rodoviária.

3.4 Calibração dos hiperparâmetros

A calibração foi realizada utilizando a biblioteca Optuna, com validação cruzada e otimização *bayesiana*, buscando minimizar o RMSE. A Tabela 2 apresenta os resultados dos modelos após a calibração:

Tabela 2: Desempenho dos modelos após calibração

Algoritmo	R^2	MAE (m/km)	RMSE (m/km)
Random Forest	0,296	0,778	1,280
XGBoost	0,298	0,776	1,277

Para o *Random Forest*, a calibração resultou em um ganho de 17% em R^2 e uma redução de 2,38% no MAE, indicando melhora significativa na explicação da variabilidade do IRI e na precisão das predições. Já o XGBoost teve ganhos mais modestos, com aumento de 4,2% em R^2 e redução de 0,51% no MAE.

Apesar de um leve aumento no RMSE em ambos os casos, os modelos calibrados apresentaram maior estabilidade e desempenho médio superior, confirmando a importância da etapa de otimização dos hiperparâmetros.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a viabilidade do uso de algoritmos de aprendizado de máquina para prever o Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI) em rodovias federais do estado do Ceará, a partir de dados de defeitos superficiais coletados por inspeção visual entre 2014 e 2022. Utilizando os modelos Random Forest e XGBoost, foi possível estimar o IRI com desempenho considerado satisfatório, mesmo com um conjunto de variáveis restrito a defeitos bidimensionais e tridimensionais.

A análise de importância com SHAP evidenciou os remendos e a quantidade de panelas como as variáveis mais influentes na predição do IRI, reforçando achados da literatura. A calibração dos hiperparâmetros com a biblioteca Optuna contribuiu para melhorias relevantes no desempenho, especialmente no modelo Random Forest. Ambos os modelos apresentaram R^2 abaixo de 0,30, com destaque para o XGBoost após calibração (R^2 = 0,298). O R^2 relativamente baixo (0,30) indica que apenas uma parcela da variabilidade do IRI foi explicada pelas variáveis incluídas, o que pode ser atribuído à complexidade multifatorial da irregularidade longitudinal, influenciada por elementos externos não capturados no modelo, como condições climáticas, volume de tráfego e histórico de manutenção.

Embora não tenha sido estabelecida uma meta numérica explícita para o R^2, valores de MAE em torno de 0,80 m/km e RMSE de aproximadamente 1,28 m/km foram considerados satisfatórios para aplicações de apoio à gestão viária, especialmente quando se considera a ampla variação do IRI na base de dados (de 0,5 a mais de 20 m/km). Esses parâmetros refletem uma precisão aceitável para priorização de intervenções em escala estratégica, ainda que com limitações para previsões em nível localizado.

Conclui-se que, mesmo com limitações nos dados disponíveis, a modelagem preditiva do IRI pode servir como ferramenta complementar para a priorização de manutenção, apoiando a tomada de decisão de forma mais ágil, econômica e transparente.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de variáveis estruturais, informações de tráfego e dados climáticos, bem como a aplicação de técnicas mais avançadas de seleção de atributos e modelagem temporal. Essas melhorias podem elevar a capacidade explicativa dos modelos e ampliar seu uso em diferentes contextos da gestão rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, L. C. (2018) *Aplicativo para smartphone destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/39992 (acesso em 14/07/2025).

Breiman, L. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324

Chen, T. e C. Guestrin (2016) XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, p. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785

Gharaibeh, N.; Y. Qiao; M. Alinazzi; M. Alamaniotis e S. Labi (2021) Estimating IRI based on pavement distress type, severity, and density using machine learning. *arXiv preprint*. DOI: 10.48550/arXiv.2103.06412

Rodríguez-Alloza, A. M.; P. Pérez; C. Menéndez e A. Castañeda (2023) Explainable AI for evaluating road roughness based on pavement distresses using SHAP and XGBoost. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 10, n. 2, p. 137–148. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.07.007

DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

CNT (2024) *Pesquisa CNT de Rodovias – Relatório Gerencial*. 21ª ed. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: https://pesquisarodovias.cnt.org.br (acesso em 14/07/2025).

Sayers, M. W. e T. D. Gillespie (1986) *The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*. Washington, D.C.: World Bank. Technical Paper 45.

Espíndola, G. B. (2022) *Predição do IRI em rodovias federais brasileiras utilizando algoritmos de aprendizado de máquina*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46198 (acesso em 14/07/2025).

Milena Vasconcelos Ribeiro (eng.milenaribeiro@gmail.com)
Universidade Federal do Ceará
Av. Humberto Monte, s/n, Pici, Fortaleza, CE, Brasil

Arielle Elias Arantes (aearantes@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes
Av. Humberto Monte, s/n, Pici, Fortaleza, CE, Brasil

PROPOSTA PRELIMINAR DE UM REPOSITÓRIO NACIONAL ABERTO DE ENSAIOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Melo C.D.R.[1, 2], **Carvalho P.H.J.**[1], **Mariano, L.G**[2]., **Babadopulos L.F.A.L.**[3], **Parente Junior, E.**[3], **Soares, J.B.**[2]

[1] Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús,[2] Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, [3] Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil.

RESUMO

Este trabalho apresenta a estruturação de um banco de dados nacional e aberto de misturas asfálticas. O repositório reúne 358 misturas com dados integrados de ligantes, agregados e misturas, organizados por amostra. Seu objetivo é oferecer uma base acessível e útil para pesquisa e aplicação em engenharia. A metodologia incluiu a seleção de ensaios e variáveis relevantes, com base em revisão bibliográfica, seguida por coleta e análise descritiva dos dados. A curadoria técnica envolveu o tratamento de outliers, lacunas e ajustes nos atributos conforme novas informações eram incorporadas. O banco busca abranger ampla diversidade de dados, como diferentes peneiras na granulometria e variáveis do ensaio de módulo complexo. Este repositório é um recurso aberto, voltado à comunidade técnica, para fomentar o avanço da engenharia de pavimentos com apoio de ferramentas de ciência de dados. O crescimento do repositório ocorrerá de forma colaborativa, com rigor técnico garantido em cada nova submissão.

Palavras-chave: banco de dados; ensaios de laboratório; misturas asfálticas; curadoria; ciência de dados
banco de dados, ensaios de laboratório, misturas asfálticas, curadoria, ciência de dados

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observa-se uma mudança de paradigma nos métodos de dosagem de misturas asfálticas. Abordagens puramente volumétricas vêm cedendo espaço a metodologias baseadas em desempenho. Rocha et al. (2024) destacam que essa transição demanda estudos experimentais mais robustos. Na dosagem volumétrica, aspectos como o uso de ligantes modificados ou materiais reciclados não têm seu impacto devidamente considerado, o que pode ser incorporado em metodologias orientadas ao desempenho.

Essa nova abordagem exige o desenvolvimento de bancos de dados capazes de correlacionar ensaios laboratoriais avançados com características de constituição e desempenho em campo. Além da geração dos dados, há o desafio de integrá-los de forma sistemática e acessível.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) lidera a gestão da malha rodoviária federal e publica normas e métodos de ensaio. Contudo, não foram identificados bancos públicos específicos para dados de misturas asfálticas. O Portal Nacional de Dados Abertos (Dados.gov.br, 2025) disponibiliza informações mensais sobre as condições dos pavimentos desde 2020, incluindo atributos como rodovia, quilometragem, coordenadas, tipo de defeito, data da coleta, entre outros. Há também um glossário técnico para padronização terminológica.

A academia brasileira tem avançado na criação de bases de dados voltadas à pavimentação, embora muitas ainda não estejam amplamente acessíveis. A Universidade de Brasília (UnB, 2020) atua na ampliação do banco de dados utilizado na calibração da função de transferência do método MeDiNa (DNIT, 2014). Na COPPE-RJ, pesquisas sobre *Balanced Mix Design* (BMD) reforçam a importância de consolidar bancos de dados específicos (MOTA et al., 2023; ROCHA et al., 2023, 2024). Iniciativas semelhantes ocorrem em instituições como a UFSM (FACCIN et al. 2021; BUENO et al. , 2025), UFC (FONSECA et al., 2020; MARIANO, 2021), dentre outras. O que reforça a importância histórica deste momento da engenharia rodoviária, preocupada com uma transição para um período mais intenso em uso de dados que são custosos de obtenção, e com cada vez maior disponibilidade de ferramentas de análise (aprendizado de máquina, ciência de dados em geral, etc.). Tais ferramentas têm resultados essencialmente dependentes da própria qualidade (além da quantidade) de dados (Bishop 2006, Bruce *et al* 2017,).

Internacionalmente, destaca-se o programa LTPP (*Long-Term Pavement Performance*), que desde 2019 coleta dados de mais de 2500 trechos experimentais com revestimentos asfálticos e de concreto. A base inclui ensaios laboratoriais, dados de tráfego, clima e desempenho ao longo do tempo, disponíveis publicamente via a plataforma InfoPave (https://infopave.fhwa.dot.gov/) (FHWA, 2025). Iniciativas como

MnROAD (Minnesota DOT, 2025) e NCAT (2025) também disponibilizam dados de sensores de campo, clima e tráfego.

Na Europa, o projeto *AsphaltMine*, lançado em 2024, disponibiliza dados de ensaios laboratoriais segundo normas europeias, com foco em aplicações de aprendizado de máquina. Pesquisadores podem contribuir com dados e acessar ferramentas preditivas baseadas nesses conjuntos (ASPHALTMINE, 2025).

Embora a produção de dados seja uma etapa intensiva, a curadoria é igualmente crucial, pois envolve a coleta, organização, manutenção e garantia da qualidade e utilidade dos dados (BRUCE et al., 2017). Vo et al. (2024) demonstram sua relevância ao comparar modelos de aprendizado de máquina treinados com dados brutos, curados manualmente e curados automaticamente, observando melhor desempenho nos dados curados, especialmente em cenários de generalização fora da distribuição. Bhardwaj et al. (2024, 2025) reforçam essa importância e destacam a ausência de práticas sistemáticas de curadoria, propondo um checklist de avaliação aplicado a mais de 60 bases, o qual revela falhas recorrentes que comprometem a acurácia e o desempenho dos modelos.

O LTPP demonstra que a curadoria contínua, com métodos padronizados, documentação técnica e atualizações regulares, permite análises comparativas robustas ao longo do tempo (FHWA, 2025). Essa consistência viabiliza estudos longitudinais e modelos preditivos confiáveis. Em bancos como o proposto, a curadoria é central para integrar dados diversos e ampliar sua aplicabilidade em pesquisa e engenharia.

Este trabalho propõe um repositório nacional e aberto de ensaios de misturas asfálticas, com dados de ligantes, agregados e misturas. A base reúne ampla variedade de ensaios e atributos, com potencial de uso tanto na pesquisa científica quanto na prática da engenharia. Os dados são coletados a partir de fontes técnicas e acadêmicas, incluindo contribuições do INCT-Infra (UFC). Parte do conteúdo permanece restrita por acordos de confidencialidade, mas todos os dados livres são curados e disponibilizados publicamente. A ampliação contínua da base depende do engajamento de instituições e pesquisadores.

2. METODOLOGIA

O banco de dados integra os principais ensaios de ligantes, agregados e misturas asfálticas. Cada amostra (linha, "instância" conforme termo utilizado em ciência de dados) possui um ID único e concentra todas as características informadas (os "atributos") dessas três classes de ensaios. Complementarmente ao banco de dados, foi elaborado um Glossário de Ensaios, onde cada ensaio e seus atributos são brevemente explicados, incluindo nome, descrição, normas vigentes, procedimento e variáveis de entrada e saída. Essas informações foram organizadas em planilhas no Excel: uma com os resultados dos ensaios e outra com o Glossário (Fig. 1), de forma a facilitar de maneira mais ampla a adesão por parte de mais pesquisadores e profissionais.

Uma extensa revisão bibliográfica foi realizada para definir os ensaios a serem incluídos, com as referências consultadas indicadas no próprio Banco de Dados. A seguir, apresenta-se a lista completa dos ensaios presentes no banco de dados e glossário de ensaios:

Ensaios De Ligantes: Tipo de Ligante, Grau de Desempenho, Penetração, Viscosidade Rotacional (135ºC), Ponto de Amolecimento, Suscetibilidade Térmica, Ponto de Fulgor, Espuma, Massa Específica, Ponto de Ruptura Frass, Envelhecimento do Ligante - RTFOT, Recuperação Elástica, Fragilidade e Tenacidade, *Multiple Stress Creep and Recovery* - MSCR, *Linear Amplitude Sweep* - LAS.

Ensaios De Agregados: Análise Granulométrica, Densidade Relativa Aparente, Massa Específica Aparente, Massa Específica Real, Massa Específica Submersa, Abrasão Los Angeles, Resistência ao Esmagamento de Agregados Graúdos, Resistência Mecânica pelo Método dos 10% de Finos, Determinação do Índice de Forma com Crivos, Determinação da Absorção, Adesividade a Ligante Betuminoso - Ensaio Visual de Adesividade.

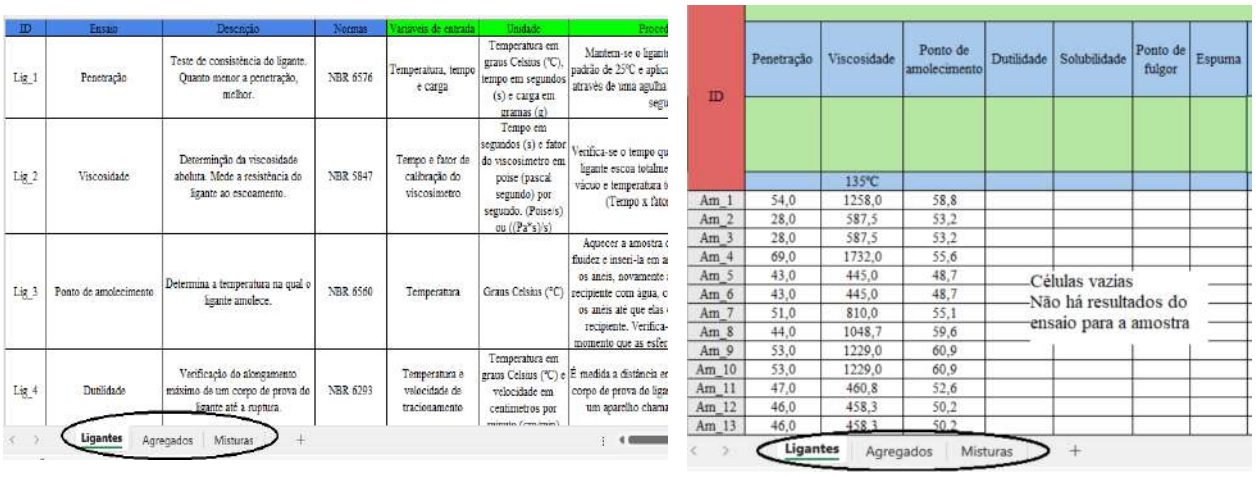
Ensaios De Misturas Asfálticas: Teor de Ligante, Índice de Densificação na Compactação, Volume de Vazios no CP, Volume de Vazios no Agregado Mineral (VAM), Relação Betume/Vazios, Relação

Fíler/Betume, Módulo de Resiliência, Módulo Complexo, Varredura de Tensão para Afundamento por Trilha de Roda (SSR), *Flow Number* (FN), Resistência à Tração, Danos por Fadiga - Tração-Compressão Cíclica Uniaxial, Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.

Foram incluídos 39 ensaios com informações distribuídas em 137 atributos, sendo 17 ensaios de ligantes com 39 atributos, 11 ensaios de agregados com 29 atributos e 11 ensaios de misturas asfálticas com 69 atributos. Para garantir a generalidade do banco de dados, cada ensaio foi estudado para incluir todas as variáveis relevantes. Essa etapa se mostrou fundamental, uma vez que, apesar da mesma norma, a forma de registro dos resultados varia significativamente entre referências bibliográficas, em função dos métodos de análise utilizados.

Um exemplo disso é o ensaio de módulo complexo. Observa-se que, por vezes, são armazenados os coeficientes de função sigmóide (ou outros modelos reológicos como 2S2P1D) e *shift factor*; em outros casos, listas de frequências reduzidas e seus módulos; e, ocasionalmente, ambas as versões ou apenas algumas frequências. Neste trabalho, todas as versões foram contempladas, incluindo coeficientes e a lista completa de frequências reduzidas com seus módulos, facilitando a inclusão de novas amostras. De modo similar, na granulometria, os dados de percentuais retidos nas peneiras foram padronizados para generalizar o banco de dados. Selecionou-se uma ampla gama de aberturas de peneiras, mesmo que nem todas as amostras tivessem sido ensaiadas em todas elas.

O conjunto de atributos do banco de dados, portanto, permitiu que fosse construído de forma a tornar o banco de dados mais abrangente possível. Isso facilita a inclusão de novos dados com pouco ou nenhuma alteração dos atributos, ao mesmo tempo que auxilia na extração de subconjuntos para estudos específicos.



(a) (b)

Figura 1: Imagens da planilha contendo o Banco de Dados, destacando-se as três abas organizando os dados e informações de Ligantes, Agregados e Misturas: (a) Glossário de Ensaios; (b) Banco de Dados de Ensaios.

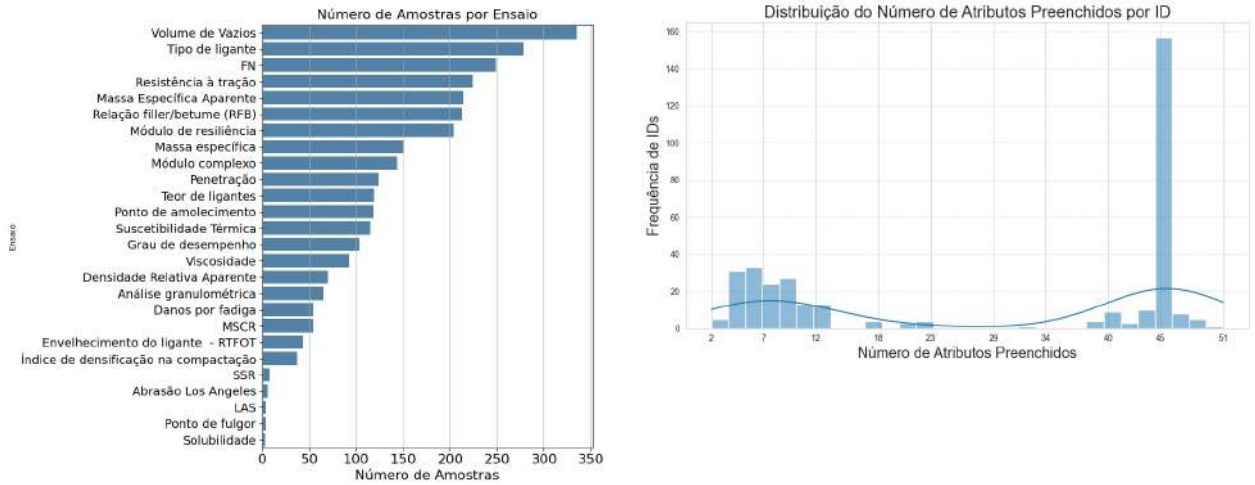
As fontes utilizadas nesta versão do banco foram agrupadas em duas categorias: (i) conjuntos de dados provenientes de iniciativas de pesquisa ainda não publicadas, e (ii) materiais técnicos de acesso público disponíveis online. Cada amostra teve sua origem registrada e foi classificada quanto à disponibilidade: sigilosa, não publicada ou livre. Todos os dados são usados nas análises, mas apenas os livres são disponibilizados em https://virtualasphaltlab.com/.

3. RESULTADOS

A curadoria do banco de dados foi feita analisando individualmente cada amostra, cada ensaio e cada parâmetro. Começa-se com a leitura dos trabalhos e a extração dos dados. A presença de *outliers* é analisada com gráficos como *boxplots* e *scatterplots*, sempre com apoio do conhecimento técnico em mecânica dos pavimentos para diferenciar erros de valores marginais, que são importantes para manter a generalidade.

Também é avaliado o procedimento do ensaio e como os dados são apresentados; quando necessário, os atributos são ajustados para garantir maior compatibilidade entre diferentes fontes e métodos. Tais procedimentos são baseados em diretrizes que podem ser consultadas na literatura (BRUCE et al., 2017; BHARDWAJ et al., 2024; BHARDWAJ et al., 2025).
Ao final, foram coletados dados de 358 misturas asfálticas. No entanto, o repositório tem apresentado muitos valores ausentes. Considerando a grande quantidade de ensaios existentes, as suas diferentes aplicações, e o tamanho/estrutura do repositório proposto neste trabalho, isso era esperado. Os dados de ensaios de ligantes apresentam apenas cerca de 20% das células preenchidas, os de agregados cerca de 10% e os de misturas 40%. Por outro lado, 7 ensaios concentraram mais de 200 amostras: Volume de Vazios, Tipo de Ligante, *Flow Number*, Resistência à Tração, Massa Específica Aparente, Relação Fíler-Betume e Módulo de Resiliência. Todos esses, ensaios estratégicos para caracterização de misturas asfálticas. Também vale destacar a coleta de quase 150 amostras com dados de Módulo Complexo, além de um pouco mais de 50 amostras dos ensaios MSCR e de Dano por Fadiga – Tração-Compressão Cíclica Uniaxial. Ver Figura 2 (a).

Também foi analisada a completude dos dados por amostra. A Figura 2 (b) mostra quantas amostras têm quantidades semelhantes de atributos preenchidos no banco. Por exemplo, quantas amostras têm entre 10 e 20 atributos? E assim por diante. Observa-se uma distribuição polarizada: cerca de 30 amostras têm entre 2 e 13 atributos preenchidos, enquanto cerca de 150 têm por volta de 45 atributos. Quase não há amostras com preenchimento intermediário, o que sugere dois núcleos distintos: um mais robusto e outro mais fragmentado. Isso já era esperado, considerando o volume e a diversidade dos ensaios incluídos.



(a) (b)

Figura 2: Levantamento quantitativo do banco de dados. (a) Total de amostras por tipo de ensaio. (b) Número de atributos por amostra (ID).

Essa heterogeneidade reflete a origem dos dados, coletados ao longo de anos em diferentes projetos, artigos e trabalhos técnicos, cada um com objetivos próprios. A constatação reforça a relevância deste esforço de curadoria e evidencia a necessidade de uma cultura mais sólida de gestão de dados em pavimentação, especialmente para viabilizar análises avançadas e maior integração entre iniciativas de pesquisa e aplicação prática.

A curadoria dos dados precisa deixar de ser um esforço isolado para se tornar um processo coletivo e transparente. Este trabalho propõe justamente o começo disso: uma iniciativa colaborativa com a criação de um comitê técnico-científico que defina critérios, acompanhe as submissões e revise os padrões com regularidade. Assim como as revistas científicas, essa governança pode tornar o banco mais confiável, interoperável e representativo. Não se trata de encerrar o debate, mas de iniciar algo profissional, aberto e construído em conjunto com laboratórios, instituições públicas, privadas e acadêmicas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a versão inicial de um repositório nacional de dados de misturas asfálticas, com curadoria aplicada a diferentes ensaios e fontes. Trata-se de uma iniciativa em desenvolvimento, cujo avanço depende do engajamento da comunidade técnica. Recomenda-se a criação de um comitê técnico-científico para definir critérios, revisar dados e orientar a curadoria de forma contínua e transparente. A confiabilidade do repositório requer uma construção colaborativa entre instituições e profissionais da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ASPHALTMINE. AsphaltMine. [S. l.]: AsphaltMine, [s.d.]. Disponível em: https://asphaltmine.org/. Acesso em: 11 jun. 2025.

BHARDWAJ, E.; GUJRAL, H.; WU, S.; ZOGHEIB, C.; MAHARAJ, T.; BECKER, C.. Machine Learning Data Practices through a Data Curation Lens: An Evaluation Framework. In: ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '24), 2024, Rio de Janeiro. Proceedings [...]. New York: ACM, 2024. p. 1–52. DOI: https://doi.org/10.1145/3630106.3658955.

BHARDWAJ, E.; GUJRAL, H.; WU, S.; ZOGHEIB, C.; MAHARAJ, T.; BECKER, C.. The State of Data Curation at NeurIPS: An Assessment of Dataset Development Practices in the Datasets and Benchmarks Track. arXiv preprint arXiv:2410.22473v2, 2025. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2410.22473.

Bishop, C.M.. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.

Bruce, P.; Bruce, A.; Gedeck, P.. Practical Statistics for Data Scientists, 50+ Essential Concepts Using R and Python. O'Reilly Media, Inc., 2017.

BUENO, L.D.; PEREIRA,D.S.; SPECHT, L.P.; NASCIMENTO, L.A.H.; SCHUSTER, S.L.; FRITZEN, M.A.; KIM, L.R.; BACK, A.H.. Contribution to the mechanistic-empirical roughness prediction in asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, Abingdon, v. 23, n. sup1, p. S129–S147, 2022. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2029758. Acesso em: 12 jun. 2025.

DNIT. TED n° 682/2014. Brasília, DF: DNIT, 2014.

FACCIN, C.; SPECHT, L. P.; PEREIRA, D. S.; BUENO, L. D.; BRONDANI, C.; BOEIRA, F. D.; SCHUSTER, S. Proposta de banco de dados de misturas asfálticas estudadas no Estado do Rio Grande do Sul. REVISTA ESTRADAS (PORTO ALEGRE) , v. 26, p. 59-66, 2021.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Long-Term Pavement Performance (LTPP) data catalog. Disponível em: https://catalog.data.gov/dataset/long-term-pavement-performance-ltpp-data-0549d. Acesso em: 11 jun. 2025.

MARIANO, A. L. G.; SOARES, J. B.; MELO, C. D. R. Metodologia Baseada Em Redes Neurais Artificiais Para Previsão Da Deformação Permanente De Misturas Asfálticas. In: 36ª ANPET, 2022, Fortaleza. Anais do 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2022. v. Vol 1.

MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. MnROAD Data - Road Research - MnDOT. [S. l.]: Minnesota Department of Transportation, [s.d.]. Disponível em: https://www.dot.state.mn.us/mnroad/data/index.html. Acesso em: 11 jun. 2025.

NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY. National Center for Asphalt Technology. [S. l.]: Auburn University, [s.d.]. Disponível em: https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/. Acesso em: 11 jun. 2025.

MOTA, B.C.; IGNEZ, B.P.; SILVA, G.V.; ARAGÃO, F.T.S.; ESPÍNDOLA, R.P .. Construção E Análise De Banco De Dados De Misturas Asfálticas Com Ferramentas De Inteligência Artificial. In: ANAIS DO CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2023, Santos. Anais eletrônicos, Galoá, 2023

PORTAL NACIONAL DE DADOS ABERTOS. Condições do Pavimento. Brasília, DF, Disponível em: https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/condicoes-do-pavimento1. Acesso em: 5 jun. 2025.

ROCHA, M.L.; ESPÍNDOLA, R.P.; ARAGÃO, F.T.S. Previsão de resistência à fadiga de misturas asfálticas - uma abordagem orientada por dados. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 37., 2023, Santos-SP. *Anais [...]* Santos-SP: ANPET, 2023.

ROCHA, M.L.; ARAGÃO, F.T.S.; NASCIMENTO, L.A.H. Dosagem de misturas asfálticas relacionada com o desempenho: uma revisão da literatura. TRANSPORTES, v. 32, n. 3, set. 2024.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Plano de Trabalho: Aprimoramento e consolidação do método mecanístico-empírico de dimensionamento para pavimentos rodoviários flexíveis (MeDiNa) e estudos complementares com geossintéticos e drenagem para pavimentos ferroviários. Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/acesso-a-informacao/convenios/termos-de-execucao-descentralizada/ted-no-352-2020-00/copy_of_copy_of_PLANODETRABALHO0.pdf. Acesso em: 5 jun. 2025.

VO, H.V.; KHALIDOV, V.; DARCET, T.; MOUTAKANNI, T.; SMETANIN, N.; SZAFRANIEC, M.; TOUVRON, H.; COUPRIE, C.; OQUAB, M.; JOULIN, A.; JÉGOU, H.; LABATUT, P.; BOJANOWSKI, P.. Automatic Data Curation for Self-Supervised Learning: A Clustering-Based Approach. *arXiv preprint arXiv:2405.15613v2*, 2024.

SEGMENTAÇÃO DE TRINCAS EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS COM U-NET ESTENDIDA E BLOCOS *SQUEEZE-AND-EXCITATION*

Lucas di Franco Albuquerque, Vítor Schmidt Teixeira, Vinicius Coldebella Camillo, Fernanda Vargas Ramires, Julia Pereira Sampaio, Gabriel Venturella de Oliveira, Felipe Trois Garcia
Pavesys Engenharia

RESUMO
Este trabalho tem como objetivo aprimorar a segmentação de trincas em pavimentos asfálticos por meio de uma arquitetura *U-Net* estendida. Para tanto, foi adicionada uma camada extra de convolução em cada nível, adotada a função de ativação *ReLU* e incorporados blocos *Squeeze-and-Excitation* (*SE*) para atenção aos canais de característica. O modelo foi treinado com um conjunto de imagens reais anotadas manualmente, enriquecido por amostras sintéticas e transformações geométricas, fotométricas, recortes e deformações para o aumento de dados. Os resultados demonstraram ganho de 2,79 p.p. no *F1-score*, passando de 78,83 % para 81,62 %, e de 3,94 p.p. no *IoU*, de 65,06 % para 69,00 %, em comparação à *U-Net* original. Esses avanços indicam maior precisão na detecção de trincas e robustez frente a variações de iluminação e ruído, diminuindo a necessidade de anotações manuais extensas.

1. INTRODUÇÃO

A falta de manutenção em pavimentos asfálticos leva à sua deterioração precipitada, sendo as trincas um dos primeiros sinais de falhas. Por isso, a detecção e reparação das trincas é fundamental para a redução dos custos e dos impactos ambientais, além de prolongar a vida útil da estrutura. Diante disso, empresas privadas e governamentais têm investido em tecnologias que permitam métodos autônomos de detecção de defeitos, aumentando a velocidade, precisão e segurança dos levantamentos (Kheradmandi e Mehranfar, 2022). Dentre os métodos de levantamento autônomos, o estudo de redes neurais convolucionais profundas tem crescido devido ao seu baixo custo e rápida capacidade de processamento.

Com o objetivo de segmentar objetos pequenos em superfícies de imagens com fundos complexos, Ronneberguer et al. (2015) introduziram a arquitetura *U-Net*, que consiste num caminho de contração para extração de contexto de imagem, e, posteriormente, um caminho de expansão simétrico para a localização precisa dos objetos. Posteriormente, Jenkins et al. (2018) estão entre os pioneiros em aplicar a *U-Net* para a segmentação de trincas em pavimentos a nível de pixel, demonstrando uma boa detecção para trincas mais finas e descontínuas, superando outros métodos conhecidos de aprendizado de máquina. Martins et al. (2021) comprovam que a *U-Net* é um método mais robusto em comparação aos métodos tradicionais de limiarização e processamento de imagens, apresentando uma melhor segmentação, e lidando de forma satisfatória com variações de iluminação e ruído, no entanto, este método exige uma maior demanda de um banco de dados anotados e devidamente balanceados. A fim de otimizar a etapa de construção do *dataset*, Kanaeva & Ivanova (2021) combinaram máscaras de trincas reais, dados de trincas sintéticas e imagens de estradas sem defeitos para o treinamento da *U-Net*. Desta forma, foi evidenciado que o uso combinado de exemplos sintéticos e de trincas reais apresenta um resultado robusto, enquanto reduz o tempo de trabalho para a anotação do banco de dados.

Rundo et al. (2019) escolheram incorporar blocos de compressão e excitação chamados *Squeeze-and-Excitation* (*SE*) à arquitetura *U-Net*, capazes de resumir as informações e depois reajustá-las dinamicamente, enfatizando características relevantes e suprimindo ruídos. Esta adaptação demonstrou resultados promissores para a segmentação médica. No desenvolvimento da arquitetura *CrackU-Net* para a detecção de trincas em pavimentos, Huyan et. Al (2020) utilizaram o aumento das camadas de convolução e a função Unidade Linear Retificada (*ReLU*), esta abordagem se demonstrou promissora ao facilitar o aprendizado da rede e ao acelerar a convergência do treinamento.

Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma rede neural para a segmentação de trincas em pavimentos baseada arquitetura *U-Net*, com a adição de uma camada de convolução extra, incorporação da função de ativação Unidade Linear Retificada *(ReLU)* e implementação de blocos de compressão e excitação (*Squeeze-and-Excitation - SE)*. O treinamento é realizado utilizando imagens de trincas reais anotadas manualmente com o auxílio de dados sintéticos gerados a partir dessas anotações.

2. METODOLOGIA

2.1. Banco de dados

O levantamento de imagens foi realizado veículos equipados com câmeras de alta qualidade. A seleção das imagens coletadas ocorreu pelo critério de presença de trincas, resultando na seleção de 185 imagens para compor o banco de dados inicial. Com o objetivo de evitar sobreajuste das informações se empregou um programa na etapa de pré-processamento, responsável pela redução da variação de ângulo da câmera e padronização dos dados, conforme Albuquerque et al. (2024) o método utilizado garante amostras diversificadas e padronizadas.

O método proposto por Kanaeva & Ivanova (2021) consiste na combinação entre trincas sintéticas, trincas anotadas e trechos sem trincas para otimização da etapa de anotação do banco de dados. A primeira fase de construção do banco de dados iniciou-se com a separação das anotações das trincas nas imagens coletadas, essas informações passaram por transformações elásticas, de rotação e de escala. A partir desse processo, gera-se uma nova trinca que é aplicada em uma imagem de um trecho sem presença de trincas. Ao final, foi gerado 5 anotações sintéticas para cada 1 imagem anotada, totalizando 925 anotações sintéticas.

O processamento subsequente compreendeu a etapa de aumento de dados através de ajuste do banco obtido, na qual o conjunto foi expandido mediante a aplicação de técnicas de variação geométrica e fotométrica, recorte e colagem de subamostras, adição de ruído gaussiano e deformações elásticas. A Tabela 1 apresenta as probabilidades associadas a cada uma dessas transformações. Cada imagem original resultou na geração de uma nova amostra aumentada. A Figura 1 apresenta as transformações realizadas.

Tabela 1: Variações para aumento de dados

Categoria	Técnica	Probabilidade	Parâmetros principais
Geométrica	Inversão horizontal	50%	-
Geométrica	Inversão vertical	50%	-
Geométrica	Rotação aleatória	50%	–30° a +30°
Geométrica	Transformação afim	50%	afim: –5° a +5°; escala: 0,9 a 1,1; translado: –10 a +10 *pixels*
Fotométricas	Ajuste de brilho	30%	Fator: 0,8 a 1,2
Fotométricas	Ajuste de contraste	30%	Fator: 0,8 a 1,2
Recorte	Recorte e colagem de subamostras	30%	Recorte de 30% da imagem original
Ruído	Ruído gaussiano	30%	Aplicado 10% de ruído
Deformação	Deformação elástica	50%	α = 10 (intensidade); σ = 4 (suavização)

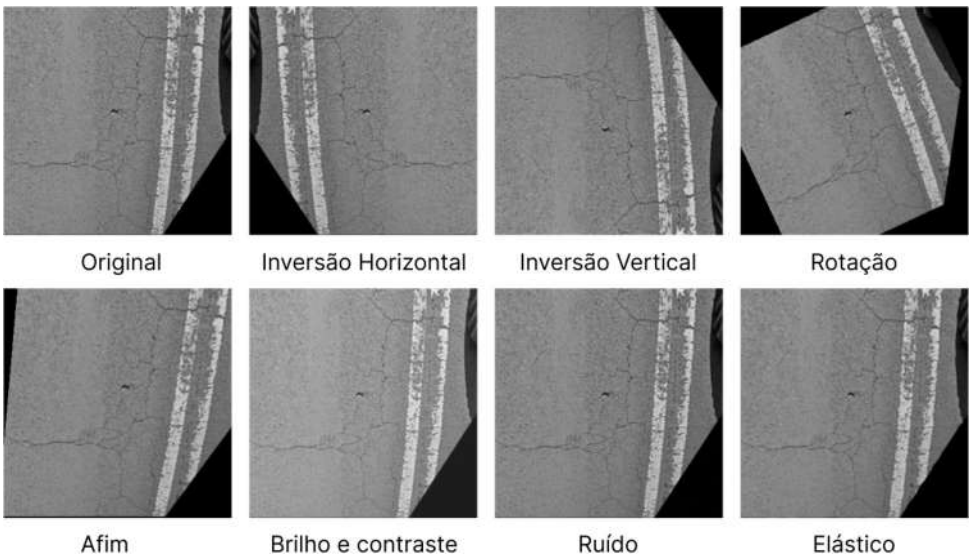


Figura 1: Arquitetura proposta pelos autores

2.2. Método proposto

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo de segmentação com base na arquitetura de contração-expansão da *U-Net*. Primeiro, foi adicionado mais um bloco de convolução seguido de *ReLU* em cada nível do modelo. Após isso, foi aplicado um bloco *SE* após cada estágio de convolução da codificação. A arquitetura proposta está ilustrada na Figura 2.

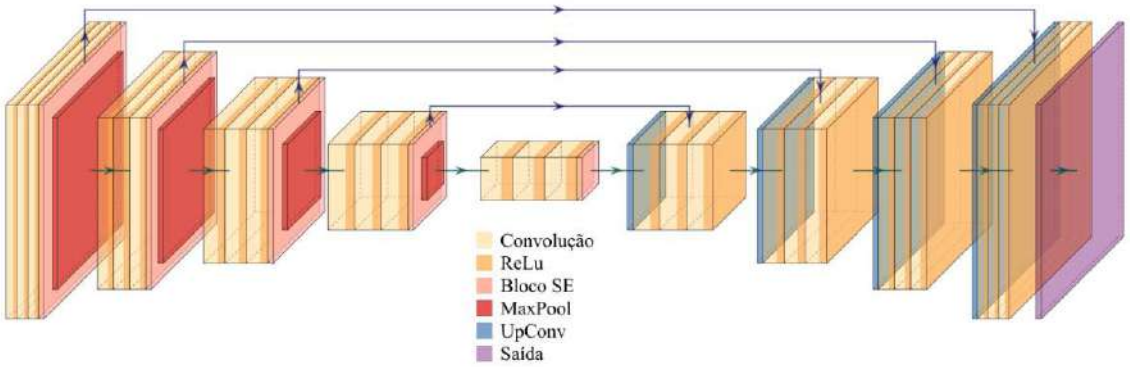


Figura 2: Arquitetura proposta pelos autores

2.3. Estrutura do bloco de compressão e excitação (*Squeeze-and-Excitation*)

Em uma camada de convolução, existem pesos representativos para cada canal de saída. Isso significa que a matriz de pesos é convoluída para cada canal, os tratando de maneira igualitária. O bloco de compressão e excitação, ilustrado na Figura 3, introduz uma abordagem na qual atribui um peso diferente para cada canal, determinando sua importância ao calcular a saída.

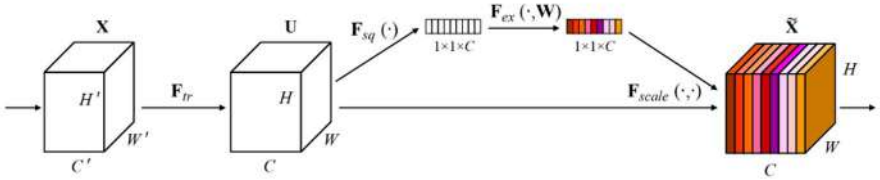


Figura 3: Ilustração do bloco de compressão

O bloco consiste em duas fases, a de compressão que por sua vez é seguida pela de excitação. Segundo Hu et al. (2019), a fase de compressão, de maneira simples, comprime os canais, gerando um único valor numérico. O resultado dessa compressão é um vetor de tamanho "n", onde "n" representa o número de canais no tensor de entrada. Na fase de excitação, o vetor obtido é alimentado em uma rede projetada para capturar dependências entre os canais, resultando em um vetor de mesmo tamanho, mas contendo valores de peso de importância aprendidos para cada canal. Por fim, esse vetor é escalado para o tamanho original do tensor.

Aplicando o bloco de compressão e excitação à estrutura da *U-Net*, se habilita um mecanismo de atenção de canais, indicando os mapas de características mais sensíveis às trincas, visando segmentação mais precisa, principalmente em cenários mais desafiadores.

2.4. Treinamento

No processo de treinamento, a taxa de aprendizagem foi iniciada em 1e-4 em conjunto com a otimização de Adam para atualizar os parâmetros a cada iteração. A rede foi treinada em 100 épocas no total. Todos os testes e treinamentos foram conduzidos utilizando uma placa de vídeo *NVIDA GeForce RTX* 4070.

2.5. Métricas de avaliação

Foi utilizado as métricas de Precisão, *Recall* e *F1-score* para avaliar a performance do método proposto, que são definidas como:

$$\text{Precisão} = \frac{VP}{(VP + FP)} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{VP}{(VP + FN)} \quad (2)$$

$$F1 - score = \frac{2 \times Precisão \times Recall}{(Precisão + Recall)} \quad (3)$$

VP refere-se aos verdadeiros positivos, ou seja, *pixels* corretamente classificados como trincas pelo modelo. FP indica os falos positivos, *pixels* que não pertencem à classe de interesse, mas o modelo demarcou como se pertencesse. FN se refere aos falsos negativos, *pixels* que são trincas, mas o modelo deixou de marcar. Precisão e *Recall* podem ser calculados comparando a anotação humana com a detecção. O *F1-score* é computado como uma métrica geral para performance. Assim, se considera *F1-score* como a métrica que mais reflete a qualidade de um modelo para segmentação.

3. ANÁLISES

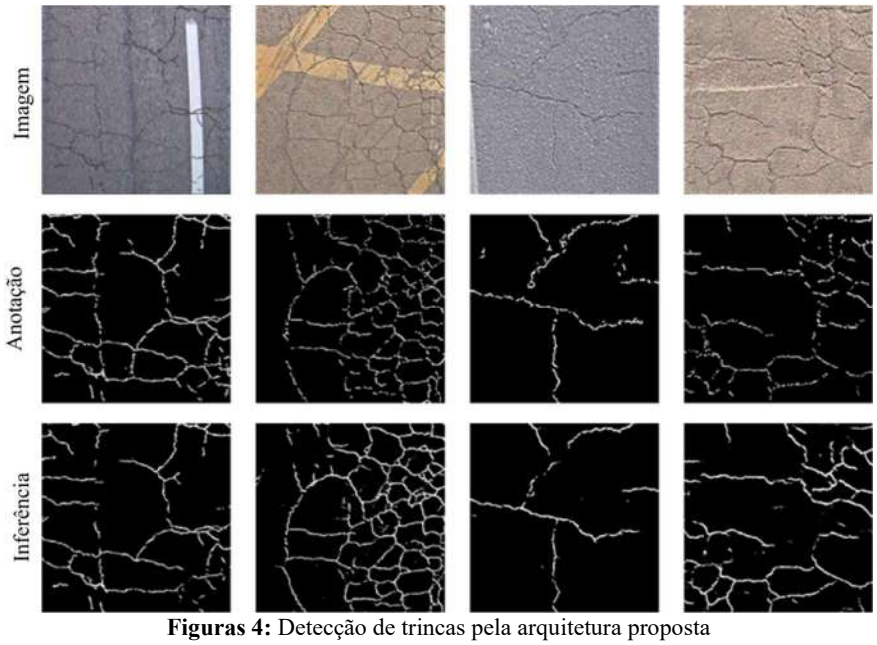
Ao final dos treinamentos foram extraídas as métricas que melhor representaram, segundo a percepção dos autores, o desempenho dos modelos treinados, podendo-se encontrá-los na Tabela 2.

Tabela 2: Métricas dos modelos treinados

	F1-score	**Precisão**	***Recall***
U-Net	78,83%	79,07%	78,60%
Modelo proposto	81,62%	82,65%	80,61%

Avaliando em detalhes as métricas, percebe-se que na precisão do modelo proposto houve um acréscimo de 3,58%, ou seja, entre todos os *pixels* que o modelo classificou como trincas, cresceu a fração daqueles que, de fato, correspondem a trincas, reduzindo os falsos positivos. No *recall* também houve um aumento de 2,01%, por tanto, do total de pixels que realmente são trincas, uma proporção maior passou a ser corretamente identificada pelo novo modelo, reduzindo os falsos negativos. Além disso, avaliando a performance geral do modelo pela métrica *F1-score*, tem-se um acréscimo de 2,79% em relação à *U-Net* original. Essa métrica fornece um indicador mais amplo do modelo em identificar corretamente os pixels da trinca, ao mesmo tempo que evita classificações de valores falso negativo.

Por fim, observa-se que embora as inferências obtidas do modelo da arquitetura proposta foram capazes de detectar trincas de severidade alta com facilidade, ele ainda enfrenta dificuldades para identificar as trincas mais finas orientadas transversalmente, como pode ser observado na Figura 4.



Figuras 4: Detecção de trincas pela arquitetura proposta

4. CONCLUSÃO

Conforme os resultados, foi possível aprimorar a capacidade de segmentação de trincas em pavimentos ao incorporar uma camada extra de convolução, a função de ativação *ReLU* e blocos *Squeeze-and-Excitation* à arquitetura da *U-Net* original. O ganho em todas as métricas de avaliação representa que o modelo proposto é mais eficiente em diferenciar o fundo da imagem com as trincas, identificando uma maior quantidade de trincas verdadeiras e reduzindo a ocorrência de valores falso negativos. Adicionalmente, o uso de dados sintéticos combinados aos dados reais mostrou-se eficiente na ampliação do banco de imagens, reduzindo o esforço manual para a geração de imagens anotadas. Quanto à dificuldade para a segmentação de trincas mais finas orientadas transversalmente, sugere-se o aumento do banco de dados anotados com este tipo de ocorrência, para aumentar a robustez da detecção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, L. F.; T. R. Kleinert; H. F. Grimm e L. A. T. Brito (2024) Detecção automática de panelas e remendos em pavimentos com uso de uma rede neural convolucional. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 38., 2024, São Carlos. Anais... São Carlos: Galoá. Disponível em: https://proceedings.science/p/190880?lang=pt-br (acesso em 04/07/2025).

Hu, J.; L. Shen; S. Albanie; G. Sun e E. Wu (2020) Squeeze-and-Excitation Networks. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 42, n. 8, p. 2011–2023. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.01507.

Huyan, J.; W. Li; S. Tighe; Z. Xu e J. Zhai (2020) CrackU-net: a novel deep convolutional neural network for pixelwise pavement crack detection. Structural Control and Health Monitoring, v. 27, e2551. DOI: https://doi.org/10.1002/stc.2551.

Jenkins, M. D.; T. A. Carr; M. I. Iglesias; T. Buggy e G. Morison (2018) A deep convolutional neural network for semantic pixel-wise segmentation of road and pavement surface cracks. European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 26., 2018, Roma. Proceedings... [S.l.]: EURASIP, p. 2120–2124. ISBN: 978-90-827970-1-5. DOI: 10.23919/EUSIPCO.2018.8553280.

Kanaeva, I. A. e Ju. A. Ivanova (2021) Road pavement crack detection using deep learning with synthetic data. In: 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1019, p. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012036.

Kheradmandi, N. e V. Mehranfar (2022) A critical review and comparative study on image segmentation-based techniques for pavement crack detection. Construction and Building Materials, v. 321, p. 126162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126162.

Martins, G. B.; F. A. F. Kleine; E. Bernardi; R. Vieira; A. R. Machado; R. C. Rodrigues e E. M. Soares (2021) Método de segmentação de imagens digitais para identificação de trincas em pavimentos viários: um estudo comparativo. 23º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária e 46ª Reunião Anual de Pavimentação, 2021, Brasília. Anais... Brasília: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A., p. 488–499. Disponível em: https://enacorrapv.com.br/eventosanteriores/23o-enacor-encontro-nacional-de-conservacao-rodoviaria-e-a-46a-rapv-reuniao-anual-de-pavimentacao/ (acesso em 04/07/2025).

Ronneberger, O.; P. Fischer e T. Brox (2015) U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Cham: Springer, p. 234–241. (Lecture Notes in Computer Science, v. 9351). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.

Rundoberger, L.; C. Han; Y. Nagano; J. Zhang; R. Hataya; C. Militello; A. Tangherloni; M. S. Nobile; C. Ferretti; D. Besozzi; M. C. Gilardi; S. Vitabile; G. Mauri; H. Nakayama e P. Cazzaniga (2019) USE-Net: incorporating Squeeze-and-Excitation blocks into U-Net for prostate zonal segmentation of multi-institutional MRI datasets. Neurocomputing, v. 365, p. 31–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.07.006.

Lucas di Franco Albuquerque (lucas.albuquerque@pavesys.com.br)
Vítor Schmidt Teixeira (vitor.teixeira@pavesys.com.br)
Vinicius Coldebella Camillo (vinicius.camillo@pavesys.com.br)
Fernanda Vargas Ramires (fernanda.ramires@pavesys.com.br)
Julia Pereira Sampaio (julia.sampaio@pavesys.com.br)
Gabriel Venturella de Oliveira (gabriel.venturella@pavesys.com.br)
Felipe Trois Garcia (felipe.trois@pavesys.com.br)
Pavesys Engenharia, Avenida Loureiro da Silva 2001/513, Cidade Baixa, Porto Alegre, RS, Brasil

SISTEMA DE EXTRAÇÃO DE MALHA VIÁRIA A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE USANDO GAN

Rodrigo Castro Pereira, Marcelo Franco Porto, Lucas Vinícius Ribeiro Alves, Erick Pedrosa Barreto
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO
O artigo propõe um sistema automatizado de mapeamento viário a partir de imagens de satélite utilizando uma Rede Adversária Generativa (GAN), com arquitetura *U-Net-256* no gerador, *PatchGAN* no discriminador e otimizador *Adam*. O método realiza o pareamento entre imagens de satélite e mapas viários cadastrados, assegurando mesma extensão geográfica e resolução espacial. Um conjunto inicial de 27.351 pares de imagens foi coletado em regiões brasileiras, priorizando áreas atendidas ou de interesse do programa Transcolar Rural. Após filtragem manual, foram selecionados 12.016 pares válidos para o treinamento da GAN. As imagens foram organizadas em tiles de 256×256 pixels, e a rede foi treinada por 400 épocas. Os resultados mostram que o modelo consegue identificar vias com boa acurácia visual, mesmo em diferentes tipos de revestimento e regiões com baixa obstrução. A avaliação com métricas *PSNR* (14,78 dB) e *SSIM* indicou desempenho satisfatório, demonstrando potencial para apoiar o planejamento viário automatizado.

1. INTRODUÇÃO

O planeta passa por uma fase de expansão acelerada da construção de vias e estradas, especialmente quando comparados os dados atuais com os de 2010. Aproximadamente 90% dessas construções ocorrem em países em desenvolvimento, principalmente em regiões tropicais e subtropicais, como é o caso do Brasil. Esse crescimento no acesso a áreas remotas tem gerado impactos ambientais significativos, como o desmatamento, agravado pela ausência de fiscalização, dificuldade de acesso e escassez de recursos. Consequentemente, muitas dessas vias, legais ou ilegais, permanecem não mapeadas (Sloan et al., 2024).

Diante disso, o mapeamento viário torna-se fundamental para mitigar tais problemas. Segundo Botelho et al. (2022) e Sloan et al. (2024), esse processo ainda é demorado, meticuloso e majoritariamente baseado em interpretação visual e anotação manual a partir de imagens de satélite.

Como alternativa, Zhang et al. (2019) destaca o uso de imagens de sensoriamento remoto, que têm se mostrado ferramentas eficazes para superar os desafios de produtividade e subjetividade dos métodos tradicionais. Entre essas abordagens, os métodos baseados em inteligência artificial se destacam por sua capacidade de lidar com limitações como qualidade de imagem, obstruções parciais por árvores ou nuvens e variação na pavimentação, ao aprenderem diretamente com os dados e aplicarem regras complexas para a identificação das vias.

Diversas técnicas de IA vêm sendo testadas, mas muitas se concentram apenas na identificação das vias, sem garantir continuidade topológica, problema comum em áreas com obstáculos que bloqueiam a visibilidade. Nesse contexto, as Redes Adversárias Generativas (GANs) mostram-se promissoras, pois além de identificar padrões visuais, também são eficazes na geração de representações topologicamente coerentes (Zhang et al., 2019).

Estudos recentes, como os de Sloan et al. (2024), utilizam arquiteturas como U-Net, ResNet e outras redes convolucionais para identificar vias em imagens de satélite. Hu et al. (2021) propôs uma WSGAN (GAN com supervisão fraca) para extração de redes viárias, e Botelho et al. (2022) também recorreu a redes neurais convolucionais com esse objetivo. A principal convergência entre esses trabalhos é o uso de modelos de IA para extrair objetos, no caso, vias, diretamente de imagens.

Neste contexto, o presente trabalho propõe um sistema baseado em GANs para extração de malha viária a partir de imagens de satélite, utilizando um dataset composto por vias brasileiras, pavimentadas ou não, e parâmetros ajustados à realidade nacional. O sistema será integrado ao programa Transcolar Rural, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que visa otimizar o transporte escolar por meio do georreferenciamento automático de escolas, alunos e rotas, contribuindo para o planejamento e gestão de custos do serviço.

2. METODOLOGIA

O modelo de Rede Adversária Generativa empregado neste trabalho opera por meio da comparação entre

duas imagens: uma gerada artificialmente e uma de referência. A arquitetura é composta por dois componentes principais, sendo o gerador, responsável por criar uma nova imagem a partir de uma imagem de entrada, e o discriminador, que avalia essa imagem gerada comparando-a com a imagem real, previamente cadastrada. No contexto deste estudo, as imagens de entrada são provenientes de satélites, enquanto as imagens de referência correspondem à representação precisa da malha viária da mesma região.

O treinamento da GAN ocorre em ciclos iterativos, nos quais gerador e discriminador se aprimoram mutuamente. O gerador aprende a produzir imagens cada vez mais realistas, enquanto o discriminador melhora sua capacidade de distinguir entre imagens reais e sintéticas. O processo é guiado por uma função de otimização, que ajusta os pesos da rede de forma adaptativa, com o objetivo de maximizar o desempenho na detecção de padrões relevantes, como a estrutura das vias.

A primeira etapa metodológica consiste na coleta e preparação das imagens a serem utilizadas. Para garantir uma comparação técnica adequada, é fundamental que as imagens de satélite e os mapas viários compartilhem a mesma extensão geográfica e resolução espacial. As imagens de satélite são obtidas a partir de serviços que cobrem as regiões de interesse do programa Transcolar, abrangendo vias com diferentes tipos de revestimento. Já os mapas de referência são compostos pelas malhas viárias previamente cadastradas dessas mesmas áreas.

A segunda etapa envolve a definição dos hiperparâmetros da rede GAN. Neste estudo, adotou-se o modelo U-Net-256 para o gerador, PatchGAN como estrutura do discriminador e o otimizador Adam para o ajuste dos pesos. Os principais hiperparâmetros utilizados são apresentados na Tabela 1, com descrição de suas funções e impacto no treinamento do modelo.

Tabela 1: Descrição das variáveis dos hiperparâmetros

Variável	Descrição
bs	Representa o tamanho do lote (batch size), ou seja, a quantidade de amostras processadas simultaneamente antes da atualização dos pesos da rede.
lr	Refere-se à taxa de aprendizado (learning rate), que determina o quão rapidamente os pesos do modelo são ajustados durante o treinamento.
beta1	É o primeiro parâmetro de controle do otimizador Adam, responsável pelo decaimento exponencial da média dos gradientes passados.
beta2	É o segundo parâmetro do otimizador Adam, que regula o decaimento exponencial da média dos quadrados dos gradientes anteriores.
NUM_EPOCHS	Refere-se ao número de épocas, ou seja, a quantidade de vezes que o conjunto completo de dados é percorrido durante o treinamento do modelo.
ngpu	Indica o número de unidades de processamento gráfico (GPUs) utilizadas para o treinamento, o que influencia a capacidade de processamento paralelo.
L1_lambda	Define o peso atribuído à função de perda L1 (L1 loss) na composição da perda total do gerador, contribuindo para a fidelidade visual da imagem gerada.

Além dos hiperparâmetros gerais, também são definidos parâmetros específicos para o gerador e o discriminador, que configuram as camadas convolucionais de cada rede. Esses parâmetros, detalhados na Tabela 2, são essenciais para garantir maior eficiência e precisão na identificação da malha viária.

Tabela 2: Descrição das variáveis dos parâmetros das redes

Variável	Descrição
in_channels	Indica a quantidade de canais presentes na entrada da camada convolucional, representando quantas dimensões de informação compõem o dado de entrada.
out_channels	Define o número de filtros convolucionais que serão aplicados à entrada, determinando quantos conjuntos de características diferentes serão extraídos e processados pela camada.
kernel_size	Determina o tamanho da matriz utilizada como janela de convolução (kernel), que define o campo de visão da camada sobre os dados de entrada.
stride	Representa o passo de deslocamento do kernel sobre a matriz, onde valores maiores reduzem a resolução espacial da saída.
padding	Adiciona uma borda de valores, geralmente sendo 0 nas extremidades da matriz, sendo em casos visuais definir a quantidade de pixels adicionados nas bordas do kernel de entrada para evitar perda de informações nas bordas.

Por fim, os parâmetros adicionais do otimizador Adam para avaliação de resultados usados nesse trabalho

foram o *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) para avaliar a similaridade entre a imagem gerada e a original e o *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) para medir a quantidade de ruído presente na imagem gerada pela GAN.

3. RESULTADOS

Para a seleção das imagens, foram priorizadas as regiões rurais localizadas em estados onde o programa Transcolar já atua seguido de áreas majoritariamente rurais com potencial para a atuação do programa, complementadas por imagens de satélite de vias localizadas em países estrangeiros. A escolha dos locais foi realizada de forma manual, por meio da análise visual da base de imagens aéreas disponibilizada pelo Google, utilizando as plataformas Google Maps e Google Earth. Para cada local selecionado, foram anotadas as coordenadas geográficas de um ponto central de interesse. Com essas coordenadas, os pontos foram inseridos na plataforma Stamen Maps, permitindo a verificação visual da malha viária local. O objetivo desta etapa foi avaliar se a maioria das vias encontrava-se mapeada, tendo em vista que uma parcela significativa da rede viária brasileira não está devidamente cadastrada.

Uma vez definidos os locais de interesse, os parâmetros de entrada, nesse caso, latitude, longitude e nível de zoom, foram utilizados em um script que calculava o número do tile correspondente, conforme a projeção Web Mercator. O valor de zoom adotado foi 16, buscando um equilíbrio entre a resolução da imagem, suficiente para que a rede GAN pudesse identificar padrões visuais relevantes e a eficiência computacional do modelo. A escolha visou evitar tiles excessivamente pequenos, o que comprometeria a escalabilidade do mapeamento de grandes áreas.

A partir da identificação do tile central, um script automatizado foi executado para coletar 15 tiles em cada direção, totalizando 900 tiles (30 × 30), todos no nível de zoom 16 e com dimensões de 256 × 256 pixels. As imagens coletadas foram salvas lado a lado, combinando imagens de satélite obtidas da base do Google com as respectivas representações da malha viária extraídas do Stamen Maps. O resultado dessa junção foi a geração de imagens compostas com resolução de 512 × 256 pixels. Um exemplo desse emparelhamento pode ser observado na Figura 1.



Figura 1: Imagem de satélite e malha viária cadastrada lado a lado

Durante a análise dos dados coletados, verificou-se que algumas vias não estavam representadas na base de dados viária do Stamen Maps. Essa ausência foi observada tanto em casos de mapeamento parcial, visto na, quanto de ausência total de cadastro. Com isso, optou-se por excluir do conjunto de dados às imagens em que a ausência de mapeamento fosse claramente perceptível, mesmo a olho nú, e que contrariasse a expectativa de representação das vias. Dessa forma, apenas pares de imagens em que todas as vias estavam corretamente cadastradas foram mantidos no *dataset* final.

Como resultado dessa coleta e filtragem, foram obtidos inicialmente 13.534 pares de imagens de satélite e malha viária de regiões brasileiras, seguidos por 11.588 pares sob os mesmos critérios, além de 2.229 pares adicionais referentes a regiões dos Estados Unidos da América. O total inicial de imagens foi de 27.351.

Após análise manual de qualidade e remoção das imagens consideradas inadequadas, o primeiro lote

brasileiro foi reduzido para 6.114 imagens e o segundo lote, também do Brasil, para 3.673 imagens. As imagens oriundas dos Estados Unidos foram mantidas integralmente, pois apresentaram uma relação satisfatória entre as vias representadas nas imagens de satélite e aquelas cadastradas na malha viária. Assim, o conjunto final de dados utilizado no treinamento da rede neural foi composto por 12.016 imagens.

Com o dataset selecionado, foram definidos os hiperparâmetros do modelo, bem como os parâmetros específicos do gerador e do discriminador, cujos valores estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Valores adotados para os hiperparâmetros

Variável	Valor Adotado
bs	1
lr	0,0001
beta1	0,5
beta2	0,999
NUM_EPOCHS	400
ngpu	1
L1_lambda	100

Tabela 4: Valores adotados para os parâmetros do gerador e discriminador

Variável	Valor Adotado
in_channels	3 – RGB (gerador) / 3*2 – RGB (discriminador)
out_channels	1 – Preto e branco
kernel_size	4
stride	2 ou 1
padding	1

Os resultados do treinamento com esse conjunto de imagens e parâmetros foram satisfatórios; conforme ilustrado na Figura 2, a imagem à direita representa a imagem de satélite, a central mostra a malha viária cadastrada extraída da base do Stamen Maps, e a imagem à esquerda exibe a malha gerada pela inteligência artificial.

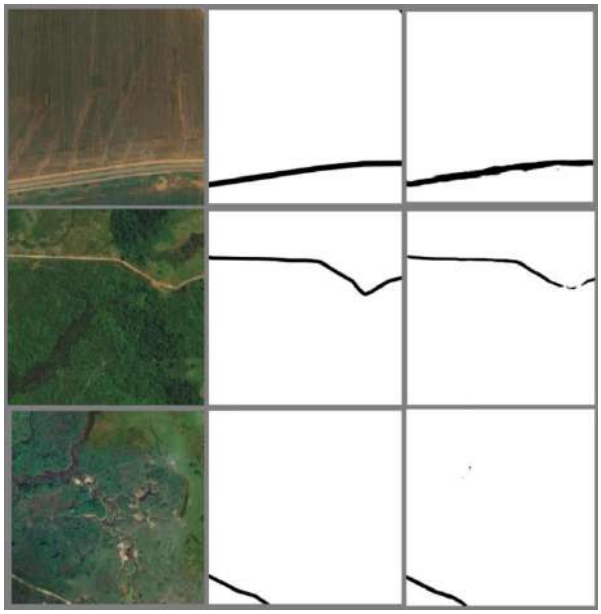


Figura 2: Resultados da GAN com o dataset e os parâmetros indicados

Observam-se ruídos e descontinuidades entre os resultados esperados e obtidos, indicando possibilidade de aprimoramento por meio de operações topológicas. Quanto aos ruídos, a métrica Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) alcançou 14,78 dB, valor considerado aceitável segundo o estado da arte em pesquisas de redes neurais artificiais.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, foi desenvolvido um sistema para identificação de malha viária, cuja tarefa consiste em detectar ruas a partir de imagens de satélite, por meio da transformação dessas imagens em versões em preto e branco, destacando a projeção das vias.

O sistema apresentou resultados satisfatórios na identificação, especialmente em áreas com poucas obstruções na vista aérea e em diferentes tipos de revestimento das vias. Considera-se que tais resultados são promissores para a aplicação dessa técnica na automação do processo de geração de malhas viárias no Projeto Transcolar Rural.

Embora o modelo atual seja eficaz para auxiliar na identificação da malha viária, recomenda-se que trabalhos futuros se concentrem no aprimoramento do método proposto, tanto em operações de pré-processamento quanto de pós-processamento, visando melhorar a identificação e maximizar os resultados obtidos. Recomendam-se também pesquisas utilizando outros modelos baseados em outras arquiteturas, uma vez que essa tecnologia está em rápida expansão. Além disso, sugere-se a automação do cadastro das vias por meio de mapeamento vetorial, levando em conta aspectos topológicos.

Todo o sistema foi desenvolvido em Python, utilizando Jupyter Notebook. Os códigos completos podem ser acessados no repositório do GitHub: (https://github.com/transcolar/GeoGAN)

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Projeto Transcolar Rural da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFMG); a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq); à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Botelho Jr, J.; Costa, S.C.P.; Ribeiro, J.G.; Souza Jr., C.M. (2022) Mapping Roads in the Brazilian Amazon with Artificial Intelligence and Sentinel-2. Remote Sens. v. 14, p 3625. DOI: 10.3390/rs14153625

Barreto, E.P.; Silveira, M.A., Alves, L.V.R.; Porto, M.F. (2023) Sistema de Extração de Malha Viária Rural de Imagens de Satélite usando Redes GAN. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (Manaus, AM). DOI: 10.20906/SBAI-SBSE-2023/4018

Sloan, S.; Talkhani, R.R.; Huang, T.; Engert, J.; Laurance,W.F. (2024) Mapping Remote Roads Using Artificial Intelligence and Satellite Imagery. Remote Sens. v. 16, p. 839. DOI: 10.3390/rs16050839Hu

Hu, A.; Chen, S.;Wu, L.; Xie, Z.; Qiu, Q.; Xu, Y. (2021) WSGAN: An Improved Generative Adversarial Network for Remote Sensing Image Road Network Extraction by Weakly Supervised Processing. Remote Sens. v. 13, p. 2506. DOI: 10.3390/rs13132506

Rodrigo Castro Pereira (rodrigocaspereira@gmail.com)
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Avenida Antônio Carlos, 6627, 31270-901 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Inteligência artificial aplicada à Infraestrutura de Transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

IMPLEMENTAÇÃO DO ÍNDICE DE CONDIÇÃO DA MANUTENÇÃO NO DER-MG: VISÃO COMPUTACIONAL E GESTÃO ESTRATÉGICA DA MALHA RODOVIÁRIA

Ana Karina Ladeira Gomes, Esther Ribeiro Júlio, Letícia Costa Gonçalves Munhoz, Rodrigo Franklin Marques Silva, Rodrigo Santos Colares
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

RESUMO
O Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) está implantando o Índice de Condição da Manutenção (ICM) para inspecionar, de forma padronizada, seus 20.000 km de rodovias pavimentadas. Veículos equipados com câmeras Full HD coletam vídeos que, processados por algoritmos de visão computacional, identificam e georreferenciam irregularidades no pavimento, drenagem, sinalização e vegetação. Engenheiros das quarenta URGs validam os resultados, criando um banco de dados integrado atualizado mensalmente. O serviço foi licitado em cinco lotes regionais, garantindo cobertura simultânea e equilíbrio contratual. Ao substituir avaliações subjetivas, o ICM reduz incertezas, estabelece critérios objetivos de intervenção e apoia o planejamento plurianual de manutenção. A disponibilização de informações confiáveis permite priorizar trechos críticos, otimizar recursos e ampliar a segurança viária, contribuindo para a sustentabilidade econômica da malha rodoviária estadual.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta a estratégia de implantação do ICM no DER-MG, descrevendo o contexto institucional, a adaptação do modelo originalmente adotado pelo DNIT e os benefícios esperados para a gestão da malha estadual. Busca-se demonstrar como a integração de visão computacional, inteligência artificial e geoprocessamento possibilita avaliações mensais padronizadas, fornecendo indicadores objetivos para monitorar contratos de conservação e subsidiar decisões de alocação de recursos baseadas em evidências.

2. MÉTODO UTILIZADO

O fortalecimento da malha rodoviária estadual ocorreu ao longo das últimas três décadas, período em que o DER-MG deixou de executar diretamente serviços de conservação e passou a contratá-los junto a empresas especializadas. A diversidade geográfica de Minas Gerais — planícies úmidas no Triângulo Mineiro, áreas montanhosas no Sul e no Leste, e corredores semiáridos no Norte — impõe desafios distintos de manutenção. Até recentemente, o monitoramento concentrava-se no pavimento, por meio do Sistema de Gerenciamento de Pavimentos (SGP), com avaliações esparsas e metodologia predominantemente visual, o que deixava de fora itens cruciais como drenagem, sinalização, roçada e limpeza. A implantação do ICM preenche essa lacuna ao instituir inspeções mensais completas de conservação.

Os levantamentos percorrem toda a malha pavimentada, em ambos os sentidos, utilizando veículos equipados com câmeras Full HD (1920 × 1080 px, 60 fps) e lentes lineares. A velocidade operacional não ultrapassa 80 km/h, garantindo visibilidade plena do pavimento e estabilidade da filmagem. A coleta é realizada exclusivamente em condições climáticas satisfatórias, com pavimento seco e boa iluminação. Quando o sinal de GPS fica fraco — por exemplo, em túneis, vales profundos ou trechos com muita vegetação — o DER-MG autoriza o uso de métodos extras de localização, como ajustes de posição a partir de pontos de referência fixos ou a quilometragem registrada com precisão pelo veículo.

Os vídeos são armazenados em nuvem e processados no software ICM, desenvolvido pelo LabTrans/UFSC e customizado para o DER-MG. A inteligência artificial reconhece elementos viários — panelas, remendos, trincas, vegetação marginal, dispositivos de drenagem, sinalização vertical e horizontal — gerando arquivos digitais que registram posição, classe, extensão e severidade de cada defeito. O algoritmo foi treinado com banco de imagens previamente rotulado segundo os critérios da Resolução DNIT n.º 5/2022, assegurando padronização.

Após o processamento automático, engenheiros das 40 unidades regionais (URGs) revisam as detecções para suprimir falsos positivos ou categorizações equivocadas. Quando um item não pode ser avaliado pelas imagens, executa-se inspeção in loco com registro fotográfico e formulário técnico padronizado. Essa checagem serve também para calibrar a inteligência artificial em ciclos posteriores, realimentando o modelo.

O ICM resulta da combinação de dois subíndices: pavimentação (IP) e conservação (IC). Mantendo o

balanceamento da Resolução DNIT n.º 5/2022, o DER-MG adota ponderação de 70 % para IP e 30 % para IC (Equação 1). O subíndice IP agrega panelas (P), remendos (Rm) e trincas (T) enquanto o IC agrega roçada (Rc), drenagem (D) e sinalização (S) conforme as Equações 2 e 3. Cada componente recebe nota de 0,25 a 1,00, consoante a gravidade.

$$\mathrm{ICM} = 0,70 \cdot \mathrm{IP} + 0,30 \cdot \mathrm{IC}$$

$$\mathrm{IP} = 50 \cdot P + 30 \cdot Rm + 20 \cdot T \qquad \mathrm{IC} = 30 \cdot Rc + 20 \cdot D + 50 \cdot S$$

Equação 1. Equação utilizada no ICM DER-MG

Os resultados alimentam painéis ArcGIS, permitindo consultas interativas, séries históricas e alertas automáticos. O georreferenciamento dos defeitos viários possibilita correlação com dados de volume de tráfego, pluviometria, acidentes e intervenções já contratadas, potencializando a análise preditiva.

A licitação foi subdividida em cinco lotes, cada qual atendido por empresa distinta, garantindo simultaneidade de levantamentos, equilíbrio de investimentos regionais e redução do risco de concentração de mercado. Esse arranjo permite auditoria cruzada, já que relatórios de lotes vizinhos podem validar coerência na zona de transição, fortalecendo a governança.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Os levantamentos mensais do Índice de Condição da Manutenção (ICM), iniciados em 2025, percorrem integralmente a malha pavimentada estadual, agora dividida em cinco lotes que abrangem as quarenta unidades regionais do DER-MG. Cada empresa responsável filma seus trechos com câmeras Full HD, operando até 80 km/h segundo a Resolução DNIT n.º 5/2022, e envia as imagens ao software ICM, desenvolvido pelo LabTrans/UFSC, onde algoritmos de visão computacional identificam defeitos de pavimento e itens de conservação, registrando posição, extensão e grau de severidade.

A Figura 1 ilustra a divisão territorial adotada na licitação, evidenciando a distribuição equilibrada da malha entre os cinco lotes. Essa segmentação permite simultaneidade de levantamentos, reduz o risco de concentração de mercado e garante que as quarenta URGs recebam dados homogêneos. Ao mesmo tempo, o mapa destaca corredores estratégicos de alto volume de tráfego — principalmente nas regiões Central e Triângulo Mineiro — que historicamente demandam maior atenção de manutenção devido ao desgaste acelerado do pavimento.

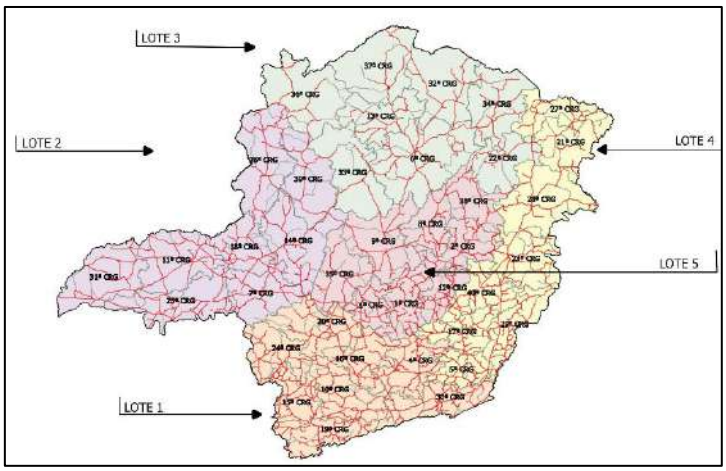


Figura 1: Divisão dos cinco lotes licitados para levantamento do ICM em Minas Gerais.

Além de mostrar o recorte espacial, a Figura 1 reforça a importância da interface entre engenharia de campo e planejamento. Os lotes foram desenhados de modo a respeitar limites administrativos já existentes, o que facilita o fluxo de informações entre a sede e as regionais, ao mesmo tempo em que possibilita auditoria cruzada em zonas de transição. Tal arranjo também favorece a comparação de desempenho entre empresas contratadas, pois cada uma opera em áreas de extensão e complexidade semelhantes.

Após o processamento automático, engenheiros das próprias URGs executam o pós-processamento humano para corrigir falsos positivos — casos em que o algoritmo interpreta, por exemplo, uma sombra alongada como trinca — e adicionar informações que não apareçam claramente no vídeo. Essa etapa consolida a primeira base estadual padronizada de manutenção rodoviária, assegurando a confiabilidade dos dados antes de sua utilização gerencial.

A Figura 2 apresenta exemplos de detecções automáticas: trincas longitudinais, panelas isoladas e perda de retro reflexão em sinalização horizontal são assinaladas por caixas coloridas sobre um trecho da MG-050. O enquadramento demonstra a acurácia do algoritmo em diferenciar defeitos de natureza distinta mesmo com a presença de obstáculos, veículos em movimento e variações de iluminação, condição rotineira nas vias estaduais.

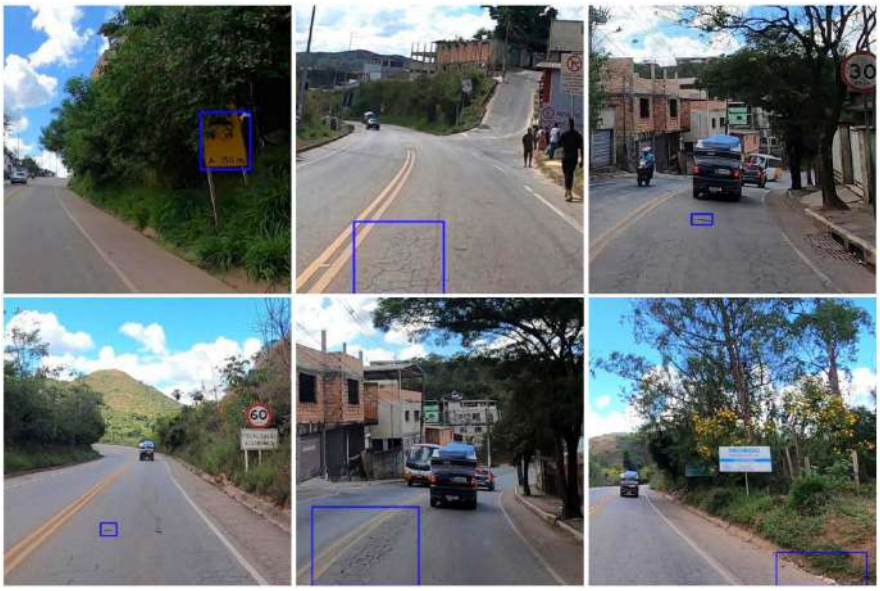


Figura 2: Exemplo de detecções automáticas de ocorrências do ICM

No segundo quadrante da Figura 2 observa-se que a inteligência artificial delimita com precisão o contorno das trincas, permitindo estimar área afetada e severidade; já no sexto quadrante, a identificação de um ponto de drenagem obstruída evidencia que o ICM vai além da análise do pavimento, permitindo também monitorar dispositivos complementares — valetas, sarjetas e bueiros — essenciais à preservação da via.

A parceria DER-MG/LabTrans permitiu adaptar o software DNIT-ICM às especificidades mineiras e resultou no Edital de Licitação n.º 2301931000002/2025, que contratou cinco empresas para executar, em ciclos mensais, o levantamento completo da malha pavimentada de cada lote. O fluxo de trabalho padronizado garante uniformidade técnica na captação e no tratamento dos dados, conferindo comparabilidade entre regiões.

Embora os relatórios consolidados ainda passem por verificação técnica, o registro georreferenciado em vídeo já possibilita ao DER-MG visualizar, em painéis ArcGIS, todos os defeitos detectados, criando um panorama que orienta a priorização de intervenções pelas equipes regionais e pela administração central. Antes de 2025, não havia levantamento objetivo, automatizado e georreferenciado da condição da malha; a nova metodologia supre essa lacuna ao reunir coordenadas precisas e imagens padronizadas.

Calculado pela combinação dos subíndices de pavimentação e de conservação, o ICM torna-se ferramenta de monitoramento dos contratos de manutenção das quarenta URGs, viabilizando avaliações mais frequentes e objetivas da efetividade dos serviços prestados.

Com a série histórica em formação, o DER-MG pode planejar manutenções com base em evidências, priorizando trechos de maior criticidade e evitando a alocação reativa de recursos. A padronização dos

resultados também fortalece a governança contratual, uma vez que todos os agentes operam sob métricas compartilhadas e transparentes.

Por fim, ao consolidar indicadores confiáveis sobre a conservação rodoviária, o ICM fortalece a gestão eficiente dos recursos públicos, aumenta a transparência institucional e apresenta-se como modelo potencial para outras administrações rodoviárias que buscam implantar processos de manutenção baseados em dados sólidos e verificáveis.

4. CONCLUSÕES

A adoção do ICM representa salto qualitativo na gestão da infraestrutura rodoviária de Minas Gerais. A combinação de inteligência artificial, geoprocessamento e validação técnica agrega objetividade, frequência e transparência às avaliações. O indicador consolida-se como elo entre a engenharia de campo e a alta administração, alinhando metas de desempenho à alocação de recursos. Os principais ganhos observados incluem: criação de base de dados georreferenciada com atualização mensal; padronização de critérios e redução da subjetividade em laudos; suporte a penalidades e bonificações contratuais; priorização preventiva de trechos críticos, reduzindo custos de ciclo de vida. Para 2026, o DER-MG estuda balanceamento próprio dos pesos do ICM, calibrado às condições climáticas e geotécnicas estaduais. A experiência sinaliza que outras administrações rodoviárias podem adotar abordagem similar, fomentando cultura de dados e inovação na infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Resolução n.º 5, de 27 abr. 2022. Diário Oficial da União.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução à ciência da geoinformação. INPE, 2001.

IBGE. Minas Gerais: aspectos geográficos. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

VASCONCELLOS, E. A. Transporte urbano, espaço e equidade. São Paulo: Annablume, 2000.

Rodrigo Santos Colares (rodrigo.colares@der.mg.gov.br)
Ana Karina Ladeira Gomes (ana.gomes@der.mg.gov.br)
Esther Ribeiro Júlio (esther.ribeiro@der.mg.gov.br)
Letícia Gonçalves Costa Munhoz (leticia.munhoz@der.mg.gov.br)
Rodrigo Franklin Marques Silva (rodrigo.silva@der.mg.gov.br)
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, Assessoria de Gestão Estratégica, Sede Cidade Administrativa - Edifício Gerais, 5º Andar Rodovia Papa João Paulo II, nº 4.001, Bairro Serra Verde, Belo Horizonte, MG, Brasil.

KM DE PROTEÇÃO: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS PARA ATROPELAMENTO DE FAUNA NAS RODOVIAS ESTADUAIS DE MINAS

Rodrigo Franklin Marques Silva, Rodrigo Santos Colares, Lorena Aparecida Noia Menezes, Alex Bager, Glaucia Elena Germano
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

RESUMO
O Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais aplicou o Índice Km de Proteção (KmP) em 500 km das rodovias MG-010, MG-129 e LMG-760, na Bacia do Rio Doce, segmentadas em 475 trechos de 1 000 m. O modelo preditivo, alimentado por variáveis de cobertura florestal, proximidade de corpos d'água, volume de tráfego, entre outros classificou os segmentos em seis níveis de risco e apontou 119 trechos nos níveis 5 e 6. Entre as 31 espécies avaliadas, destacam-se oito ameaçadas, incluindo lobo-guará, muriqui-do-norte e onça-pintada. Os resultados foram disponibilizados em painel geoespacial interativo que apoia o planejamento de mitigação. Recomenda-se priorizar adaptações de bueiros, cercas direcionadoras e uso piloto de câmeras dotadas de IA. A abordagem é replicável a outros corredores, integrando segurança viária e conservação da fauna.

1. OBJETIVO DO TRABALHO

Reconhecendo a necessidade de integrar segurança viária e proteção da biodiversidade, o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG) vem incorporando análises preditivas e inteligência artificial (IA) aos seus processos de gestão. Nesse contexto, a solução Km de Proteção (KmP) aplica modelos avançados de tecnologia e dados ambientais multiescalares para localizar segmentos rodoviários com maior probabilidade de colisões fauna-veículo. A identificação desses segmentos estratégicos permite um planejamento ambientalmente orientado, que, além de prevenir atropelamentos, atende à segurança dos usuários rodoviários, otimiza custos operacionais e confere maior legitimidade social às ações do DER-MG.

Este estudo tem o objetivo de demonstrar como a aplicação do Km de Proteção, aliada a um painel geoespacial de apoio à decisão, prioriza 119 trechos críticos (níveis 5-6) e orienta intervenções de engenharia, contribuindo para políticas públicas de mitigação de impactos e para a agenda ambiental, social e de governança (ESG) que promovem sustentabilidade e responsabilidade corporativa, inclusive no setor rodoviário mineiro.

2. MÉTODO UTILIZADO

O projeto InovaVia, desenvolvido em parceria com a EnvironBIT e financiado pelo HUB-MG, acrescenta uma camada preditiva específica para atropelamento de fauna. A rede neural proprietária Km de Proteção foi recalibrada com variáveis ambientais da Bacia do Rio Doce - uso do solo, NDVI, densidade de corpos d'água e tráfego médio diário - e aplicada a registros históricos de 2012-2023 mantidos pela EnvironBIT.

Para fechar o ciclo de gestão adaptativa, está em fase de contratação um sistema de câmeras de vídeo com IA embarcada que, nesta etapa piloto, será instalado em alguns quilômetros cuidadosamente selecionados dentro dos trechos classificados nos níveis 5 e 6 do Km de Proteção. Esses dispositivos validarão, em condições reais de campo, a robustez dos algoritmos ao fiscalizar excesso de velocidade, registrar colisões e objetos na pista e, sobretudo, identificar animais por porte em tempo real. Os dados coletados permitirão medir a efetividade das medidas de mitigação já implantadas, recalibrar o modelo Km de Proteção e fundamentar a expansão futura da rede de monitoramento para toda a malha prioritária, assegurando que investimentos posteriores maximizem simultaneamente a segurança viária e a conservação da fauna silvestre.

A malha viária que corta a Bacia do Rio Doce intersecta remanescentes de Mata Atlântica e faixas de transição com o Cerrado, fragmentando habitats e alterando rotas de dispersão da fauna. A literatura sobre ecologia de estradas aponta que rodovias em ambientes florestais reduzem conectividade, elevam mortalidade de espécies e comprometem processos como polinização e dispersão de sementes (Forman et al., 2003; Trombulak et al., 2000). Para mitigar esses efeitos, a ecologia aplicada recomenda passagens de fauna, cercas direcionadoras e modelagens espaciais que localizam pontos prioritários de intervenção (Clevenger et al., 2011; Ascensão et al., 2021).

Por fim, integrar modelagens preditivas a ferramentas colaborativas, como o aplicativo Urubu (mais de 50 000 usuários), possibilita registrar atropelamentos em tempo real, priorizar investimentos e alinhar a gestão

rodoviária às diretrizes ESG. Essa sinergia de dados ecológicos, soluções de engenharia e tecnologias de monitoramento estabelece um ciclo contínuo de adaptação, segurança viária e conservação da biodiversidade na rede estadual.

3. RESULTADOS OBTIDOS

A figura abaixo mostra 62 segmentos de 1000 m da LMG-760 junto ao Parque Estadual do Rio Doce, coloridos pelos níveis 1–6 de risco do Km de Proteção. O contorno do parque aparece como referência para situar a rodovia na paisagem.



Figura 1: Trechos classificados por grau de risco – Bacia do Rio Doce (DER-MG, 2025)

A modelagem preditiva destaca 16 trechos críticos — 6 de nível 6 e 10 de nível 5 — concentrados onde a estrada toca fragmentos florestais densos ou cruza vales úmidos. Esses pontos coincidem com a presença de tamanduá-bandeira, tatu-canastra, bugio-ruivo, macaco-prego-do-sul e jaguatirica, indicando que cobertura arbórea contínua, proximidade de água e velocidades altas amplificam o risco.

O algoritmo gerou um raster probabilístico (passo de 1000 m) que identificou 119 trechos críticos - 47 de nível 6 e 72 de nível 5 - equivalentes a cerca de 25 % da malha analisada.

Os resultados da modelagem preditiva apontam que trechos com dossel arbóreo fechado, cursos d'água a menos de 300 m e velocidades médias superiores a 80 km/h concentram as classes de risco mais altas. Simulações com cenários de intervenção indicam que combinar cercas direcionadoras, passagens inferiores específicas para fauna e redutores de velocidade pode reduzir em até 68 % o risco projetado nos cinco pontos mais críticos; instalar apenas cercas traria uma redução estimada de 41%. Entre as espécies mais sensíveis modeladas destacam-se lobo-guará (Chrysocyon brachyurus), onça-pintada (Panthera onca), muriqui-do-norte (Brachyteles hypoxanthus) e tamanduá-bandeira (Myrmecophaga tridactyla); registros adicionais incluem lontra-neotropical (Lontra longicaudis) e tamanduá-mirim (Tamandua tetradactyla) em segmentos úmidos da MG-010, bem como jaguatirica (Leopardus pardalis) e veado-mateiro (Mazama americana) na MG-129.

Esses padrões fornecem um diagnóstico inicial sólido: mostram onde a fauna se expõe mais à rodovia e servem de referência para as próximas etapas do projeto InovaVia, em que dados de campo e análises de viabilidade definirão, de forma técnica, quais estratégias de mitigação serão implantadas em cada ponto crítico.

Na LMG-760 (63 km), o risco se concentra em um trecho contínuo; perto de Bela Vista de Minas a via corta encostas preservadas onde ocorrem muriqui-do-norte, bugio-ruivo e macaco-prego. Esses primatas demandam passagens aéreas e corredores vegetados, pois se deslocam pouco no solo. A fragmentação do habitat sem medidas compensatórias reforça a prioridade de conectividade nesse segmento.

Os segmentos em nível 6 do índice de risco (vermelho-escuro na Figura 2) concentram-se na MG-129 justamente onde a rodovia tangencia as áreas alagadas e brejos associados à barragem de Fundão. Esses espelhos d'água permanentes funcionam como bebedouros e locais de forrageio para tamanduás-bandeira, capivaras e veados-mateiros; ao serem atraídos para a margem da pista, esses animais atravessam trechos de

visibilidade limitada, o que eleva a probabilidade de atropelamentos a níveis críticos.



Figura 2: Km de proteção, seleção entre Outro Branco-MG

À medida que a rodovia se aproxima do Pico do Itacolomi e da borda norte do parque homônimo, a Figura 2 exibe uma sequência de segmentos em nível 5 (vermelho-vivo) nas encostas mais íngremes. O relevo canaliza onças-pintadas, jaguatiricas e lobos-guará para cotas mais baixas da pista, criando um "efeito gargalo": a fauna precisa cruzar a MG-129 para acessar recursos hídricos e alimentares distribuídos em ambos os lados do maciço. Essa morfologia altitudinal, aliada à proximidade entre habitats de altitude, encostas florestadas e faixa de rodagem, eleva o risco de atropelamento a patamares de atenção máxima, como evidenciado pelos segmentos cor granada no mapa.

O Km de Proteção converte análises ambientais em ação pública eficiente: ao isolar apenas 16 pontos realmente críticos, direciona orçamento, equipes e obras para onde o retorno é máximo, evitando cercamentos ou obras onerosas em trechos seguros. O painel geográfico acompanha a evolução do risco em tempo real, permitindo correções rápidas e métricas claras de desempenho, o que facilita a prestação de contas a órgãos de controle e à sociedade.

Arquitetado por meio de dados públicos, o modelo é facilmente replicável a outros corredores estaduais: basta atualizar as camadas de fauna e de tráfego para gerar novos mapas de prioridade. Assim, o projeto torna a mitigação de atropelamentos uma política pública escalável, mensurável e alinhada às metas de segurança viária e conservação que já constam nos planos estratégicos do governo mineiro.

4. CONCLUSÕES

O Km de Proteção avaliou 475 trechos de 1.000 m ao longo da MG-010, MG-129 e LMG-760 na Bacia do Rio Doce. Após calcular a probabilidade individual de atropelamento, o algoritmo ordenou esses valores e aplicou cortes por percentis: os 10 % superiores formam o nível 6 e o intervalo de 75º a 90º percentil compõe o nível 5. O resultado foi a seleção automática de 47 trechos nível 6 e 72 nível 5, distribuídos proporcionalmente em cada rodovia.

A análise multivariada indicou três variáveis-chave para que um trecho "suba" aos níveis críticos: dossel arbóreo contínuo, distância < 300 m a corpos d'água e velocidade média > 80 km/h. Esses atributos aparecem em vales úmidos e encostas íngremes, criando corredores naturais que cruzam a pista. Entre as 31 espécies usadas na ponderação, oito ameaçadas recebem peso duplo; destacam-se lobo-guará, muriqui-do-norte e onça-pintada. As frequências mais altas de registros modelados concentram-se em tamanduá-bandeira, tatu-canastra e jaguatirica, todas listadas nos trechos de maior risco.

Os resultados alcançados neste estudo evidenciam a capacidade do Km de Proteção de transformar grandes volumes de dados ambientais, de tráfego e de ocorrências de fauna em conhecimento operacional para a gestão rodoviária. A aplicação do modelo em 500 km das rodovias MG-010, MG-129 e LMG-760 permitiu identificar

119 trechos de risco elevado – 47 classificados no nível 6 e 72 no nível 5 – que concentram cerca de um quarto da probabilidade total de atropelamentos ao longo do setor analisado. Ao sobrepor essas predições com atributos do terreno, verificou-se que os pontos críticos se localizam, em sua maioria, onde o dossel arbóreo é contínuo, há corpos d'água a menos de 300 m e a velocidade média supera 80 km/h. Tais insights direcionaram rapidamente o investimento do DER-MG para intervenções de maior retorno ecológico, evitando a dispersão de recursos em segmentos com risco marginal.

As simulações de cenários mostraram que a combinação de cercas direcionadoras, passagens de fauna adequadas ao porte das espécies e medidas locais de moderação de velocidade pode reduzir significativamente o risco projetado nos *hotspots*, enquanto intervenções isoladas oferecem ganhos sensivelmente menores. Paralelamente, a rede neural atingiu precisão superior a 80 % na classificação de risco, demonstrando aderência científica e operacional aos requisitos da gestão pública rodoviária. Esses benefícios não se limitam à conservação: a priorização objetiva de trechos críticos simplifica processos de licenciamento, racionaliza obras de mitigação e reforça a transparência de decisão, aspectos essenciais para o cumprimento de metas ESG já assumidas pelo setor.

A implantação gradativa de câmeras com inteligência artificial nos segmentos de maior risco criará séries de dados independentes que alimentarão ciclos anuais de re-treino do modelo, enquanto técnicas de interpretabilidade (por exemplo, análises SHAP) já estão sendo incorporadas para explicitar a contribuição de cada variável nas predições.

Para consolidar e validar os benefícios já observados, as próximas etapas incluirão (i) um programa BACI (*Before–After–Control–Impact*) em amostra representativa dos trechos nível 5-6, (ii) a avaliação financeira detalhada do ciclo completo de mitigação, incluindo custos de implantação e manutenção frente aos prejuízos evitados, e (iii) a realização de oficinas para harmonizar metodologias de monitoramento e estabelecer um protocolo replicável a outras rodovias estaduais e federais. Ao alinhar ciência de dados, engenharia viária e conservação da biodiversidade, o Km de Proteção demonstra que a mitigação de atropelamentos pode ser tratada como uma política pública baseada em evidências, passível de escalonamento e de mensuração objetiva de resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCENSÃO, F. *et al.* Predicting wildlife road-crossing probability and mortality risk based on habitat suitability and road permeability. *Science of the Total Environment*, v. 798, 149236, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149236.

FORMAN, R. T. T.; ALEXANDER, L. E. Roads and their major ecological effects. Annual Review of Ecology and Systematics, v. 29, p. 207-231, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207.

TROMBULAK, S. C.; FRISSELL, C. A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. Conservation Biology, v. 14, n. 1, p. 18-30, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x.

Rodrigo Franklin Marques Silva (rodrigo.silva@der.mg.gov.br)
Rodrigo Santos Colares (rodrigo.colares@der.mg.gov.br)
Lorena Aparecida Noia Menezes (lorena.menezes@der.mg.gov.br)
Alex Bager (abager@ecoestradas.org)
Glaucia Elena Germano (glaucia.germano@der.mg.gov.br)
Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, Assessoria de Gestão Estratégica, Sede Cidade Administrativa - Edifício Gerais, 5º Andar Rodovia Papa João Paulo II, nº 4.001, bairro Serra Verde, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Inteligência artificial aplicada à Infraestrutura de Transportes

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURAIS PARA ANÁLISE DO IMPACTO DA UMIDADE EM TRECHOS EXPERIMENTAIS DE DIFERENTES REGIÕES DO BRASIL

Fellype Guilherme Ramalho Guerra da Silva[1], **Suelly Helena de Araújo Barroso**[1]
[1]Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO
Eventos climáticos extremos, como variações acentuadas de umidade e alagamentos, podem afetar significativamente o desempenho estrutural/funcional dos pavimentos asfálticos brasileiros. Os métodos atuais de dimensionamento, como o MeDiNa, ainda não consideram de forma abrangente os efeitos diretos dessas variáveis. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo preditivo baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs) capaz de analisar e prever o impacto do clima sobre o comportamento mecânico das subcamadas de pavimentos. Para isso, serão integrados dados de clima e tráfego, além da realização de ensaios laboratoriais sob diferentes condições de umidade para dois trechos experimentais a serem construídos nas regiões norte e nordeste do Brasil. Espera-se, com isso, identificar padrões críticos de desempenho, aprimorar o planejamento de manutenção e dimensionamento de pavimentos, bem como contribuir para o aumento da durabilidade das rodovias diante de um contexto de mudanças climáticas, promovendo maior sustentabilidade e eficiência na infraestrutura viária brasileira.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desempenho do pavimento está associado não apenas a ação do tráfego, mas também às condições climáticas que o afetam devido à influência direta que tem sobre o comportamento mecânico dos materiais que o compõem. A umidade, resultante de fatores como infiltração da água pluvial, variação do nível do lençol freático ou transferência entre as camadas, afeta principalmente as inferiores do pavimento, se manifestando através da alteração do comportamento resiliente, cujo módulo tende a diminuir continuamente quando o teor de umidade excede seu valor ótimo, a depender do material utilizado (Franco, 2007; Souza, 2021).

Durante o processo de definição da espessura adequada de um pavimento, o efeito do clima é frequentemente negligenciado em projetos. Atualmente, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), empregado no Brasil, não incorpora modelos climáticos que considerem a influência direta da temperatura e umidade na análise estrutural (Franco e Motta, 2020). Em vez disso, o MeDiNa aborda os efeitos climáticos considerando apenas o envelhecimento das misturas asfálticas em curto e longo prazo (Souza, 2021). Em contrapartida, o método austríaco, normatizado pelo RVS 03.08.68, enxerga o clima como um fator crítico a ser considerado no projeto e dimensionamento de pavimentos rodoviários. Nesse modelo, a depender das variáveis climáticas, são considerados diferentes valores para as propriedades mecânicas dos materiais a serem utilizados (Eberhardsteiner e Blab, 2019).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), os danos nos pavimentos podem surgir precocemente devido a erros ou inadequações durante projeto ou execução, ou manifestar-se a médio e longo prazo como resultado das solicitações de cargas e das ações climáticas. A diversidade climática presente no Brasil impõe desafios consideráveis ao dimensionamento e ao desempenho dos pavimentos. Mudanças ambientais negativas aceleram a deterioração do pavimento, resultando em custos rodoviários adicionais e, na ausência de medidas corretivas, perdas em consumo de combustível, segurança e tempo para os usuários (Qiao *et al.*, 2020).

A atuação sazonal do clima em diferentes regiões do Brasil implica não só em alterações momentâneas na resposta dos pavimentos, como também modifica as características dos materiais que o compõem, exigindo soluções específicas para garantir sua durabilidade e desempenho. No norte do país, o clima equatorial caracteriza-se por elevadas temperaturas e altos índices pluviométricos bem distribuídos ao longo do ano, exigindo pavimentos com alta resistência à umidade constante e à ação prolongada da água. Já no litoral nordestino, onde predomina o clima tropical úmido, as temperaturas ainda são elevadas e as chuvas mais concentradas em determinadas épocas do ano, sendo necessárias soluções de pavimentação que aliem resistência à umidade e durabilidade frente às variações sazonais (Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2022).

Considerando a extrema importância dos pavimentos como componentes do sistema viário, se torna um desafio administrá-los de maneira efetiva, sem o auxílio de ferramentas adequadas para essa finalidade. Dessa forma, a modelagem científica computacional pode ser utilizada, com o objetivo de auxiliar o

profissional responsável a descrever um determinado fenômeno, entendendo melhor seu funcionamento, e permitindo a análise e previsão do comportamento dos sistemas envolvidos nesse processo (Melnik, 2015).

À medida que a complexidade dos sistemas estudados se eleva, a aplicação de ferramentas capazes de descrever suas características funcionais quando submetidos a diferentes condições, se torna mais desafiadora e essencial, sendo utilizado em diversas áreas técnicas, por indivíduos que projetam e acompanham esses sistemas, detalhando todos os fatores controláveis, como a estrutura de um edifício, um circuito elétrico ou as camadas de um pavimento. Com a aplicação de modelos computacionais, a tomada de decisão acerca das características relativas ao seu funcionamento, durante a fase de projeto e operação, é facilitada (Tucci, 2005).

Os modelos computacionais são amplamente utilizados com o objetivo de simular o funcionamento de um determinado sistema físico e são constituídos de um algoritmo de cálculo, capaz de resolver o sistema de equações que explica as variáveis envolvidas no fenômeno a ser estudado, e de uma interface adequada para inserção de dados. Esses modelos são uma excelente ferramenta de apoio para responder perguntas do tipo “e se…”, tornando mais assertiva a tomada de decisões por parte dos administradores (Heller e Pádua, 2016).

Nesse contexto, o uso de redes neurais artificiais (RNAs) surge como uma ferramenta promissora para superar as limitações mencionadas, devido à sua capacidade de analisar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos (Abdolrasol *et al.*, 2021). As RNAs são técnicas de aprendizado de máquina, capazes de classificar ou modelar sistemas complexos (Mendonça *et al.*, 2021). Sua aplicação no estudo do desempenho de pavimentos, à luz de mudanças climáticas, pode não apenas melhorar a previsão de seu comportamento, mas também possibilitar o planejamento de estratégias de dimensionamento mais eficazes.

2. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo com uso de inteligência artificial para análise e predição do impacto das variações de umidade no comportamento mecânico de subcamadas de pavimentos localizados nas regiões norte e nordeste do Brasil. Para tanto, foram definidos quatro objetivos específicos: (i) identificar como a pluviometria local influencia na variação da umidade das subcamadas granulares do pavimento; (ii) identificar como as variações de umidade afetam os parâmetros de rigidez dessas camadas; (iii) propor uma arquitetura de RNA que modele com precisão as interações entre pluviometria, umidade e desempenho, capaz de prever o comportamento das subcamadas sob diferentes cenários e (iv) comparar a estrutura das camadas de pavimentos dimensionados com e sem a consideração da variação de umidade.

3. MÉTODO DE PESQUISA

A pesquisa delineada envolve o levantamento de dados climáticos, com ênfase na pluviometria, fator que influencia na umidade dos solos, bem como na realização de coleta e ensaios laboratoriais em materiais das subcamadas de pavimentos de dois trechos experimentais localizados nas regiões norte e nordeste do Brasil. A análise desses materiais será feita através dos ensaios apresentados na Tabela 1, realizados sob diferentes teores de umidade. A variação desses teores será estimada com base na infiltração de parte da água precipitada, considerando as características locais do solo e de drenagem dos trechos experimentais.

Tabela 1: Ensaios a serem realizados para os materiais das subcamadas dos pavimentos

ENSAIOS		NORMAS
Caracterização	Teor de umidade natural	DNER-ME 213/94
	Coeficiente de permeabilidade	NBR 13292 e NBR 14545
	Densidade real dos grãos sólidos	DNER-ME 093/94
	Granulometria por peneiramento e sedimentação	DNER-ME 051/94
	Limites de consistência	DNER-ME 122/94 DNER-ME 082/94
Compactação	Compactação Proctor	DNER-ME 162/94
Pavimentação	Índice Suporte Califórnia (CBR) e expansão	DNIT 172/2016
	Módulo de Resiliência (MR)	DNIT 134/2018
	Deformação Permanente (DP)	DNIT 179/2018

Os dados obtidos servirão como base para o desenvolvimento de um modelo preditivo utilizando Redes

Neurais Artificiais (RNA), treinado com algoritmos de aprendizado supervisionado, para modelar as interações entre pluviometria, umidade e comportamento resiliente das subcamadas, tendo sua qualidade avaliada por meio de métricas estatísticas, como erro quadrático médio, erro percentual absoluto médio e coeficiente de determinação. Posteriormente, serão dimensionadas estruturas de pavimento com os mesmos parâmetros de projeto, variando as propriedades mecânicas dos materiais para duas situações: uma desconsiderando a influência da umidade e outra incorporando essa variável, a fim de comparar as espessuras resultantes e avaliar a aplicabilidade da abordagem proposta.

4. RESULTADOS PRELIMINARES/ESPERADOS

Os materiais das subcamadas do trecho experimental da região nordeste já foram coletados e estão sendo avaliados, sendo que os materiais da região norte estão na fase de planejamento para coleta. Ao término da pesquisa, espera-se identificar de forma clara a influência da umidade, no desempenho funcional e estrutural dos pavimentos em diferentes regiões do Brasil, proporcionando uma melhor compreensão sobre como as subcamadas de pavimentos adaptam-se às condições climáticas locais e revelando padrões críticos que afetam sua durabilidade. O modelo preditivo resultante buscará não apenas identificar tendências, mas também subsidiar os processos de dimensionamento e manutenção, promovendo estruturas com capacidade de resistir de maneira mais efetiva às variações sazonais do clima, necessidade crescente perante um contexto de mudanças climáticas globais. Com isso, espera-se contribuir para o aumento da durabilidade das rodovias, redução de custos a longo prazo e maior sustentabilidade do sistema viário, melhorando a eficiência do transporte e minimizando os impactos ambientais e econômicos relacionados à manutenção.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e Petrobras pelo incentivo à realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOLRASOL, M. G. M. et al. Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review. Electronics, v. 10, n. 2689, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/electronics10212689.

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2022.

EBERHARDSTEINER, L.; BLAB, R. Design of bituminous pavements – a performance-related approach. Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. 2, p. 244-258, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1380689.

FRANCO, F. A. C. de P. Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa v. 1.1.7. Projeto DNIT TED nº 682/2014. Brasília: DNIT, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1.7/ajuda-do-medina-1-1-7.pdf.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de. Abastecimento de água para consumo humano. v. 2. [S.l.]: Editora UFMG, 2016.

MELNIK, R. Universality of mathematical models in understanding nature, society, and man-made world. In: Mathematical and Computational Modeling, 2015. p. 1–16.

MENDONÇA, L. M. et al. Modelagem chuva-vazão via redes neurais artificiais para simulação de vazões de uma bacia hidrográfica da Amazônia. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 18, e2, 2021. DOI: https://doi.org/10.21168/rega.v18e2.

QIAO, Y. et al. Flexible pavements and climate change: a comprehensive review and implications. Sustainability, v. 12, n. 3, p. 1057, 2020.

SOUZA, P. M. Revisão sistemática múltipla para o desenvolvimento do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) quanto à deformação permanente na camada do revestimento asfáltico. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2005. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH.

Fellype Guilherme Ramalho Guerra da Silva (fellype.guilherme@det.ufc.br)
Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Mister Hull, s/n, Pici, Bloco 703, Fortaleza, Ceará, Brasil

USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ELABORAÇÃO E EXECUÇÃO DE PROJETOS GEOTÉCNICOS DE PAVIMENTAÇÃO

Rosa Angélica Saldanha Magalhães Angelim[1],
Suelly Helena de Araújo Barroso[2]
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO
Estudos geotécnicos para pavimentação demandam tempo e custos elevados e, eventualmente, precisam ser refeitos devido à imprevisibilidade das condições de acesso às jazidas, qualidade e quantidade da matéria-prima insuficiente, fragmentação e lapso temporal entre projeto e obra. Além disso, o método empírico-mecanístico acrescentou parâmetros complementares como Módulo de Resiliência e Deformação Permanente, obtidos por ensaios extensos e mais onerosos. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar se o uso de parâmetros geotécnicos estimados por modelos preditivos desenvolvidos com inteligência artificial é viável para elaboração e execução de projetos de pavimentação. O método consistirá na realização de projeto e obra em trecho experimental em rodovia federal, comparando-os aos realizados por métodos tradicionais. A proposta busca otimizar tempo e custos, contribuir com a implementação do MeDiNa, refinar modelos existentes e subsidiar uma futura classificação de rodovias que permita a aplicação de inteligência artificial na elaboração e execução de projetos geotécnicos de pavimentação.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SINTÉTICA/JUSTIFICATIVA

Para se praticar a pavimentação é necessário conhecer a totalidade das propriedades físicas e químicas dos solos, pois são com eles e sobre eles que são construídos os pavimentos. Estudos como sondagens e ensaios de laboratório são necessários para definição dos parâmetros dos solos, com o objetivo de identificar características do subleito e ocorrências de materiais, tais como jazidas, areais e pedreiras, para uso nas camadas do pavimento.

As primeiras etapas dos projetos de engenharia rodoviários consistem no desenvolvimento desses estudos preliminares que são compostos de vários levantamentos de dados, que demandam gastos significativos de tempo e custo. Além disso, as dificuldades na elaboração de projetos relacionadas à imprevisibilidade das condições de acesso e presença de matéria-prima com qualidade e em quantidade adequada, a fragmentação e um eventual lapso temporal entre as atividades de projeto e de execução, podem resultar na necessidade de busca por outras alternativas, como o uso de materiais de jazidas que não correspondem aos indicados em projetos, o que resulta em retrabalhos.

A partir de uma base de dados georreferenciada com informações geotécnicas de uma determinada região é possível obter o conhecimento prévio dessas características a partir de um modelo de inferência e assim empregá-los na pavimentação e obras viárias em geral. Ribeiro (2013) a partir de dados geotécnicos secundários e características biofísicas (geologia, pedologia, vegetação, geomorfologia, altimetria, coordenadas geográficas) como dados de entrada, foi viável obter, com modelagem neural, a classificação AASHTO e o California Bearing Ratio (CBR) como dados de saída preliminares.

Nesse mesmo sentido, em Ribeiro (2016) são apresentadas estimativas que podem ser integradas aos métodos de dimensionamento de pavimentos, reduzindo seus custos financeiros e tempo de execução. Os métodos empírico-mecanísticos dependem, para sua aplicação, do conhecimento prévio de diferentes atributos geotécnicos dos solos. Assim, o referido autor adotou o uso de técnicas de inteligência artificial na geração de modelos destinados a estimar o Módulo de Resiliência (MR) de solos, a fim de que sejam usados nos métodos de dimensionamentos de pavimentos, para os quais essa informação seja imprescindível.

Outro parâmetro importante é a Deformação Permanente (DP) que tem sido modelada por alguns autores como Cabral (2021) e Cabral *et al.* (2022), cujos modelos de previsão desenvolvidos atenderam às necessidades estruturais do pavimento e foram considerados satisfatórios para prever a DP dos solos investigados. Já Araújo (2023) e Araújo *et al.* (2024) realizaram o ajuste de modelos de previsão, baseados em propriedades geotécnicas e índices físicos, utilizando algoritmo de aprendizado de máquinas empregado para realizar predições e redes neurais artificiais, que favoreceu a redução do período de ensaio de DP, economizando tempo e recursos no dimensionamento de pavimentos pelo MeDiNa.

Segundo Oliveira (2024), a modelagem neural, quando há disponibilidade de dados em quantidade e qualidade adequados, possibilita a previsão de uma variedade de características geotécnicas dos solos, podendo ser uma opção de estimativa mais econômica e complementar em relação à obtenção tradicional de dados, exclusivamente via ensaios de laboratório de CBR e MR necessários para projeto de pavimentos. Em seu trabalho, o autor desenvolveu modelos neurais por meio do uso de inteligência artificial e mapas geológico-geotécnicos para serem aplicados em projetos de pavimentação no Estado do Ceará.

Tendo em vista a possibilidade de aquisição de resultados confiáveis, por meio de sistemas inteligentes, em Costa *et al*. (2024) foram desenvolvidas Redes Neurais Artificiais (RNAs), para predição do MR de solos do Estado de Goiás, a partir de sua caracterização física. A predição do MR, obteve bons resultados indicando a viabilidade de uso dessa ferramenta e consequente facilitação do uso do MeDiNa no dimensionamento de pavimentos. Em Bastos (2024) foi desenvolvido modelo de predição da DP de solos da Região Metropolitana de Fortaleza a partir da técnica de RNAs, tendo como variáveis explicativas o CBR, tensão confinante, tensão desvio, MR, classificação AASHTO e número de ciclos (N).

Assim, a modelagem dos parâmetros das características dos solos a serem adotados nos projetos pode ser investigada por meio de métodos de predição, com aplicação de modelos de inteligência artificial, adotando as técnicas de Geoprocessamento e RNAs, por exemplo, bem como variáveis biofísicas e espaciais como explicativas dos fenômenos modelados. Essa estratégia pode se mostrar próspera, à medida que o desempenho dos modelos seja satisfatório, que pode ser reforçado, em especial, ao se estudar os resultados obtidos nos pavimentos dimensionados e construídos com base no uso de banco de dados e inteligência artificial.

Embora existam vários estudos que aplicam técnicas de inteligência artificial para estimar parâmetros utilizados no dimensionamento de pavimentos, não foram identificados registros que confirmem a construção subsequente desses pavimentos com base nas características estimadas por modelos de predição. É possível que tais aplicações práticas ainda estejam em fase de pesquisa ou que não tenham sido amplamente documentadas na literatura consultada.

2. OBJETIVO GERAL DA PESQUISA

Avaliar se o uso de parâmetros geotécnicos estimados por modelos preditivos é viável para elaboração e execução de projetos de pavimentação, por meio da aplicação prática em projeto e obra de trecho experimental.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método consiste na revisão bibliográfica e no estudo do banco de dados georreferenciado, dos modelos de previsão desenvolvidos utilizando inteligência artificial para inferência dos valores e suas respectivas variáveis independentes e dependentes. Nessa fase é observada a condução do uso da técnica de RNAs, bem como a elaboração dos mapas geológicos-geotécnicos resultantes desse processo. Concomitantemente, é realizado o acompanhamento junto ao órgão responsável pela elaboração dos projetos e execução da obra pela contratada do empreendimento. Após a definição do local do trecho experimental é realizada a coleta das amostras dos materiais do subleito, jazida, areal e pedreira. Executa-se a quantidade de furos de sondagem que forem necessários de acordo com a extensão do segmento do referido trecho experimental, para o subleito, e os que forem necessários nas ocorrências para pavimentação, para as camadas dos pavimentos. Para cada amostra serão realizados os ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, umidade natural, compactação, CBR, densidade *in situ*, ensaios triaxiais de MR e DP. Além dos ensaios de caracterização dos materiais, espera-se realizar os ensaios para misturas solo-brita e/ou solo-areia, para eventual uso nas subcamadas do pavimento. De posse dos parâmetros laboratoriais, o pavimento do trecho experimental será dimensionado de acordo com o método empírico e método empírico-mecanístico do MeDiNa, bem como analisados em outros programas. Em paralelo, o pavimento também será dimensionado pelos citados métodos com base nos parâmetros estimados pelos modelos existentes (como classificação AASHTO, CBR, MR, DP). Dessa forma, será feita a análise comparativa entre os projetos obtidos de forma convencional e os projetos obtidos com características estimadas pelos modelos de predição. Posteriormente, será realizada a execução do respectivo trecho experimental, sendo um segmento projetado convencionalmente e outro segmento projetado com dados estimados. Por fim, será feito o acompanhamento de ambos os segmentos visando análise comparativa de seus desempenhos.

4. ANDAMENTO DOS TRABALHOS

O local do trecho experimental foi definido e terá uma extensão de 300 metros, localizado na via marginal da rodovia federal. A coleta das amostras dos materiais do subleito, jazida, areal e pedreira foi realizada. Foram retiradas 3 amostras do subleito, 9 amostras da jazida, 16 amostras do areal e amostras *in natura* de brita retiradas manualmente da pedreira. Deu-se início a caracterização do subleito e jazidas, para os quais estão sendo feitos os ensaios de granulometria por peneiramento, por sedimentação, limite de liquidez, limite de plasticidade, umidade natural, compactação, CBR, densidade *in situ*.

5. RESULTADOS ESPERADOS

(a) Identificar diferenças encontradas entre os parâmetros do projeto previstos tradicionalmente e aqueles utilizando as propriedades estimadas com redes neurais e coletados em campo após execução do trecho experimental; (b) Avaliar as diferenças no prazo e no custo da elaboração do estudo geotécnico e do projeto de pavimentação ao se utilizar parâmetros geotécnicos estimados com inteligência artificial; (c) Refinar os modelos de predição das características geotécnicas de interesse à pavimentação já existentes (classificação AASHTO, CBR, MR, DP); (d) Auxiliar a implementação do método MeDiNa, ao propor o uso de parâmetros geotécnicos estimados com inteligência artificial no referido método de dimensionamento brasileiro; (e) Colaborar com o processo da tomada de decisão quanto à adoção de parâmetros estimados para fins de elaboração de projetos e obras de pavimentação rodoviários por meio de uma classificação de riscos e (f) Contribuir para evolução das técnicas de estudos, projetos e métodos construtivos dos pavimentos, por meio da otimização de recursos na fase de projetos do empreendimento, evitando retrabalhos.

Agradecimentos

As autoras agradecem o apoio financeiro do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, M. J. R. (2023) *Análise do comportamento plástico de solos para otimização dos ensaios de deformação permanente em pavimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

Araújo, M. J. R.; S. H. A. Barroso; A. J. A. Ribeiro e F. A. F. Vieira (2024) *Definition of new stopping criteria for the characterization of permanent deformation of granular materials.* Transportation Geotechnics. Volume 44, January 2024, 101159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101159.

Bastos, S. D. V. (2024) *Estudo do comportamento mecanístico-empírico de materiais alternativos e cimentícios em camadas de pavimentos*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

Cabral, W. S. (2021) *Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da Microregião de Mossoró/RN*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

Cabral, W. S.; S. H. A. Barroso e S. A. T. Silva (2022) *Consideration of the permanent deformation of soils used in flexible pavement design.* Geotechnical Engineering. Volume 175 Issue 4, August, 2022, pp. 451-458. DOI: https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00055.

Costa, S. C. F. do E.; A. E. de F. L. Lucena; W. de Paiva (2024). *Aplicação da Inteligência Artificial em Projetos de Pavimentação.* Revista Baru - Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos, Goiânia, Brasil, v. 9, n. 1, p. 19 páginas, 2024. DOI: 10.18224/baru.v9i1.13338.

Oliveira, F. C. H. P. de (2024) *Desenvolvimento de modelos neurais e mapas geológico-geotécnicos para pavimentação no estado do Ceará.* Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

Ribeiro, A. J. A. (2013) *Um método para localização e estimação das características geotécnicas dos solos da região metropolitana de Fortaleza-CE para fins de pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

Ribeiro, A. J. A. (2016) *Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no Estado do Ceará para fins de pavimentação*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

(1) Rosa Angélica Saldanha Magalhães Angelim (rosa.saldanha@det.ufc.br)

(2) Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici – Bloco 703 (1º andar) – CEP 60455-760 – Fortaleza, Ceará, Brasil

Pavimentação urbana

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

OTIMIZAÇÃO DO ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

Alexandre Simas de Medeiros[1], Claudeny Simone Alves Santana[1], Marcelino Aurélio Vieira da Silva[1]
[1]Programa de Engenharia de Transportes, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO
A previsão da deformação permanente (DP) em solos utilizados em pavimentos é essencial para garantir a durabilidade e segurança das rodovias. O ensaio de DP, conforme a norma DNIT 179/2018-IE, exige 150.000 ciclos de carga repetida, tornando-se um processo demorado e oneroso. Este estudo investiga a possibilidade de reduzir esse número de ciclos sem comprometer a confiabilidade dos resultados. A análise estatística dos ensaios realizados indica que, com 30.000 ciclos, é possível estimar a DP correspondente a 150.000 ciclos com erro inferior a 1%. O estudo baseia-se em ensaios triaxiais dinâmicos realizados em duas frequências (2Hz e 5Hz), com ajustes estatísticos e modelagem para extrapolação dos resultados. Foram analisados diferentes intervalos de ciclos (10.000, 30.000, 60.000 e 80.000) e avaliadas regressões lineares segmentadas para verificar a estabilidade dos coeficientes ajustados. Os resultados demonstram que a redução dos ciclos é viável e pode otimizar a eficiência laboratorial sem comprometer a precisão da previsão da DP. Ademais, a metodologia proposta pode contribuir para novas diretrizes normativas e aprimorar a avaliação de materiais estabilizados, auxiliando no desenvolvimento de projetos rodoviários sustentáveis.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A investigação da deformação permanente em solos destinados à construção de pavimentos asfálticos assume um papel crítico na garantia da longevidade e da segurança estrutural das rodovias (Hadjidemetriou et al., 2017). O ensaio de deformação permanente, normatizado pela DNIT 179/2018-IE, estabelece a aplicação de 150.000 ciclos de carga repetida, visando simular o comportamento do material ao longo de sua vida útil sob tráfego. No entanto, a execução deste ensaio impõe desafios práticos significativos, demandando um tempo considerável e um elevado consumo de recursos laboratoriais (Cabral, 2021). Diante deste cenário, o presente estudo se dedica a explorar a viabilidade de reduzir o número de ciclos de carga necessários para obter resultados fidedignos, sem comprometer a precisão da avaliação da deformação permanente.

Neste contexto, este estudo investiga a possibilidade de redução do número de ciclos necessários para a obtenção de resultados confiáveis. A partir de uma análise estatística dos ensaios realizados, verificou-se que com apenas 30.000 ciclos é possível estimar a DP correspondente a 150.000 ciclos com um erro inferior a 1%. Tal abordagem tem o potencial de otimizar o tempo de ensaio e reduzir custos operacionais, mantendo a precisão necessária para avaliação dos materiais. No entanto, é importante ressaltar que este estudo contempla apenas 150.000 ciclos, e que a extrapolação deste valor para maiores quantidades de ciclos depende de análises mais robustas e criteriosas.

Isso porque, a taxa de acúmulo de DP fosse constante, a linearização tenderia a ser uma reta. No entanto, conforme os ciclos avançam, a taxa de acúmulo tende a alterar, demonstrando que a acomodação do material ocorre de forma variada. Dessa forma, é fundamental adequar o estudo às características do material, pois diferentes solos podem apresentar comportamentos distintos em relação à deformação permanente. Neste sentido, trabalho detalha a metodologia utilizada para a extrapolação dos resultados, apresenta a análise estatística realizada e discute as implicações dessa abordagem para os processos de dimensionamento de pavimentos e revisões normativas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma amostra de areia siltosa (SM) segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) e como A-2-4 conforme a metodologia HRB (AASHTO, 2003). O material foi coletado nas coordenadas 22°34'19.416" S e 44°01'4.875" W, no município de Pinheiral (Rodovia Presidente Dutra).

A metodologia adotada neste estudo baseia-se na análise de dados experimentais obtidos em ensaios triaxiais dinâmicos realizados em laboratório, com posterior ajuste estatístico para extrapolação dos resultados. As etapas envolvidas foram as seguintes:

1. **Execução dos Ensaios de Deformação Permanente:** utilizou-se 2 corpos de prova submetidos a 150.000 ciclos de carga repetida, conforme DNIT 179/2018-IE. Os ensaios foram conduzidos em duas

frequências,2 Hz e 5 Hz, registrando-se a evolução da DP ao longo dos ciclos;

2. **Aquisição e Organização dos Dados:** foram registrados e organizados em uma planilha eletrônica, onde foram criadas tabelas e gráficos para identificar tendências e padrões de comportamento DP;
3. **Ajuste Linear por Etapas:** aplicação do ajuste linear por etapas, considerando diferentes intervalos de ciclos e a linearização dos resultados. As equações de regressão foram ajustadas com base na evolução da deformação ao longo do tempo dos dados linearizados. Cada etapa foi analisada individualmente para garantir a adequação do modelo à variação da taxa de acúmulo da DP;
4. **Verificação dos Ajustes Estatísticos:** utilização do coeficiente de determinação (R^2) para avaliar a qualidade do ajuste, erros médios cruzados e os quadrados médios dos resíduos para verificar a consistência dos modelos. Utilização doteste de Shapiro-Wilk, identificando se há necessidade de transformações adicionais nos dados.
5. **Comparação entre Diferentes Intervalos de Ciclos:** regressões comparadas para intervalos de 10.000, 30.000, 60.000 e 80.000 ciclos. A estabilidade dos coeficientes ajustados foi analisada para verificar a viabilidade da extrapolação dos 30.000 ciclos para 150.000 ciclos e a comparação entre as frequências 2Hz e 5Hz foi realizada para avaliar possíveis diferenças no comportamento do solo sob diferentes condições de carregamento.

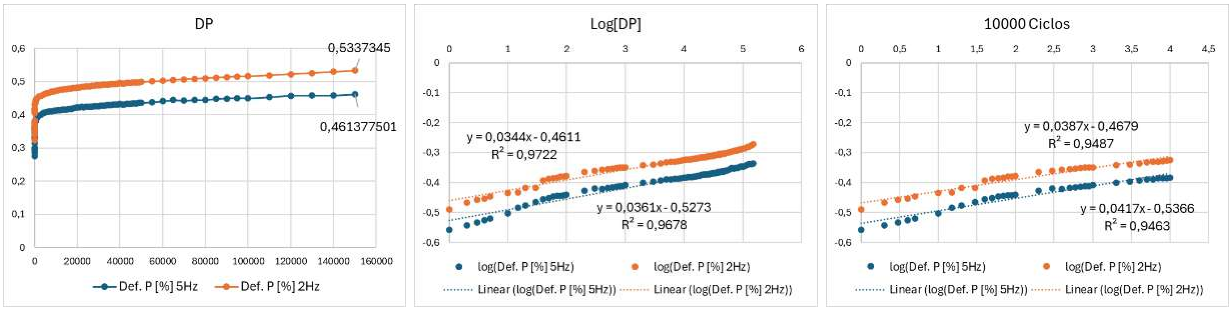
3. RESULTADOS

Os dados apresentados na Tabela 1 referem-se às medições da densidade e umidade de amostras de solo compactadas em diferentes frequências de ensaio (2 Hz e 5 Hz). De modo geral, as umidades variaram entre 7,5% a 7,74%. Para CP 2 Hz, a densidade úmida é ligeiramente menor, 2,346 g/cm³, levando a uma densidade seca média de 2,178 g/cm³. Já para o CP 5 Hz, os resultados indicam uma densidade úmida de 2,359 g/cm³, resultando em uma densidade seca média de 2,191 g/cm³. Os valores mostram que ambas as condições apresentam valores próximos, sugerindo que a compactação do solo não sofreu grandes alterações.

Tabela 1: Parâmetros geotécnicos das amostras.

Frequência	Peso (g)	V_{molde}	δ úmida	Cap.	Peso da Cap.	Peso bruto úmido	Peso bruto seco	h(%)	δ seca	δ média
CP 5 Hz	3706	1570,7	2,359	103	57,06	136,25	130,56	7,74	2,189	2,191
				105	56,68	118,02	113,68	7,61	2,192	
CP 2 Hz	3686	1570,7	2,346	109	56,67	140,05	134,23	7,50	2,174	2,178
				104	55,73	124,99	120,14	7,53	2,182	

As imagens da Figura 1 apresentam gráficos resultantes do ensaio de DP. O primeiro gráfico exibe a evolução da DP ao longo dos ciclos, evidenciando um crescimento progressivo. O gráfico de log(DP) sugere uma tendência de linearização, facilitando a análise estatística. Os demais gráficos mostram regressões lineares para diferentes intervalos de ciclos (10.000, 30.000, 60.000 e 80.000). Os coeficientes de determinação (R^2) indicam bons ajustes estatísticos, com maior precisão para 30.000 ciclos. A variação na taxa de acúmulo da DP sugere que a acomodação do solo ocorre de forma não linear, reforçando a necessidade de modelos mais complexos para previsões mais precisas.



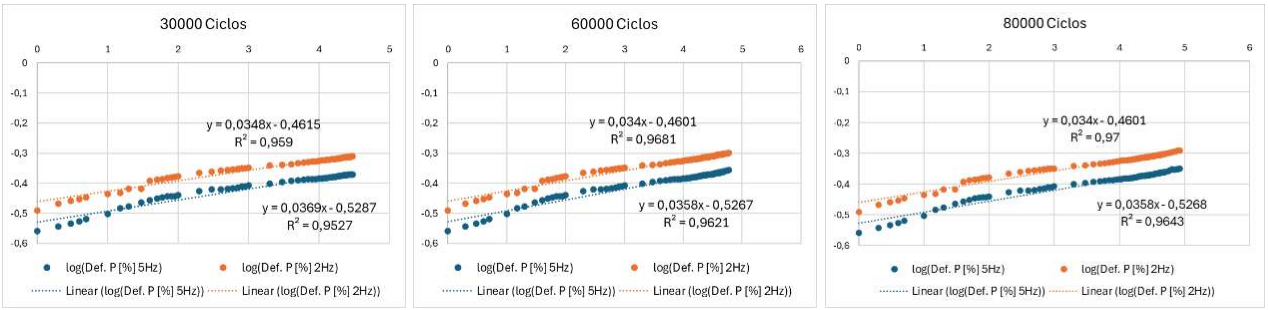


Figura 1: Ajuste linear da DP.

Na modelagem com 10.000 ciclos iniciais, os erros percentuais são menores, variando de 1,866% a 5,727%. Isso demonstra uma melhora significativa na precisão da previsão da DP, reduzindo as discrepâncias em relação aos valores observados. Em particular, a extrapolação para 150.000 ciclos apresenta um erro de 1,866% (2 Hz) e 4,521% (5 Hz), valores bem inferiores aos erros obtidos com apenas 3.000 ciclos iniciais. Estas informações podem ser conferidas na Tabela 2.

Ainda na Tabela 2 apresenta-se os dados para 30.000 ciclos iniciais, os erros percentuais variam entre 0,369% (2 Hz) e 3,190% (5 Hz), indicando um ajuste relativamente preciso, mas com um aumento no erro conforme os ciclos avançam. Para 150.000 ciclos, o erro atinge 3,190% (2 Hz) e 0,523% (5 Hz), o que sugere que essa modelagem ainda apresenta boa precisão.

Por outro lado, na modelagem com 60.000 ciclos iniciais (v. Tabela 2), observa-se uma redução nos erros, variando entre 0,075% (2 Hz) e 4,195% (5 Hz), com os menores erros ocorrendo nos ciclos intermediários. A extrapolação para 150.000 ciclos apresenta um erro de 4,195% (2 Hz) e 1,623% (5 Hz), valores inferiores aos obtidos com apenas 30.000 ciclos.

Tabela 2: Erro da linearização das curvas com 10.000, 30.000 e 60.000 ciclos com 2 Hz e 5 Hz.

Modelagem utilizando os 10000 ciclos iniciais					Modelagem utilizando os 30000 ciclos iniciais				Modelagem utilizando os 60000 ciclos iniciais			
DP	2 Hz	Erro (%)	5 Hz	Erro (%)	2 Hz	Erro (%)	5 Hz	Erro (%)	2 Hz	Erro (%)	5 Hz	Erro (%)
10000	-0,3131	3,88	-0,3698	3,82	-0,3223	1,05	-0,3811	0,88	-0,3241	0,50	-0,3835	0,25
30000	-0,2946	5,27	-0,3499	5,47	-0,3057	1,72	-0,3634	1,80	-0,3078	1,02	-0,3664	1,01
60000	-0,2829	5,22	-0,33735	5,22	-0,2952	1,12	-0,3523	0,99	-0,2976	0,31	-0,3556	0,08
80000	-0,2781	4,73	-0,33214	5,73	-0,2908	0,37	-0,3477	1,29	-0,2933	0,50	-0,3511	0,33
150000	-0,2675	1,87	-0,32076	4,52	-0,2813	3,19	-0,3377	0,52	-0,2841	4,20	-0,3414	1,62

Na Tabela 3, apresentam-se os dados da modelagem baseada em 80.000 ciclos iniciais, os erros percentuais variam entre 0,23% e 0,50%, indicando um ajuste preciso, com os menores erros ocorrendo nos ciclos intermediários e um leve aumento para 150.000 ciclos (4,2% e 1,65%). Esses resultados mostram que, com 80.000 ciclos, a extrapolação já apresenta um bom nível de precisão.

Tabela 3: Erro da linearização das curvas com 80.000 e 150.000 ciclos com 2 Hz e 5 Hz.

Modelagem utilizando os 80000 ciclos iniciais					Modelagem utilizando os 150000 ciclos iniciais			
DP	2 Hz	Erro (%)	5 Hz	Erro (%)	2 Hz	Erro (%)	5 Hz	Erro (%)
10000	-0,3241	0,50	-0,3836	0,23	-0,3235	0,69	-0,3829	0,41
30000	-0,3078	1,02	-0,3665	0,99	-0,3070	1,27	-0,3656	1,21
60000	-0,2976	0,31	-0,3557	0,05	-0,2967	0,62	-0,3548	0,31
80000	-0,2933	0,50	-0,3512	0,30	-0,2924	0,17	-0,3503	0,57
150000	-0,2841	4,20	-0,3415	1,65	-0,2830	3,80	-0,3404	1,34

Por outro lado, na modelagem com 150.000 ciclos iniciais, observa-se uma redução ainda maior nos erros, variando de 0,166% a 3,802%, com os menores erros nos ciclos intermediários e os valores mais baixos para a extrapolação em longo prazo. Para 150.000 ciclos, o erro é de 3,802% (2Hz) e 1,339% (5Hz), reforçando que essa modelagem apresenta a melhor precisão. Estas informações podem ser conferidas na Tabela 3.

Na Tabela 4, apresenta-se a avaliação da regressão linear. Os dados incluem o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio da validação cruzada (Erro Médio-VC) e o p-valor do teste de Shapiro-Wilk (SW), utilizado para avaliar a normalidade dos resíduos.

Tabela 4: Indicadores de desempenho por intervalo de ciclos e frequência.

Intervalo de Ciclos	Frequência	R^2	Erro Médio VC	SW (p-valor)
0 - 10.000	5Hz	0.946	1.65e-4	0.0177
0 - 10.000	2Hz	0.949	1.19e-4	0.0053
0 - 30.000	5Hz	0.953	1.27e-4	0.0042
0 - 30.000	2Hz	0.959	9.56e-5	0.00025
0 - 60.000	5Hz	0.962	9.76e-5	6.09e-7
0 - 60.000	2Hz	0.968	7.06e-5	9.92e-8
0 - 80.000	5Hz	0.964	9.32e-5	3.21e-7
0 - 80.000	2Hz	0.970	6.74e-5	6.47e-8

Observa-se que o coeficiente de determinação (R^2) varia de 0,946 a 0,970, indicando um alto ajuste dos modelos aos dados experimentais. Além disso, conforme o intervalo de ciclos aumenta, o R^2 também cresce, sugerindo que a modelagem baseada em mais ciclos representa melhor a evolução da DP.

O erro médio da validação cruzada diminui progressivamente à medida que mais ciclos são considerados, variando de $1{,}19.10^{-4}$ a $6{,}74.10^{-5}$, o que demonstra que modelagens com um maior número de ciclos oferecem maior precisão preditiva. No entanto, os p-valores do teste de Shapiro-Wilk(SW) revelam que a normalidade dos resíduos é rejeitada para os maiores intervalos de ciclos, especialmente nos casos com 80.000 ciclos iniciais, onde os valores são extremamente baixos ($6{,}47.10^{-8}$ para 2 Hz e $3{,}21.10^{-7}$ para 5 Hz).

Isso indica que os resíduos da regressão não seguem uma distribuição normal, sugerindo a necessidade de ajustes não lineares ou transformações dos dados para capturar melhor o comportamento da deformação permanente ao longo do tempo. Assim, apesar da melhora no ajuste estatístico com mais ciclos, a não normalidade dos resíduos sugere que abordagens alternativas podem ser necessárias para uma modelagem mais robusta da DP.

4. DISCUSSÃO

No presente estudo, embora não tenha sido o foco a análise da retirada dos ciclos iniciais, os resultados obtidos indicam que a taxa de acúmulo de deformação permanente (DP) não é constante ao longo do ensaio, sendo visivelmente mais acentuada nos ciclos iniciais. Todavia estes ciclos iniciais não devem ser descartados, uma vez que esses dados são essenciais para a correta modelagem do desempenho plástico do solo.

Corroborando com essa interpretação, o estudo de Lima, Motta e Aragão (2021) analisou diferentes materiais submetidos ao ensaio de DP e concluiu que a retirada dos 500 ciclos iniciais compromete significativamente a previsão da DP final, podendo inclusive alterar a classificação do comportamento dos materiais conforme a teoria do *shakedown*. Os autores demonstram que tais exclusões podem levar à subestimação da deformabilidade acumulada, impactando diretamente a seleção dos materiais e a previsão de afundamentos no dimensionamento mecanístico de pavimentos. Assim, ainda que o presente trabalho tenha como principal foco a otimização do número total de ciclos, os resultados obtidos também indicam que a manutenção dos ciclos

iniciais é fundamental para preservar a fidelidade dos modelos preditivos, estando alinhados com a literatura técnica mais recente sobre o tema.

Ambos os estudos apontam que a redução dos ciclos finais pode ser realizada com segurança técnica, desde que amparada por critérios bem definidos — seja por modelagem estatística com baixo erro de extrapolação, como demonstrado neste trabalho, ou por monitoramento direto da estabilização do material, como sugerido pela literatura especializada. Essas contribuições fortalecem a discussão sobre possíveis ajustes normativos no DNIT 179/2018-IE, com vistas à otimização do tempo e dos recursos laboratoriais.

5. CONCLUSÃO

Com base na análise estatística realizada, os modelos de regressão linear ajustados demonstraram alto coeficiente de determinação ($R^2 > 0,94$), evidenciando um excelente ajuste aos dados experimentais. No entanto, a normalidade dos resíduos foi rejeitada na maioria dos testes de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), indicando a necessidade de possíveis transformações nos dados ou a adoção de modelos alternativos, como modelos não lineares, para capturar com maior precisão o comportamento da deformação permanente ao longo dos ciclos.

A não normalidade dos resíduos pode indicar que a taxa de acúmulo de deformação permanente (DP) não é constante ao longo do tempo. Isso sugere que a acomodação do solo ocorre de maneira variada durante os ciclos de carregamento, o que pode ser explicado por diferentes fases do comportamento do material.

Nos primeiros ciclos, a deformação pode se acumular mais rapidamente devido ao rearranjo inicial das partículas do solo, com uma taxa de acúmulo maior. Conforme os ciclos avançam, a taxa de deformação pode reduzir à medida que o material se acomoda e estabiliza sua estrutura interna. Em alguns casos, porém, pode haver um aumento na taxa de deformação em fases mais avançadas devido a fenômenos como degradação progressiva da estrutura granular ou ruptura localizada.

O modelo correspondente à frequência de 2Hz apresentou, de forma consistente, menor erro médio na validação cruzada e quadrado médio dos resíduos mais baixo em comparação ao modelo de 5Hz. Esse comportamento sugere que a representação estatística do modelo em 2Hz pode ser ligeiramente superior para prever a evolução da deformação permanente. Essas estratégias podem contribuir para o desenvolvimento de novos critérios normativos e otimização dos ensaios laboratoriais voltados para pavimentação rodoviária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cabral, W. S. *Exploração, Análise Comparativa e Modelagem da Deformação Permanente de Materiais Granulares da Microregião de Mossoró/RN*. Tese (Doutorado pelo Programa Pós-graduação em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. 2021.

Choi, Y. K.; A. C. Collop; G. Airey; R. Elliott; J. Williams e M. W. Heslop. (2020). *Assessment of the Durability of High Modulus Base (HMB) Materials.* CRC Press eBooks (p. 823). Informa. https://doi.org/10.1201/9781003078821-5

DNIT (2018) Norma DNIT 179/2018 – IE: *Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente* – Instrução de ensaio.

Hadjidemetriou, G. M; P. A. Vela e S. E. Christodoulou. (2017). *Automated Pavement Patch Detection and Quantification Using Support Vector Machines.* Journal of Computing in Civil Engineering, 32(1). https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000724

Islam, S. S; S. Singh; G. D. Ransinchung e S. S. Ravindranath. (2020). *Effect of property deterioration in SBS modified binders during storage on the performance of asphalt mix.* Construction and Building Materials, 272, 121644. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121644

Sobhan, K. e B. M. Das. (2006). *Durability of Soil–Cements against Fatigue Fracture*. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(1), 26. https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:1(26)

Alexandre Simas de Medeiros (alexandre.simas@pet.coppe.ufrj.br)
Claudeny Simone Alves Santana (claudeny@pet.coppe.ufrj.br)
Marcelino Aurélio Vieira da Silva (marcelino@pet.coppe.ufrj.br)
UFRJ, COPPE, Programa de Engenharia de Transporte, Centro de Tecnologia – CT, R. Athos da Silveira Ramos, 149 | Bloco I, Sala 254, CEP: 21945-970 - Cidade Universitária – Ilha do Fundão – RJ Brasil)

Metodologias e avaliação do ensino-aprendizagem

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO E AMBIENTAL EM ESCOLAS DE NATAL/RN: DESAFIOS E POTENCIAIS NA FORMAÇÃO DE HÁBITOS DE TRANSPORTE SUSTENTÁVEIS.

Isabela Stéfane Costa de Araújo, Ana Beatriz Freitas de Melo, Isabel Magalhães
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO
Este artigo analisa práticas de educação para o trânsito e ambiental em escolas de ensino básico em Natal/RN, buscando entender sua suficiência na formação de hábitos de transporte sustentáveis. A coleta de dados foi realizada por meio de questionários aplicados a instituições de ensino, com seções voltadas à identificação da escola, às práticas pedagógicas e à percepção dos educadores sobre sustentabilidade. As respostas foram examinadas a partir de uma abordagem qualitativa e quantitativa, permitindo identificar padrões, lacunas e potencialidades. Identificou-se uma integração positiva das temáticas, com o uso de metodologias lúdicas. Contudo, há lacunas significativas como a falta de sistematização, a periodicidade inconsistente das atividades e a carência de capacitação contínua para professores. Para que essas ações atinjam seu potencial transformador, é crucial que sejam sistematizadas, integradas ao projeto político-pedagógico e que haja investimento na formação docente, visando a construção de sociedades mais seguras, justas e sustentáveis.

1. INTRODUÇÃO

A formação de cidadãos conscientes e responsáveis é um dos pilares fundamentais da educação básica, especialmente em temáticas que impactam diretamente a segurança, a saúde pública e o meio ambiente. Esses pilares são enfatizados nas competências gerais da educação básica, pelo documento de caráter normativo da educação brasileira, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC – Brasil, 2017). Nesse sentido, a educação para o trânsito e a educação ambiental são componentes essenciais para o desenvolvimento de hábitos sustentáveis desde a infância, promovendo uma cultura de segurança e sustentabilidade.

De acordo com Neves (2020), incluir a educação para o trânsito nas etapas iniciais da escolarização é uma estratégia fundamental para a construção de uma cultura de segurança, sensibilizando crianças sobre comportamentos preventivos e éticos no trânsito. Neste sentido, Magalhães (2025) destaca que a educação desde a tenra idade pode induzir mudanças comportamentais duradouras, sendo essencial para a internalização de valores sustentáveis. A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2018) reforça essa urgência ao destacar que os acidentes de trânsito são a principal causa de morte entre crianças e jovens de 5 a 29 anos no mundo. Em consonância, a meta 3.6 da Agenda 2030 (ONU, 2015) visa reduzir pela metade as mortes e os ferimentos globais por acidentes em estradas até 2030.

Em paralelo, a educação ambiental, conforme enfatiza Sá (2021), deve transcender práticas pontuais, sendo integrada permanentemente ao cotidiano escolar para a construção de uma consciência ecológica e cidadã. Foglia *et al*. (2024) reforçam essa perspectiva ao defenderem práticas pedagógicas lúdicas, interdisciplinares e contextualizadas, capazes de ampliar a visão das crianças sobre sua relação com o meio ambiente. Inclusive as Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica, destacam “a importância do lúdico na vida escolar” (Brasil, 2013, p. 20). Nesse sentido, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC – Brasil, 2017) estabelece a necessidade de promover competências relacionadas à responsabilidade social e ambiental, à participação cidadã e ao direito à cidade, alinhando-se aos seis direitos de aprendizagem e desenvolvimento da Educação Infantil: conviver, brincar, participar, explorar, expressar e conhecer-se.

A Constituição Federal (CF – Brasil, 1988) assegura a educação como um direito fundamental e incorpora a responsabilidade pela preservação ambiental e pela segurança coletiva como princípios constitucionais da formação cidadã. Em adição, a meta 4.7 da Agenda 2030 (ONU, 2015) evidencia a necessidade de fomentar estilos de vida sustentáveis entre os alunos de todos os níveis escolares. Assim, a articulação entre os conteúdos da educação para o trânsito, da educação ambiental e da promoção de hábitos de transporte sustentável emerge como um imperativo para a formação de indivíduos críticos, solidários e comprometidos com a transformação de seu entorno. Neste sentido, Braga (2022) chama atenção para a importância das políticas públicas voltadas à mobilidade segura no trajeto escolar e alerta que a ausência de integração entre as iniciativas fragiliza a segurança das crianças. A autora defende a adoção de programas inspirados em experiências internacionais, como o *Safe Routes to School*, que combinam gestão, diagnóstico e ações educativas. Entretanto, ela e outros autores como Magalhães (2025) advertem que tais iniciativas só serão efetivas se acompanhadas de mudanças comportamentais profundas, ancoradas na formação de valores sustentáveis desde a infância.

Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo identificar e analisar práticas realizadas em escolas de ensino básico do município de Natal (RN) que integrem a educação para o trânsito e a educação ambiental. O intuito é compreender se as ações têm sido suficientes para a formação de hábitos de transporte mais sustentáveis. A temática reflete a preocupação em fortalecer o papel da escola como agente formador de uma geração mais consciente, crítica e engajada na construção de sociedades mais justas, seguras e ambientalmente sustentáveis, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (ONU, 2015).

2. METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo deste artigo, foram elaborados dois questionários (um voltado para o ensino infantil e outro para o ensino fundamental) na plataforma Google Formulários com o intuito de investigar as práticas pedagógicas adotadas nas escolas públicas e privadas do município de Natal/RN. Conforme dados extraídos do Catálogo de Escolas do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP – Brasil, 2020), identificou-se a existência de 427 escolas ativas no município. A partir desse universo, por meio de busca *online* aos contatos das escolas, foram identificados os e-mails de 75 escolas, às quais foi enviado o formulário de pesquisa. Destas, apenas cinco responderam ao questionário, todas públicas.

O instrumento de coleta de dados consistiu em dois questionários similares estruturados em cinco seções: i) Introdução e consentimento; ii) Identificação dos participantes; iii) Educação para o trânsito; iv) Educação ambiental; e v) Hábitos de transporte sustentável. A primeira seção apresentou a pesquisa e o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, por meio do qual os participantes manifestaram sua concordância em participar da pesquisa. A segunda seção coletou informações relativas à instituição de ensino e ao perfil do respondente. Para a terceira e quarta seção, a abordagem foi similar, visando examinar a inserção dos temas no ambiente escolar, identificando os níveis de ensino nos quais é abordado, a periodicidade das atividades, as metodologias empregadas, o envolvimento de órgãos parceiros e as estratégias pedagógicas utilizadas para sua implementação. Já para a quinta seção a abordagem foi voltada para analisar a percepção dos educadores sobre a relevância do tema em diferentes etapas da educação básica e as formas como é trabalhado nas escolas.

Com relação à segunda seção (Identificação dos participantes) foram aplicadas perguntas abertas referentes ao nome da escola e ao nome do respondente, uma pergunta de múltipla escolha de resposta única acerca da função desempenhada pelo participante (opções: “Coordenador pedagógico” ou “Professor”) e uma pergunta de múltipla escolha de resposta múltipla para identificar os níveis de ensino oferecidos pela instituição (opções: “Educação Infantil”, “Ensino Fundamental I”, “Ensino Fundamental II” e “Ensino Médio”). Na sequência, as terceira e quarta seções (respectivamente, Educação para o Trânsito, e Educação Ambiental), foram estruturadas da mesma forma, com o propósito de investigar a abordagem desses temas no ambiente escolar. Foram realizadas perguntas de múltipla escolha de resposta única para verificar se a escola abordava a educação para o trânsito (“Sim” ou “Não”) e de múltipla escolha de resposta múltipla para identificar os níveis de ensino contemplados (do 1.º ao 9.º ano). Ademais, foi questionado se as atividades relacionadas ao tema resultavam de iniciativas internas da escola, de parcerias com órgãos externos ou de ambas as modalidades, bem como a frequência com que essas ações ocorriam (opções: “Semanal”, “Mensal”, “Trimestral”, “Semestral” e “Anual”). Complementarmente, foram aplicadas perguntas abertas visando descrever os conteúdos abordados e as metodologias empregadas.

Por fim, a quinta seção (Hábitos de Transporte Sustentável) teve como objetivo compreender a percepção dos participantes acerca dos hábitos de transporte sustentável e sua promoção no contexto escolar. Nessa etapa, foi aplicada uma pergunta aberta para verificar a compreensão dos respondentes sobre o conceito de “hábitos de transporte sustentável” e, subsequentemente, utilizaram-se escalas de Likert para mensurar a importância atribuída à discussão do tema nos diferentes níveis de ensino (Educação Infantil, Ensino Fundamental e Ensino Médio), em uma escala de 1 (“Nenhuma importância”) a 5 (“Fundamental importância”). Também foi realizada uma pergunta aberta para identificar se a escola promovia ações relacionadas a hábitos de transporte sustentável e de que forma tais práticas eram desenvolvidas.

A estrutura do questionário, ao combinar perguntas fechadas, que favoreceram a análise quantitativa, e perguntas abertas, que possibilitaram uma compreensão qualitativa das práticas adotadas, permitiu uma

avaliação detalhada das metodologias, dos conteúdos e das percepções relativas à educação para o trânsito, à educação ambiental e à promoção de hábitos de transporte sustentável no ambiente escolar.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação a abordagem da educação para o trânsito, das cinco escolas respondentes, quatro afirmam trabalhar a temática regularmente. Destas, duas afirmam que trabalham o tema com uma frequência anual, uma com frequência semestral, uma com frequência trimestral. A outra destacou, por meio da alternativa "Outros" que trabalha a temática de forma não regular, impulsionada por projetos pontuais ou pelo interesse espontâneo de educadores e estudantes. Ao serem questionadas sobre as estratégias metodológicas abordadas, as escolas demonstram sensibilidade às especificidades do público infantil, com destaque para o uso de dramatizações, jogos, atividades escritas e rodas de conversa. Com relação aos conteúdos abordados nas atividades, os dados mostram que o foco principal das instituições está na segurança e comportamento adequado no trânsito, destacando a travessia segura e compreensão das sinalizações. Uma das escolas informou ainda que o conteúdo abordado depende das perguntas levantadas pelas crianças. Tais práticas contribuem para despertar a consciência sobre a segurança no trânsito de forma lúdica e significativa. Contudo, conforme aponta Neves (2020), a eficácia dessa abordagem está condicionada à sua regularidade e continuidade. Assim, a ausência de uma estrutura curricular consistente pode comprometer a consolidação de uma cultura de prevenção e cidadania no trânsito, especialmente nas etapas iniciais da formação.

No que diz respeito à educação ambiental, observa-se uma maior valorização nas práticas pedagógicas. Todas as instituições participantes relataram realizar atividades voltadas ao meio ambiente, embora, novamente, com diferentes níveis de sistematização. Algumas escolas promovem ações semanais e bem estruturadas, enquanto outras ainda se restringem a datas comemorativas ou campanhas específicas. Uma escola afirma desenvolver práticas com frequência mensal; duas escolas afirmam possuir práticas com frequência trimestral; uma com frequência semestral; e a outra afirmou, por meio da opção "Outros", desenvolver práticas "a partir dos temas de pesquisa e projetos de pesquisa/extensão". Com relação às estratégias pedagógicas, destaca-se oficinas, encenações, rodas de conversa e atividades práticas. Ao serem questionadas sobre o conteúdo abordado nas atividades, observou-se que o enfoque dos conteúdos está relacionado às práticas sustentáveis no cotidiano, como reciclagem e economia de recursos. Estas práticas revelam o esforço dos educadores em proporcionar uma aprendizagem significativa. Esse esforço corrobora com a necessidade de uma educação ambiental crítica, engajadora e vivenciada desde a infância, evidenciada por Foglia *et al*. (2024). No entanto, como alerta Sá (2021), para que haja uma transformação efetiva na consciência ecológica dos estudantes, é fundamental que essas práticas se tornem parte orgânica do cotidiano escolar, e não apenas iniciativas isoladas.

No que diz respeito à análise das questões relativas à Hábitos de Transporte Sustentáveis, destaca-se a formação dos professores. Embora se perceba o interesse das escolas em tratar das questões relacionadas à sustentabilidade, apenas três das cinco escolas afirmaram oferecer capacitação sistemática aos professores. Essa lacuna interfere diretamente na profundidade e na qualidade das atividades desenvolvidas. A formação continuada é um pilar essencial para garantir que os educadores se sintam preparados e motivados a abordar essas temáticas de maneira crítica, interdisciplinar e contextualizada, como salientado por Braga (2022). Além disso, a meta 4.c da Agenda 2030 (ONU, 2015) reforça a necessidade de aumentar o contingente de professores qualificados. Já as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) apontam a importância das escolas desenvolverem programas de formação para os docentes e técnicos, para assim ter uma efetiva inserção (Brasil, 2013). Essa abordagem em relação aos profissionais da educação básica consta nas metas para a política educacional do Plano Nacional de Educação (PNE – Brasil, 2014). Em consonância, a nível estadual, o Plano Estadual de Educação do Rio Grande do Norte (PEE-RN – Rio Grande do Norte, 2016) abordou essa questão na dimensão de valorização dos profissionais da educação. Ademais, em relação à articulação, a DCN destaca "para que sejam implantadas com sucesso, é fundamental que as ações interdisciplinares sejam previstas no projeto político-pedagógico" (Brasil, 2013, p. 29). Portanto, sem considerar essas questões, há o risco de que as ações se restrinjam a experiências isoladas, sem o potencial transformador desejado.

Por fim, a análise dos dados evidencia uma tendência positiva de integração entre a educação para o trânsito e a educação ambiental, reforçando o papel da escola na formação de hábitos de transporte mais sustentáveis. Contudo, para que essa integração seja efetiva, é necessário avançar na sistematização das práticas, na formação contínua dos docentes e na articulação dos projetos educativos com os princípios da BNCC

(BRASIL, 2017) e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015). Conforme apontado por Magalhães (2025), a formação de cidadãos conscientes e comprometidos com a mobilidade sustentável depende não apenas da oferta de atividades pontuais, mas de uma transformação mais profunda na cultura escolar, que valorize a responsabilidade social, o respeito à vida e a preservação ambiental. Assim, o fortalecimento da educação para o trânsito e da educação ambiental nas escolas de ensino básico representa uma estratégia essencial para a promoção de sociedades mais seguras, justas e sustentáveis, alinhando a educação brasileira às exigências contemporâneas de cidadania e desenvolvimento humano, visto que o ambiente escolar é um espaço privilegiado de formação pelas contribuições que possibilitam esse desenvolvimento, como apontado na DCN (Brasil, 2013).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou identificar e analisar as práticas de educação para o trânsito e educação ambiental em escolas de ensino básico de Natal/RN, investigando se tais ações são suficientes para a formação de hábitos de transporte mais sustentáveis. Os resultados indicam uma tendência positiva na integração dessas temáticas, com escolas demonstrando sensibilidade às especificidades do público infantil ao empregar metodologias lúdicas, como dramatizações e jogos. A educação ambiental, em particular, revelou-se mais valorizada, com todas as instituições realizando atividades focadas em práticas sustentáveis cotidianas, como reciclagem e economia de recursos. A utilização de metodologias lúdicas, participativas e contextualizadas, em sintonia com as diretrizes da BNCC (Brasil, 2017) e da DCN (Brasil, 2013), representa um avanço importante.

No entanto, a pesquisa também revelou lacunas significativas que comprometem a efetividade e a profundidade dessas iniciativas. A falta de sistematização das abordagens para a educação no trânsito e ambiental, a periodicidade inconsistente das atividades em ambas as áreas e, sobretudo, a insuficiência na capacitação continuada dos professores foram pontos críticos identificados. Conforme a BNCC (Brasil, 2017) e os ODSs da Agenda 2030 (ONU, 2015), a formação de cidadãos conscientes e comprometidos com a mobilidade sustentável e a preservação ambiental exige mais do que ações pontuais; demanda uma transformação cultural profunda na escola, ancorada na responsabilidade social e no respeito à vida. Além disso, parcerias com órgãos externos, como secretarias municipais, ONGs e instituições especializadas, potencializam o alcance e a qualidade das ações educativas. Como evidenciado na DCN, a qual destaca que a escola de qualidade social adota a colaboração e pressupõe atendimento a requisitos como a realização de parceria com órgãos (Brasil, 2013). No entanto, tais parcerias precisam estar alinhadas a um projeto pedagógico sólido e de longo prazo, capaz de dar continuidade às iniciativas e assegurar sua relevância no cotidiano escolar.

Portanto, para que a educação para o trânsito e a educação ambiental alcancem seu pleno potencial transformador, é fundamental que as escolas avancem na sistematização e integração curricular dessas temáticas. Neste ponto, é imprescindível que sejam articuladas e contempladas no projeto político-pedagógico, conforme as normativas das DCNs (Brasil, 2013). Além disso, investir na formação continuada dos docentes é crucial, garantindo que os educadores estejam preparados para abordar esses conteúdos de maneira crítica, interdisciplinar e contextualizada. A ausência de capacitação sistemática limita o aprofundamento das práticas e a adoção de abordagens mais integradas e transformadoras. Investir na qualificação dos profissionais da educação é, portanto, uma estratégia indispensável para consolidar os avanços já alcançados.

Diante disso, conclui-se que a escola, ao assumir seu papel como agente transformador, pode contribuir decisivamente para a formação de cidadãos mais conscientes, solidários e comprometidos com a sustentabilidade e a mobilidade urbana responsável. A articulação entre educação para o trânsito, educação ambiental e hábitos de transporte sustentável, quando bem estruturada e conduzida com intencionalidade, tem o poder de impactar positivamente não apenas a vida dos estudantes, mas de toda a comunidade escolar. O ambiente escolar é um espaço privilegiado para o desenvolvimento integral do aluno, e fortalecer a educação nessas áreas é essencial para construir sociedades mais seguras, justas e sustentáveis, alinhando a educação às exigências contemporâneas de cidadania e desenvolvimento humano.

Cabe destacar como limitação deste estudo a dificuldade em estabelecer contato com as instituições escolares. Embora o município de Natal/RN conte com 427 escolas ativas, foram identificados apenas 75 endereços eletrônicos disponíveis, dos quais somente cinco responderam aos questionários aplicados. Essa restrição reduziu o universo amostral e, consequentemente, limitou a representatividade dos resultados, que devem ser

interpretados à luz dessa limitação metodológica. Ainda assim, os dados obtidos oferecem indícios relevantes sobre os desafios e potenciais da inserção da educação ambiental e para o trânsito no contexto escolar, servindo como base para investigações futuras mais abrangentes.

Por fim, como proposta para estudos futuros, sugere-se expandir a investigação para outras localidades e redes de ensino, explorando diferentes realidades socioculturais. Além disso, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas de intervenção que permitam mensurar, de forma mais objetiva, os efeitos das práticas educativas sobre os comportamentos e valores dos alunos no que se refere à sustentabilidade e à segurança no trânsito.

Agradecimentos
Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) para viabilização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Braga, N. S. *Caminhos escolares: análise de políticas públicas para uma mobilidade segura na infância.* Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília, 2022. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/46012/1/2022_NayaraSampaioBraga.pdf (acesso em 23/06/2025).

BRASIL. [Constituição (1998)]. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 2016. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm (acesso:30/06/2025).

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília: MEC, 2017.

BRASIL. Ministério da Educação. Catálogo de Escolas. 2020. Disponível em: https://anonymousdata.inep.gov.br/analytics/saw.dll?Portal (acesso em 12/09/2024).

BRASIL. Ministério da Educação. Diretrizes Curriculares Nacionais da Educação Básica. Brasília: MEC, 2013.

BRASIL. Lei n° 13.005, de 25 de junho de 2014. Aprova o Plano Nacional de Educação – PNE e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, 25 jun. 2014.

Foglia, G. S. P.; M. A. Cavalcanti e M. G. de Miranda. A educação ambiental aplicada a educação infantil uma revisão da literatura. Revista Valore, v.9, p. 125-140, 2024. DOI: 10.22408/reva9020241677124-140.

Magalhães, Isabel. Educação básica e sustentabilidade: uma análise exploratória da formação para hábitos de transporte sustentável. Transportes, [S. l.], v. 33, p. e3058, 2025. DOI: 10.58922/transportes.v33.e3058.

Neves, O. L. *Referencial curricular municipal para a educação infantil e ensino fundamental - Serra do Ramalho – BA.* Serra do Ramalho/BA. p. 48-49, 2020. Disponível em: https://serradoramalho.net/wp-content/uploads/2021/09/REFERENCIAL-CURRICULAR-SERRA-DO-RAMALHO.pdf (acesso em 23/06/2025).

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque, 2015. Disponível em: https://www.un.org/sustainabledevelopment/ (acesso em 27/04/2025).

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Relatório global sobre o estado da segurança viária 2018. Genebra: OMS, 2018.

RIO GRANDE DO NORTE. Lei n° 10.049, de 27 de janeiro de 2016. Aprova o Plano Estadual de Educação do Rio Grande do Norte (2015-2025) e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Norte, Natal, 27 jan. 2016.

Sá, N. M. O. de. O papel da educação para formação sobre o meio ambiente. In: SILVA, Antonio Wardison C. et al. *Educação ambiental, étnico-racial e em direitos humanos por uma reconstrução social*. Americana/SP: Editora Adonis, p. 61-85, 2021. Disponível em: https://unisal.br/wp-content/uploads/2021/12/E-book-Nucleos_2020-1.pdf (acesso em 23/06/2025).

Isabela Stéfane Costa de Araújo (isabela.costa.072@ufrn.edu.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, R. da Tecnologia, SN - Lagoa Nova, Natal - RN, Brasil.
Ana Beatriz Freitas de Melo (anabeatrizfreitasm@gmail.com)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, R. da Tecnologia, SN - Lagoa Nova, Natal - RN, Brasil.
*Isabel Magalhãe*s (isabel.magalhaes@ufrn.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, R. da Tecnologia, SN - Lagoa Nova, Natal - RN, Brasil.

METODOLOGIA DE APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS (ABP) NO ENSINO DE PROJETOS RODOVIÁRIOS: ANÁLISE DOS RESULTADOS DE APLICAÇÃO PRÁTICA

Rafael Henrique de Oliveira, Vivian Silveira dos Santos Bardini, Eloisa Dezen-Kempter
Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
Este trabalho apresenta os resultados da implementação da metodologia de Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP) na disciplina de Projeto e Construção de Estradas do curso de Engenharia de Transportes da Universidade de Campinas. A pesquisa avalia a eficácia da metodologia por meio de questionário aplicado aos estudantes, analisando o impacto da integração entre métodos analógicos e tecnologias empregadas em fluxos BIM (*Building Information Modeling*). Os resultados obtidos por meio de questionário estruturado demonstram contribuições para o engajamento estudantil, a compreensão prática dos conceitos e o desenvolvimento de habilidades técnicas essenciais para a formação profissional.

1. INTRODUÇÃO

A formação em Engenharia de Transportes enfrenta desafios cada vez mais complexos para capacitar profissionais a lidar não apenas com demandas técnicas, mas também com a natureza interdisciplinar dos projetos contemporâneos e as demandas socioambientais e atitudinais cada vez mais relevantes em complemento aos aspectos técnicos. Nesse contexto, as metodologias ativas de ensino, particularmente a Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP, ou *Project-Based Learning* - PBL), emergem como alternativas promissoras para superar as limitações dos métodos tradicionais de ensino e estimular o engajamento dos alunos e desenvolvimento de competências para além das técnicas, notadamente habilidades transversais como a capacidade analítica, a criatividade e as habilidades de comunicação (Bender, 2014; Hansen *et al*., 2021). Ademais, favorece a retenção do conhecimento a longo prazo, uma vez que os conceitos são assimilados em contextos práticos e significativos.

Assim, o presente trabalho apresenta os resultados da implementação da metodologia PBL na disciplina de Projeto e Construção de Estradas, com foco na análise da percepção dos estudantes sobre a experiência da metodologia. A pesquisa foi conduzida através de questionário estruturado aplicado aos discentes, permitindo uma avaliação quantitativa e qualitativa dos impactos da nova abordagem pedagógica.

2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

A implementação da metodologia ABP foi realizada na disciplina de Projeto e Construção de Estradas, oferecida no curso de Engenharia de Transportes da Universidade de Campinas. A disciplina possui carga horária de 60 horas semestrais, distribuídas em 15 semanas. A metodologia baseada em projeto retratada no presente artigo apresenta algumas diferenças em relação à abordagem clássica, principalmente no que tange ao equilíbrio entre autonomia do aluno e orientação docente. Enquanto a metodologia tradicional costuma oferecer maior liberdade para o desenvolvimento individual, o presente método incorpora incrementos nas orientações e no acompanhamento, visando assegurar que os objetivos técnicos e conceituais sejam efetivamente alcançados. Essa maior estruturação não restringe a criatividade, mas direciona o esforço dos alunos para uma aprendizagem mais focada e alinhada às exigências normativas e práticas profissionais.

A metodologia aplicada também possui como diferencial a integração de ferramentas analógicas e digitais. A implementação do *Building Information Modeling* (BIM) no ensino de engenharia tornou-se imperativa, especialmente após o Decreto Federal nº 9.377/2018 (BRASIL, 2018), que estabeleceu a obrigatoriedade do uso dessa tecnologia em projetos públicos no Brasil. Integrar ferramentas aplicadas a fluxos BIM ao currículo acadêmico configura uma adequação aos fluxos de trabalho contemporâneos e uma oportunidade de modernização dos processos de ensino-aprendizagem. Contudo, é fundamental considerar que a mera adoção de ferramentas tecnológicas não deve ocorrer em detrimento dos aspectos formativos essenciais ao processo de aprendizagem. Para evitar essa perda, pesquisas indicam que a combinação entre cálculos manuais e modelagem digital promove uma compreensão mais profunda dos fundamentos teóricos, prevenindo a dependência excessiva de ferramentas automatizadas sem o devido entendimento dos princípios subjacentes (Bernhard *et al.*, 2022; Denzer e Gardzelewski, 2011).

2.1 Estruturação da atividade

O projeto proposto aos estudantes fundamentou-se em uma situação real nas proximidades de São Carlos/SP.

Com base na restituição aerofotogramétrica de uma faixa territorial, os alunos foram desafiados a projetar uma ligação rodoviária entre a Estrada do Broa e a Rodovia Washington Luís. A cada grupo foi atribuída uma diretriz geral distinta, estabelecendo um ponto inicial A sobre a primeira via e um ponto final B sobre a segunda.

As atividades foram organizadas de forma a combinar a execução do projeto em meio analógico com a modelagem digital. Em um primeiro momento, os estudantes desenvolveram o anteprojeto da ligação rodoviária proposta em meio analógico, com a definição dos alinhamentos horizontal e vertical sobre a carta topográfica e sobre o papel milimetrado (ambos aproximadamente em tamanho A1), além do detalhamento de uma seção transversal e do desenvolvimento do projeto de terraplenagem. Tais etapas buscaram estimular o desenvolvimento de habilidades associadas à orientação espacial, à leitura de cartas planialtimétricas e às representações gráficas. Ressalta-se que foram utilizadas ferramentas auxiliares de cálculo durante o processo, como planilhas eletrônicas e calculadoras. De forma concreta, o projeto foi desenvolvido ao longo das dez etapas percorrendo o reconhecimento da área e recomendações gerais, passando pela definição do traçado e cálculo de curvas horizontais, representação do perfil do terreno, detalhamento do greide, detalhamento de uma seção transversal, cálculo de volumes com diagrama de Brückner e, por fim, definição da linha de distribuição mais econômica com estimativas de custo de movimentação de terra.

As dez etapas do projeto em papel foram divididas em oito aulas integralmente destinadas ao seu desenvolvimento, planejadas de forma paralela às aulas de teoria do conteúdo referente a cada etapa. Ademais, para cada etapa, foi disponibilizado um roteiro orientativo contendo as condições de contorno, parâmetros de contexto e a normatização aplicável. A partir desse referencial, os alunos tinham autonomia para definir os elementos do projeto que julgassem mais adequados às condições propostas. No início de cada uma dessas aulas, foram revisados os resultados das etapas desenvolvidas na aula de projeto anterior, o que proporcionou um momento de discussão dos produtos, realização de eventuais correções e reforço do aprendizado. Como etapa final do projeto, foi solicitada a entrega de um relatório técnico contendo a descrição das etapas desenvolvidas, das escolhas tomadas e dos resultados obtidos ao longo do semestre. Essa atividade constituiu o momento final de consolidação dos conceitos aplicados durante o desenvolvimento do projeto.

Paralelamente, foram conduzidas atividades utilizando o software Civil 3D (Autodesk), seguindo uma estrutura de etapas similar à adotada no projeto em papel. Essa abordagem permitiu a transição gradual entre métodos tradicionais e ferramentas digitais, mantendo a coerência dos procedimentos técnicos e facilitando a validação das escolhas tomadas nas etapas analógicas pelos docentes por meio de recursos automatizados do *software.* Por fim, também houve entrega final dos produtos digitais gerados pelo Civil 3D, complementando a análise dos resultados obtidos nas etapas analógicas do projeto.

A infraestrutura utilizada incluiu um espaço com mesas de 2,00 m x 0,70 m que favorecem o trabalho colaborativo, além de um laboratório de informática equipado para o uso do *software*. As turmas da disciplina contam com aproximadamente vinte alunos (variando conforme o semestre), o que facilita a divisão da atividade em grupos reduzidos (de dois ou três alunos) e acompanhamento mais próximo por parte dos docentes. Para o gerenciamento do conteúdo e a entrega das atividades, foi utilizado o ambiente virtual de aprendizagem *Google Classroom*, promovendo organização e interação entre docentes e discentes.

2.2 Questionário de avaliação

Com o objetivo de avaliar a eficácia da metodologia implementada, foi elaborado um questionário estruturado composto por questões de natureza quantitativa e qualitativa. Esse instrumento de coleta de dados foi cuidadosamente desenvolvido para abranger uma ampla gama de aspectos relacionados à experiência dos estudantes ao longo da disciplina, abrangendo desde a adaptação aos métodos analógicos e digitais até aspectos de autoavaliação atitudinal por parte dos participantes. As dimensões investigadas incluíram:

- Percepção quanto ao próprio o nível de engajamento com a disciplina durante as atividades:
  - Pergunta 1: "*Como você avaliaria seu nível de engajamento com a disciplina durante o desenvolvimento do projeto?"*
- Contribuição da integração entre métodos analógicos e digitais na consolidação dos conceitos:

  - Pergunta 2: "*Em que medida a integração entre o trabalho em papel e o uso do Civil 3D ajudou você a compreender os conceitos teóricos de projeto de estradas?*"
- Facilidade de uso e adaptação às ferramentas analógicas e tecnológicas empregadas:
  - Pergunta 3: "*Como você avaliaria a facilidade de uso das cartas em papel para a execução do projeto?*"
  - Pergunta 4: "*Como você avaliaria a facilidade de uso do Civil 3D?*"
- Contribuição específica da prática analógica no aprendizado das ferramentas do *software*:
  - Pergunta 5: "*De que forma o trabalho em papel contribuiu para facilitar a utilização do Civil 3D no projeto?*"
- Desenvolvimento de competências relacionadas ao trabalho em equipe.
  - Pergunta 6: "*De que forma o projeto contribuiu para o desenvolvimento das suas habilidades de trabalho em equipe?*"
- Estímulo à autonomia:
  - Pergunta 7: "*De que maneira o projeto favoreceu o desenvolvimento da sua autonomia no processo de aprendizagem?*"
- Grau de satisfação geral com a metodologia adotada:
  - Pergunta 8: "*Avalie sua satisfação geral com a metodologia aplicada no projeto (integração papel + Civil 3D)*"
- Sugestões e críticas construtivas para o aprimoramento futuro da abordagem.
  - Pergunta 9: "*Quais aspectos dessa atividade foram mais úteis ou valiosos na consolidação dos conceitos?*"
  - Pergunta 10: "*Quais sugestões você daria para a melhoria da metodologia?*"

As questões de natureza quantitativa foram estruturadas com base na Escala de Likert de cinco pontos, variando de "discordo totalmente" a "concordo totalmente", permitindo mensurar o posicionamento dos respondentes. Já as questões qualitativas possibilitaram a livre manifestação de percepções. A aplicação do questionário ocorreu ao final do primeiro semestre letivo de 2025 e compreendeu a participação voluntária e anônima de alunos desse semestre e do primeiro semestre de 2024, em que a metodologia foi aplicada em mesmo formato.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados quali e quantitativos obtidos por meio das respostas de nove estudantes. Do total de respondentes, oito cursaram a disciplina no ano de 2024 e um no ano de 2025. Considerando-se o reduzido número de participantes, não se procederá à comparação entre os anos, mas sim a uma análise conjunta das respostas obtidas. Os resultados do questionário, apresentados graficamente na Figura 1, indicam uma recepção amplamente positiva da metodologia adotada. Em relação ao engajamento, 67% dos estudantes relataram participação ativa na maior parte do tempo, sendo que 22% se declararam totalmente engajados, demonstrando dedicação além das demandas formais do projeto. Identifica-se que a proposta metodológica conseguiu mobilizar a maioria dos alunos em torno dos objetivos da disciplina.

A integração entre o desenvolvimento do projeto em papel e a modelagem digital no Civil 3D foi considerada satisfatória por 89% dos respondentes, dos quais 44% a identificaram como essencial para sua aprendizagem. Esse dado corrobora a hipótese de que a articulação entre meios analógicos e digitais contribui significativamente para a consolidação de conceitos teóricos por meio da prática. Em relação à manipulação das cartas topográficas em papel, 67% dos estudantes afirmaram ter executado as tarefas com segurança, o que indica familiaridade com representações planialtimétricas e habilidade para operar com instrumentos gráficos convencionais. Ainda assim, 22% apontaram desafios moderados, sugerindo que o desenvolvimento de competências de leitura cartográfica permanece como um ponto de atenção na formação. O uso específico do Civil 3D apresentou relativa maior dificuldade em relação ao meio analógico (44% dos respondentes relataram dificuldades), delineando outro ponto de atenção formativo.

A percepção sobre a contribuição do trabalho em papel foi majoritariamente positiva: 78% dos estudantes reconheceram que ele auxiliou bastante ou totalmente na organização e no entendimento das etapas realizadas no ambiente digital. Tal resultado aponta a persistente relevância dos meios tradicionais na estruturação cognitiva do projeto geométrico viário e reforça a eficácia da abordagem escalonada adotada, que propôs a progressão do analógico ao digital como estratégia de aprendizagem conceitual e técnica.



Figura 1: Resultados quantitativos do questionário

Outro destaque refere-se ao desenvolvimento de competências colaborativas. 77% dos participantes identificaram contribuição no desenvolvimento de habilidades colaborativas, materializadas na condução das tarefas, na troca de conhecimentos (seja entre integrantes do grupo ou entre diferentes grupos), na divisão de responsabilidades e no aprimoramento de habilidades interpessoais, alinhadas às exigências do exercício profissional em engenharia. No aspecto da autonomia, 67% dos estudantes afirmaram ter desenvolvido confiança para resolver dúvidas de forma independente ou com mínima orientação, evidenciando que a estrutura da atividade promoveu autogestão do processo formativo e o protagonismo dos discentes. Por fim, a satisfação geral com a metodologia foi alta: dois terços dos respondentes (67%) declararam-se satisfeitos ou muito satisfeitos com a experiência, valorizando a abordagem por projeto como eficaz e adequada aos objetivos de aprendizagem da disciplina.

As respostas abertas do questionário são apresentadas a seguir. Para o presente artigo, serão reportados apenas os trechos dos comentários pertinentes à metodologia, excluindo-se eventuais apreciações pessoais quanto aos professores e ao curso que não tenham relevância para o objetivo do trabalho. Ademais, uma vez que o foco está sobre o conteúdo e não sobre a forma das respostas, optou-se pelo uso de paráfrases e pela correção de erros linguísticos para garantir a clareza do texto. Quanto à pergunta 9 (aspectos positivos), tem-se as seguintes respostas:

- Foi “bom ter o [trabalho] em papel e [no] *software*” e recomendou a manutenção da metodologia
- “Fazer o trabalho em papel é melhor para o aprendizado”, em especial na execução dos cálculos. De forma complementar, “considerando como os projetos são desenvolvidos atualmente com BIM”, é “importante ter o [trabalho no] software também”.
- Outro aluno manifestou de ter gostado de trabalhar no papel e no Civil 3D.

A maior contribuição, contudo, está nas sugestões de melhorias elencadas pelos alunos como respostas à pergunta 10, como apresentado a seguir:

- Foram apontados problemas na marcação das coordenadas da carta em papel, que estavam com "algum errinho". Também apontou que seria necessário melhor o desenvolvimento da etapa final (projeto de terraplenagem).
- Outro estudante manifestou interesse no desenvolvimento de dois trabalhos separados, um no papel e outro no Civil 3D "desde a escolha do alinhamento".

Sobre o primeiro aspecto apontado, enfatiza-se que o "pequeno erro" apontado é, muito provavelmente, uma incorreta apreciação da rotação da malha de coordenadas da projeção Universal Transversa de Mercator em relação ao Norte Geodésico (ou Verdadeiro), conhecida como convergência meridiana. Esse apontamento pode indicar a necessidade de revisão de conceitos cartográficos para a adequada interpolação das coordenadas dos PI. Em relação ao desenvolvimento da etapa final, também apontado como aspecto a ser melhorado, acredita-se que a inclusão de sessão de encerramento do projeto poderia contribuir significativamente para o acompanhamento dos produtos dessa etapa. Para as etapas anteriores, houve verificação de resultados na aula de projeto seguinte e isso permitiu a correção de erros e a consolidação de conceitos. Assim, uma sessão final que proporcionasse espaço para a discussão dos resultados dessa etapa final cumpriria o papel de consolidar o aprendizado referente a projetos de terraplenagem e possibilitar ajustes finais.

Por fim, a manifestação do outro estudante alerta para a necessidade de melhor apresentação da proposta junto aos alunos. Optou-se por desenvolver o mesmo projeto tanto no papel quanto no software, considerando a importância de uma abordagem integrada. O trabalho manual favorece a compreensão dos fundamentos e da lógica do traçado, enquanto o uso do Civil 3D oferece precisão e agilidade na modelagem. A adoção de diferentes traçados em contextos distintos poderia comprometer essa integração, dificultando a comparação entre os métodos e enfraquecendo a análise crítica dos resultados. Trabalhar sobre o mesmo projeto permite ao estudante perceber com mais clareza as vantagens, limitações e correspondências entre o processo analógico e o digital, favorecendo um aprendizado mais consistente e articulado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do questionário estruturado evidenciam avanços no engajamento estudantil, na aplicação prática dos conceitos e no desenvolvimento de competências técnicas e atitudinais essenciais. Como futuro aprimoramento, propõe-se a antecipação da entrega dos projetos para a implementação de uma sessão de avaliação comparativa entre os projetos. Essa comparação se daria considerando indicadores técnicos (como consistência geométrica e conformidade normativa), econômicos (estimativas de custo relacionadas aos movimentos de terra) e ambientais (impactos durante a implantação e na operação da via), intersectando discussões de viabilidade técnico-financeira e sustentabilidade fundamentais na formação em Engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bender, W. N. (2014) Aprendizagem Baseada em Projetos: Educação Diferenciada para o Século XXI. Porto Alegre: Penso.

Bernhard, J.; Ryberg, T.; Davidsen, J. G. (2022). Is "digital education" the right way forward? – Or is, maybe, postdigital education what is needed! SEFI 2022 – 50th Annual Conference of the European Society for Engineering Education, Proceedings, p. 110–121. European Society for Engineering Education.

BRASIL (2018) Decreto nº 9.377, de 17 de maio de 2018. Institui a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling. Diário Oficial da União, Seção 1, Brasília, 18 maio 2018, p. 3.

Denzer, A.; Gardzelewski, J. (2011). Drawing and modeling: analog tools in the age of BIM. AEI 2011: Building integrated solutions – Proceedings of the AEI 2011 Conference, p. 44–53.

Hansen, B.; Lehn, D. N.; Eckhardt, R. R. (2021). Metodologias ativas no ensino de engenharia: ênfase na utilização de mapas conceituais na aprendizagem significativa. Revista de Ensino de Engenharia, v. 40, n. 1, p. 15–27.

Masson, T.; Figueiredo de Miranda, L.; Hortêncio, A.; Porto, A. M. (2012). Metodologia de ensino: aprendizagem baseada em projetos (PBL). XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Belém.

Rafael Henrique de Oliveira (rafaelho@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia
Rua Paschoal Marmo, 1888 - Jd. Nova Itália, Limeira - SP, CEP: 13484-332

MICROLEARNING COMO ESTRATÉGIA DE ENSINO-APRENDIZAGEM NA FORMAÇÃO DE ALUNOS DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Adriano Jorge Sombra Júnior, Suelly Helena de Araújo Barroso, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)/Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

RESUMO
O acesso fácil às tecnologias modificou o perfil dos estudantes, especialmente aqueles nascidos a partir dos anos 1990, caracterizados como nativos digitais. Esses indivíduos demonstram preferência por métodos de ensino dinâmicos, com menor tolerância às aulas tradicionais. No contexto do ensino superior, especialmente em cursos de engenharia, a carência de formação pedagógica específica dos docentes contribui para manutenção de práticas centradas no professor. Assim, torna-se necessário adotar metodologias que favoreçam o protagonismo discente, como o *microlearning*, que organiza o conteúdo em blocos curtos e objetivos, promovendo maior retenção do conhecimento. Este trabalho teve por objetivo caracterizar a aplicação de minitestes semanais como estratégia de *microlearning* em disciplina ministrada para alunos do curso de graduação em Engenharia Civil, estimulando a assiduidade, a responsabilidade contínua e a consolidação dos conteúdos ministrados em sala de aula. No decorrer do semestre a metodologia mostrou-se positiva, impactando no processo ativo de ensino-aprendizado.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desenvolvimento do meio digital interferiu no perfil dos estudantes, principalmente para as pessoas nascidas a partir dos anos 1990, para as quais o contato com as tecnologias de comunicação ocorreu desde a infância (Guerin *et al*., 2018). Nesse contexto, os jovens atuais podem obter acesso à informação de formas rápidas e nas mais diversas plataformas. Com a popularização das inteligências artificiais, a busca por conhecimentos vem sofrendo cada vez mais transformações, estimando-se que para as novas gerações, aulas expositivas de duração maiores que 30 minutos se tornam cada vez mais difíceis de serem assimiladas (Cruz *et al.,* 2022).

A falta de disciplinas e treinamentos voltados ao ensino nos bacharelados de algumas áreas, como as engenharias, dificulta certos processos de ensino-aprendizagem, pois na utilização do ensino tradicional, o professor tem sua atividade muitas vezes limitada a uma repetição de aulas. Tal ocorrência perdura também nos cursos de pós-graduação, para os quais não são ofertados aos seus alunos o foco em práticas pedagógicas (Bardini e Spalding, 2017). Dessa forma, o modelo tradicional é marcado pela definição de papéis no processo de aprendizagem no qual o professor mostra-se o detentor principal de todo conhecimento e acesso a ele. Enquanto isso, o aluno desenvolve a total dependência e submissão aos ensinamentos do professor (Silva e Cecílio, 2007) que tem tendência de ensinar da mesma forma como aprendeu.

A partir dessa perspectiva, é recomendável que o docente estabeleça estratégias de ensino-aprendizagem que o conecte com seus alunos de forma a perceber suas fortalezas, fragilidades, desafios e interesses. Esse desafio pode ser atingido ao se estudar e aplicar diferentes metodologias que aliadas ao ensino tradicional, tornem o processo de aprendizagem acessível com o objetivo de atingir o perfil de estudantes das gerações atuais (Barreiro e Bozutti, 2017). Os chamados nativos digitais buscam dentro do seu processo de aprendizagem um protagonismo, que pode ser atingido com a aplicação de certas metodologias ativas que se pautem mais no desenvolvimento de competências do que na simples transmissão de conhecimento (Cunha *et al*., 2025).

A motivação do conhecimento tem impacto no desempenho dos estudantes, aumentando o engajamento nas atividades de aprendizagem e, com isso, influenciando seus desenvolvimento e independência. Trabalhar o ensino com os interesses do aluno faz com que ele participe ativamente do seu aprendizado, contribuindo com o alcance dos seus objetivos (Di Serio *et al*., 2013). Os estudantes tendem a aprender o que é cobrado pelo professor, logo, avaliações são ferramentas fundamentais para o desenvolvimento e incentivo à aprendizagem (Svinicki, 1999). É importante examinar como está sendo a assimilação de tais avaliações pelos estudantes. Com isso, a aplicação de pequenos testes semanais pode ser uma estratégia produtiva de incentivo aos estudantes para se preparar para tais exames e assim absorver melhor o conteúdo transmitido em sala de aula.

O *microlearning* é uma técnica de aprendizado que se adequa a esse cenário. Essa metodologia busca a facilitação do aprendizado por meio da repartição dos conteúdos em pequenos blocos, dividindo os assuntos e enfatizando pequenas partes da informação de cada vez, resultando em um aprendizado mais objetivo e focado.

O modelo pode se tornar uma opção para aplicação nos contextos imediatistas dos atuais alunos (Antonio e Soares, 2024).

O *microlearning* apresenta um conjunto de padrões estruturantes que definem sua aplicação e organização (Hug, 2005). Esses padrões são: (i) tempo: as atividades são planejadas para ocorrer em períodos curtos e com esforço cognitivo reduzido, o que facilita sua integração à rotina diária dos estudantes; (ii) conteúdo: os temas são abordados de forma simples e segmentada, permitindo a apresentação de informações em unidades autossuficientes e facilmente assimiláveis; (iii) currículo: os módulos são concebidos como partes integrantes de uma estrutura curricular mais ampla, funcionando como componentes complementares ao processo formativo; (iv) formato: os conteúdos são disponibilizados em dosagens de conhecimento, com organização fragmentada e foco na objetividade; (v) processo: as atividades são autônomas, mas compõem etapas articuladas de aprendizagem, em que cada unidade contribui para a construção do conhecimento como um todo. Sendo assim, acredita-se que o *microlearning* se adapte às necessidades contemporâneas de aprendizagem da geração digital, especialmente em contextos que demandam flexibilidade e personalização.

Com base no apresentado, este trabalho tem o objetivo de caracterizar a adoção da metodologia de *microlearning* como estratégia de incentivo à frequência, engajamento e retenção de conhecimentos aplicada ao curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC). Para tanto, foram elaborados minitestes semanais de curta duração de modo a consolidar os conhecimentos transmitidos nas aulas da disciplina de Projeto e Construção da Superestrutura Viária (PCSV) para promover a melhor retenção, assiduidade e responsabilidade contínua do aluno com o conteúdo ministrado.

2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE *MICROLEARNING*

A disciplina de Projeto e Construção da Superestrutura Viária é uma disciplina obrigatória que ocorre no 7º semestre do curso de Engenharia Civil da UFC. No Semestre 2025/1 foram ofertadas três turmas, onde a metodologia foi aplicada em duas delas, ambas ocorrendo na quarta-feira com duração de 3h/aula. A disciplina de PCSV aborda conteúdos relativos ao processo de projeto, construção e gerência de pavimentos, destacando os seguintes conteúdos: (i) conceituação de pavimentos; (ii) ensaios de laboratório aplicados à pavimentação; (iii) estudos geotécnicos; (iv) camadas granulares; (v) imprimação betuminosa; (vi) agregados e ligantes asfálticos; (vii) estudos de revestimentos; (viii) análise dos estudos de tráfego; (ix) dimensionamento de pavimentos e (x) gerência de pavimentos. Para o caso das turmas 02 e 03, dividiu-se a disciplina em duas partes, na qual a primeira abrange os cinco primeiros conteúdos e a segunda parte comporta os demais, sendo que cada uma dessas partes foi ministrada por um professor diferente.

Para o cálculo da nota de PCSV, foram aplicadas duas avaliações progressivas (AP1 e AP2), além de nove minitestes (MT). A nota de avaliação progressiva (NAP) foi calculada conforme a Expressão 1. Os alunos com notas de AP igual ou superior a 7,0 estarão aprovados por média e os com nota inferior a 4,0 estarão reprovados. Os alunos com nota igual ou superior a 4,0 e inferior a 7,0 serão submetidos à recuperação, na qual se aplicará uma avaliação para a composição da nota de recuperação (NR). Da média entre a nota de avaliação progressiva (NAP) e a nota de recuperação (NR) resultará a média final de avaliação (MF). O aluno que for submetido à recuperação estará aprovado se obtiver MF igual ou superior a 5,0, caso contrário estará reprovado.

$$NAP = (AP1+AP2) / 2 + 0{,}1 \times MT \quad (1)$$

A aplicação da metodologia de *microlearning* foi baseada na execução de minitestes semanais com o objetivo de fomentar a frequência, assiduidade e sedimentação dos conhecimentos da disciplina. Essa ação ocorreu seguindo as etapas mostradas na Figura 1. Por meio de um calendário bem definido e organizado, as aulas expositivas eram ministradas pelos dois professores responsáveis pela disciplina. A partir da temática abordada na semana, uma equipe de monitores formada por alunos de mestrado e doutorado, matriculados na atividade de estágio à docência, era responsável por elaborar questões referentes à temática, sob supervisão dos docentes responsáveis. Essas questões compuseram um banco de questões acerca do assunto de cada aula com níveis de dificuldade variando entre fácil, médio e difícil. As questões fáceis eram aplicadas para os minitestes semanais e as demais questões eram reservadas para aplicação nos demais testes da disciplina (AP1, AP2 e AF). Ao fim da disciplina, o banco de questões acumulou um montante de 270 questões.

Os minitestes elaborados eram compostos por cerca de 5 questões curtas de nível fácil, variando entre questões

de múltipla escolha, relação de duas colunas, definições, assertivas verdadeiro ou falso, bem como questões de cálculo simples e direto. O conteúdo dos minitestes sempre contemplava de forma assertiva a temática abordada na aula anterior e essas aulas também estavam gravadas em uma plataforma de fácil acesso. Para garantir a assiduidade do aluno e o empenho no estudo semanal do assunto abordado da aula anterior, os minitestes tiveram duração de, no máximo, 15 minutos e eram aplicados nos minutos iniciais das aulas com o objetivo de incentivar a pontualidade dos alunos às 7h e 10h, para o caso das turmas 02 e 03, respectivamente.



Figura 1: Fluxograma da criação e aplicação dos minitestes

A forma de incentivo ao estudo e participação nos minitestes ocorreu por meio de uma bonificação ao fim da disciplina. Ao todo, foram realizados 9 minitestes, cada um com uma temática referente a um conteúdo do programa da disciplina. Os minitestes eram corrigidos e avaliados com notas de 0 a 10 podendo resultar em até 1,0 ponto na média das APs (ver Expressão 1). Tal bonificação foi importante para o engajamento dos estudantes na disciplina e a manutenção de sua assiduidade, pois ao chegar atrasado, o aluno perderia a oportunidade de receber a parcela do ponto referente ao teste em questão.

Conforme comentado anteriormente, a disciplina de PCSV foi dividida em 2 blocos de conteúdos, nos quais no primeiro, concentraram-se 5 minitestes e no segundo, 4 minitestes. Antes da AP1 de cada bloco, os minitestes eram corrigidos em sala com o objetivo de retirada de dúvidas, bem como uma aula de resolução de exercícios era ministrada de forma remota pelos monitores, garantindo que todos os temas fossem revisitados e abordados.

Ao fim da aplicação dos minitestes, foi realizado o estudo da abordagem baseada em *microlearning* a partir da elaboração de um questionário referente ao nível de engajamento e satisfação acerca da metodologia e para a obtenção de um *feedback* do método e das possíveis melhorias acerca da técnica pelos alunos. As análises de parâmetros como níveis de aprovação e médias finais dos alunos não puderam ser considerados devido ao período de submissão deste trabalho ocorrer anterior ao encerramento da disciplina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao fim da disciplina, as turmas submetidas à aplicação dos minitestes apresentaram média de faltas por aula inferior a 10%. Constatou-se que o período com maior taxa de ausências ocorreu antes do início da aplicação dos minitestes, que somente iniciou na terceira semana do semestre, seguido por uma tendência de redução logo em seguida. As faltas voltaram a aumentar apenas no final do semestre, período em que muitos alunos deixam de comparecer às aulas por acreditarem que já garantiram a quase aprovação, ou já estarem reprovados ou então por já atingirem a frequência mínima (75%) necessária para o semestre.

Para analisar a aceitação da metodologia *microlearning* pelos alunos, foi aplicado um questionário de satisfação respondido por 24 alunos, no qual as quatro primeiras perguntas tratam da influência da metodologia na assiduidade e influência nos estudos (Figura 2). A partir da Figura 2(a), pode-se perceber que 54% dos alunos sempre compareceram as aulas e 42% frequentemente iam as aulas nas quais os minitestes eram aplicados. Ao se associar à Figura 2(c), que diz respeito à influência positiva dos minitestes na frequência das aulas, 91% dos alunos afirmaram que os minitestes influenciaram de alguma forma em seu comparecimento às aulas. Essa assiduidade certamente foi estimulada pela bonificação extra ofertada pelos minitestes, pois a motivação para o estudo do conteúdo e o comparecimento à aula no horário (7h para turma 2 e 10h para a turma 3) era uma forma real de compensar a responsabilidade do aluno com a disciplina.

Acerca da influência dos minitestes no estudo e aprendizagem, as Figuras 2(b) e 2(d) mostram que, 83% dos alunos responderam que a aplicação dos minitestes apresentou efeito positivo em seu aprendizado, na qual

33% dos discentes acreditam que a contribuição foi muito significativa. Cerca de 46% desses estudantes motivaram-se para estudar os conteúdos da aula para atingir os resultados satisfatórios nos minitestes. Tais resultados evidenciam a ferramenta de *microlearning* como uma motivação adicional para a manutenção do calendário de estudos, que, por muitas vezes, durante os cursos de engenharia são negligenciados devida a quantidade elevada de carga horária semestral.

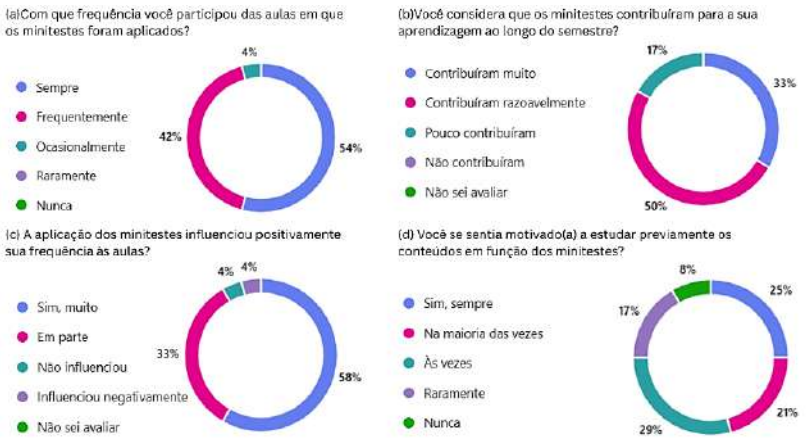


Figura 2: Influência dos minitestes na frequência e motivação dos alunos.

Dando continuidade à análise, a Figura 3(a) mostra que os alunos perceberam que os minitestes possuíam em sua estrutura, conteúdos que realmente se alinhavam com aquele ministrado em sala de aula. O formato dos testes (Figura 3b) obteve 51% de aprovação, pois a quantidade de questões, o formato simples e a duração do teste foram pensados para se enquadrar em cerca de 10% do período da aula. O formato rápido e direto garantia a presença inicial e o dinamismo das aulas que se dividiam em mais partes que apenas o formato tradicional como tentativa de adequação ao perfil atual de estudantes da geração mais digital.

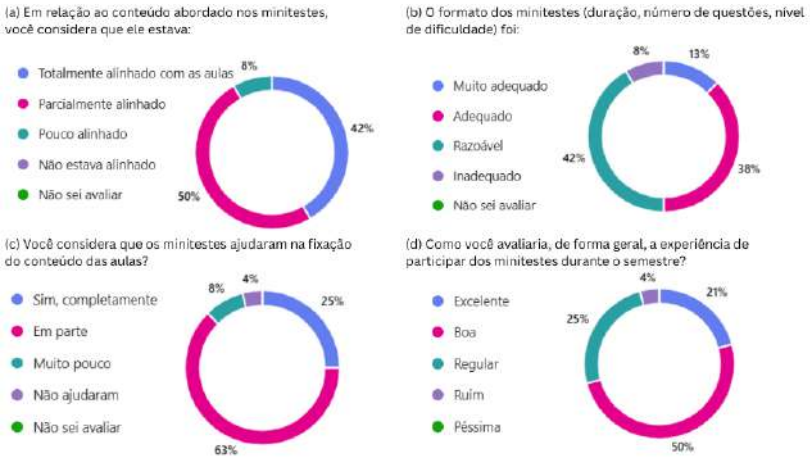


Figura 3: Avaliação do método de *microlearning* e experiência de participação.

Ainda com relação a Figura 3, 71% dos estudantes (Figura 3d) avaliaram a metodologia como boa ou excelente e 4% a definiu como uma experiência ruim. Cada estudante apresenta em si um estilo de aprendizagem, sendo natural que, no processo de qualquer metodologia de ensino, não haja a identificação integral dos alunos com o método. Isso mostra que a combinação de diferentes metodologias de ensino é a mais adequada forma de atingir os diferentes estilos de aprendizagem dos discentes. Além disso, 88% dos alunos questionados (Figura 3c) sentiram influência da abordagem de *microlearning* em seu aprendizado. O fomento à responsabilidade e à assiduidade, mesmo que desconfortável inicialmente, gera no aluno um protagonismo acerca de seu aprendizado, pois ele será mais responsável pelo seu desempenho e atingimento do seu objetivo de receber o ponto extra. Foi perceptível no decorrer do período letivo as salas cheias desde o início da aula e o empenho de alguns alunos para ter resultados favoráveis.

A maioria dos alunos que opinaram sobre os pontos fortes da aplicação dos minitestes ressaltaram que eles ajudaram a manter uma rotina de estudos, revisando de forma recorrente os assuntos abordados em sala de aula, o que contribuiu para a fixação da matéria e por consequência a sua preparação para as avaliações progressivas AP1 e AP2. Como pontos negativos e sugestões de melhoria, a maioria dos estudantes reclamou do horário do miniteste, sugerindo que ele fosse feito no meio ou fim da aula, bem como a solicitação do pareamento do nível com as questões mais complexas aplicadas nas avaliações progressivas. Entretanto, os minitestes foram estrategicamente aplicados no início das aulas como uma ferramenta para estimular a assiduidade dos alunos e garantir o cumprimento da carga horária da disciplina. As questões, mais simples do que as das avaliações formais, foram adaptadas ao perfil dos estudantes e aos objetivos da metodologia, que prevê a apresentação de conteúdos em pequenas partes, de forma clara, objetiva e de fácil assimilação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados obtidos ao longo do semestre, tanto a partir da frequência dos alunos quanto do questionário de satisfação, indica que a aplicação dos minitestes semanais foi uma estratégia positiva no contexto da disciplina de Projeto e Construção da Superestrutura Viária. Observou-se através das experiencias anteriores dos docentes, uma tendência de maior assiduidade nas turmas que participaram da metodologia de *microlearning*.

A caracterização realizada neste estudo mostrou que a quase totalidade dos alunos reconheceram os minitestes como fator de incentivo à frequência e engajamento, bem como contribuição no processo de ensino-aprendizagem e na fixação do conteúdo. Além disso, a formação de um banco de questões ao fim do período representa a criação de estratégias positivas a serem incorporadas as turmas futuras, promovendo a melhoria e facilitação da prática docente por parte dos estagiários de docência. Assim, a metodologia de *microlearnig* demonstrada neste estudo, por meio dos minitestes mostraram-se efetivos não apenas como ferramenta avaliativa, mas também como elemento estruturante de uma rotina de estudos mais ativa.

Agradecimentos
Os autores agradecem à FUNCAP pela bolsa concedida ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antonio, e Soares, J. (2024). Relato de experiência com técnicas de microlearning no ensino de Lógica de Programação. Anais Da XXIV Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas E Sergipe , 393–400. https://doi.org/10.5753/erbase.2024.4459

Bardini, V. S. dos S., e Spalding, M. (2017). Aplicação De Metodologias Ativas De Ensino-Aprendizagem: Experiência Na Área De Engenharia. Revista de Ensino de Engenharia, 36(1). https://doi.org/10.5935/2236-0158.20170005

Barreiro, S. C. e Bozutti, D. F. (2017). Challenges and Difficulties to Teaching Engineering to Generation Z: a case research. Propósitos Y Representaciones, 5(2). https://doi.org/10.20511/pyr2017.v5n2.163

Cruz, E. P. F., et al. (2022). Microlearning como uma nova abordagem tecno-pedagógica: uma revisão. Research, Society and Development, 11(6), e47611629548. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29548

Cunha, M. R. H. et al. (2025). Integração Da Gamificação E Tecnologias Digitais No Processo De Ensino E Aprendizagem Em Ciencias: Promovendo O Engajamento Da Geração Z Em UMA ESCOLA PÚBLICA. Aracê., 7(1), 139–169. https://doi.org/10.56238/arev7n1-009

Di Serio et al. (2013). Impact of an augmented reality system on students' motivation for a visual art course. Computers & Education, 68, 586–596. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.03.002

Guerin, C. S. et al. (2018). Geração z: a influência da tecnologia nos hábitos e características de adolescentes. Revista Valore, 3, 726–734. https://doi.org/10.22408/reva302018187726-734

Hug, T. (2005). Micro Learning and Narration Exploring possibilities of utilization of narrations and storytelling for the designing of "micro units" and didactical micro-learning arrangements. Fourth Media in Transition conference, USA.

Silva, L. P., & Cecílio, S. (2007). A mudança no modelo de ensino e de formação na engenharia. Educação Em Revista, 45, 61–80. https://doi.org/10.1590/s0102-46982007000100004

Svinicki, M. D. (1999). New Directions in Learning and Motivation. New Directions for Teaching and Learning, 1999(80), 5–27. https://doi.org/10.1002/tl.8001

[1]Adriano Jorge Sombra Júnior (adriano.sombra.jr@det.ufc.br)
[2]Suelly Helena de Araújo Barroso (suelly@det.ufc.br)
[3]Francisco Heber Lacerda de Oliveira (heber@det.ufc.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703. 60.455-760 – Fortaleza, CE

MODELO DE SALA DE AULA INVERTIDA NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS

Marcelo de Castro Takeda, Diego de Oliveira Martins
Universidade Federal de São Carlos

RESUMO
O texto apresenta uma análise detalhada da implementação da metodologia de Sala de Aula Invertida (SAI) na disciplina de Projeto Geométrico de Rodovias (PGR) do curso de Engenharia Civil na UFSCar. Ele discute a estrutura da disciplina com pré-aula, aula e pós-aula, utilizando o ambiente virtual *Moodle* para disponibilizar materiais e atividades. Além disso, explora o uso de Inteligência Artificial (IA) para auxiliar os docentes na preparação de materiais e avaliações. O artigo também relata os desafios e benefícios dessa abordagem para o desenvolvimento de competências dos estudantes, destacando a necessidade de dedicação e capacitação docente.

1 INTRODUÇÃO

A educação tradicional, centrada no docente, vem sendo desafiada por novas abordagens que visam tornar o aprendizado mais dinâmico e centrado no estudante. Metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) e a Sala de Aula Invertida (SAI), ganham cada vez mais espaço no desenvolvimento de competências dos futuros engenheiros civis.

A popularização das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) têm promovido mudanças no método tradicional de ensino. Um efeito acelerador ocorreu durante o período de pandemia em que os docentes e discentes foram forçosamente inseridos no ensino remoto, sendo que ambos tiveram que se adaptar e aprender novas tecnologias. Isso pode ser observado com a popularização dos Ambientes Virtuais de Aprendizagem (AVA), por exemplo o *Moodle* e o *Classroom*, com os encontros virtuais e aulas síncronas sendo realizados com ferramentas de comunicação *online*, por exemplo o *Meet* e o *Teams*, e os encontros assíncronos com uso de videoaulas, ferramentas de gravação e edição de vídeos.

Contudo, essa mudança, mesmo que iniciada por uma questão de saúde pública, demanda tempo para criação, implementação e atualização. A curva de aprendizado para todos esses recursos é lenta e, geralmente, o docente acaba sendo o único responsável pelo desenvolvimento de todas as etapas do processo. Assim, este necessita de um conhecimento adequado do ambiente virtual de aprendizagem para utilizar bem e da melhor forma os recursos disponíveis. Este conhecimento é necessário também para as ferramentas de comunicação síncrona e assíncrona. O apoio institucional dificilmente tem capacidade de atender a todos. Ademais, recentemente surgem as inteligências artificiais, vistas hoje como um risco à aprendizagem, pois podem ser usadas indiscriminadamente e sem critérios para a resolução de exercícios, provas, relatórios e qualquer outra atividade de avaliação. Entretanto, há um aspecto que não pode ser negligenciado, os docentes também podem usufruir deste avanço tecnológico, ou seja, podem incluir no seu planejamento e preparação o uso da Inteligência Artificial (IA). Assim, os docentes podem no seu trabalho usar de forma criteriosa ferramentas de IA, na medida em que são os responsáveis pelo desenvolvimento e manutenção de todas as etapas envolvidas no processo de ensino e aprendizagem

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é descrever o uso de uma metodologia ativa, a sala de aula invertida, na disciplina de Projeto Geométrico de Rodovias (PGR) do Curso de Engenharia Civil da UFSCar, do ponto de vista docente, e o uso do AVA *Moodle* e de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) como apoio à execução e preparação docente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cenário educacional contemporâneo tem exigido uma profunda transformação nos processos de ensino-aprendizagem, especialmente em cursos de alta complexidade técnica como a Engenharia Civil. Nesse contexto, segundo Bacich e Moran (2017), as metodologias ativas surgem como estratégias centrais para promover o desenvolvimento de competências essenciais, tais como pensamento crítico, resolução de problemas e trabalho colaborativo. No entanto, a implementação dessas metodologias requer um planejamento docente robusto e contínuo, o que representa um desafio adicional, dada a carga de trabalho e a multiplicidade de responsabilidades dos docentes.

Apesar de não ser necessário para aplicação de metodologias ativas, o ambiente virtual de aprendizagem *Moodle* tem se consolidado como uma ferramenta de apoio ao ensino superior, destacando-se por sua flexibilidade, variedade de recursos e potencial para promover o engajamento dos estudantes. Pesquisas mostram que o *Moodle* é amplamente utilizado em universidades, especialmente em áreas de *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM), melhorando o desempenho, a satisfação e a motivação dos alunos por meio de recursos como fóruns, *quizzes*, tarefas, *wikis*, glossários, e ferramentas de monitoramento de progresso, além de possibilitar tanto atividades síncronas quanto assíncronas. E ainda, a plataforma permite a criação de ambientes colaborativos, adaptativos e interativos, favorecendo a aprendizagem ativa e o desenvolvimento da autonomia estudantil (Gamage; Ayres; Behrend, 2022; Kerimbayev et al., 2020; Li; Xu, 2023).

A SAI tem por objetivo tirar o foco do ensino, aquele centrado no docente e afeito ao método tradicional, e trazer para a aprendizagem, aquele centrado no discente, e relacionado aos métodos ativos. É importante destacar que isso representa uma quebra de paradigmas, uma mudança cultural e lenta. O método pressupõe que os alunos reconheçam seu papel como agentes do próprio aprendizado, buscando estudar previamente o assunto a ser tratado na aula. Usualmente, os recursos de estudos devem ser fornecidos pelo professor, seja na forma de videoaulas, livros, textos, artigos ou outras formas para compreensão e realização das atividades a serem desenvolvidas em sala de aula (Bergmann; Sams, 2012; Elmôr et al., 2019; Mazur; Brown; Jacobsen, 2015; Souza, 2024). Mas deve também ficar claro que, como agente do próprio aprendizado, o aluno deve ter a liberdade de escolher outras fontes mais adequadas ao seu próprio estilo de aprendizagem. É inegável que a internet seja terreno fértil para conteúdo, cabendo ao discente selecionar os melhores conteúdos, e atualmente, uma conversa com uma IA pode ser vista como uma ferramenta de conteúdo e estudo. É importante que os alunos saibam discernir sobre os conteúdos. As próprias ferramentas avisam ao final dos *prompts* que podem errar e as respostas devem ser verificadas duplamente.

A SAI é composta basicamente por três etapas: a pré-aula, a aula e a pós-aula. Na etapa de pré-aula, os alunos cientes de suas responsabilidades de aprendizagem, realizam a preparação prévia com os materiais disponibilizados pelo docente, ou aqueles de consulta própria. Na etapa de aula, os alunos são submetidos a atividades que reforcem e aprofundem os conteúdos estudados. Na etapa pós-aula, aos alunos cabe a revisão dos assuntos abordados como forma de transformar as informações em conhecimento a partir de atividades propostas.

Estudos de meta-análise compararam a sala de aula invertida e o ensino tradicional e mostraram um efeito global significativo em favor da sala de aula invertida sobre as salas tradicionais. Estes trabalhos focaram em estudos onde a pré-aula era realizada com vídeos gravados disponibilizados aos alunos antes da aula. Os autores destacam que a sala de aula invertida foi mais efetiva quando os instrutores utilizavam questionários de múltipla escolha no início da aula e uma breve revisão também no início da aula (Hew e Lo, 2018; Lo e Hew, 2019).

O emprego de qualquer metodologia ativa de aprendizagem necessita da dedicação e fluência nas diversas etapas de aplicação de tais metodologias, inclusive tecnológicas, o que impõe aos docentes a necessidade de uma transformação digital para alcançar os novos requisitos, que até então não faziam parte do repertório tradicional para formação docente (Ng et al., 2023).

4 RELATO DE EXPERIÊNCIA: UMA ABORDAGEM METODOLÓGICA

O método utilizado neste artigo é a descrição da experiência de docentes no desenvolvimento dos trabalhos realizados ao longo dos últimos dez anos, no planejamento e processo para implementação da metodologia ativa SAI, no desenvolvimento de competências dos estudantes do curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

5 DESCRIÇÃO DO MODELO DE SAI: DA CONSTRUÇÃO À IMPLANTAÇÃO

Conforme e experiência dos docentes, a proposta de uso de metodologias ativas faz parte de um processo de transformação constante. Essa ação requer do docente dedicação e tempo para conhecimento, aprofundamento e capacitação na diversidade de possibilidades das metodologias e suas aplicações, de forma a selecionar

estratégias que se adequem ao seu próprio estilo de ensino e aprendizagem, as competências que se deseja desenvolver nos estudantes e aos recursos disponíveis para sua realização. A realidade tem mostrado, na experiência dos autores, que os docentes ao decidirem optar pela aplicação de metodologias ativas, quais sejam, são os responsáveis únicos pela preparação dos conteúdos e adaptação dos espaços, quando estes não existem.

5.1 Estrutura da disciplina PGR no modelo SAI

Atualmente, 1º período de 2025, a disciplina PGR está sendo realizada no modelo de SAI, conforme mostrado na Figura 1.

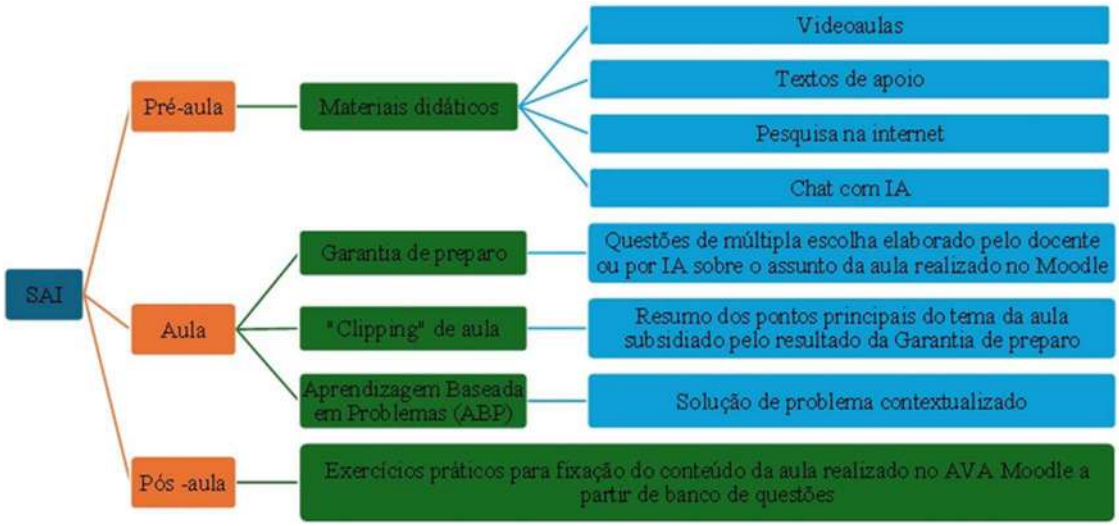


Figura 1: Estrutura do curso PGR com o uso de SAI

O curso planejado conta com as etapas de pré-aula, aula e pós-aula que representam o recomendado para a aplicação da SAI. Na etapa de pré-aula os alunos têm recursos disponibilizados no AVA *Moodle*, que são videoaulas e texto de apoio que são os próprios slides de apresentação. Os vídeos são disponibilizados previamente e contém a parte teórica que os alunos devem assistir antes da aula e exercícios propostos resolvidos que são recomendados. Neste caso recomenda-se que os alunos tentem resolver sozinhos os exercícios e utilizem as aulas gravadas como gabarito da solução caso surjam dúvidas. Ainda, é possível que os alunos acessem livros na biblioteca, textos *online* ou *chats* com IA para a preparação prévia. Entretanto, o ambiente da disciplina oferece todos os recursos necessários e suficientes para essa preparação prévia. No item 5.2 apresenta-se a estrutura básica da sala virtual.

Na etapa de aula os alunos se submetem inicialmente ao que se denomina Garantia de Preparo (GP) e é constituída por questões de múltipla escolha sobre o tema da aula e realizada no ambiente *Moodle* com ferramenta questionário. Dessa forma, o resultado da avaliação é imediato e o docente consegue avaliar a preparação prévia dos discentes pelo resultado. Inclusive, o relatório da GP permite identificar que questões produziram maior dificuldade e garantir que o docente trate destes conteúdos pontualmente. Na sequência realiza-se a apresentação de uma aula resumida, aqui chamado "*Clipping*" de aula por se abordar os pontos principais dos assuntos e com foco nos pontos fracos identificados na GP. Caso necessário, a GP pode ser realizada novamente após o resumo para uma nova verificação da preparação. Em seguida, os alunos são sorteados e divididos em grupos de no máximo 5 alunos. A cada atividade os alunos são novamente sorteados e têm a oportunidade de trabalhar com diferentes pessoas e perfis de alunos, auxiliando no desenvolvimento da competência "Colaborar". Após o sorteio, apresenta-se aos alunos um caso prático de engenharia para resolver, o que configura o uso de ABP embutida na SAI. Entretanto, como há preparação prévia e discussão dos assuntos, as soluções tendem a ser uniformes nos métodos, mas permite que como engenheiros, tomem decisões de projeto.

Na etapa pós-aula os alunos são responsáveis pela revisão e transformação do conhecimento. Já dentro do conceito da organização do AVA *Moodle*, os alunos são avaliados formativamente com questionários complementares, usualmente numéricos e desenvolvidos em questões do tipo *cloze*, que permitem a solução

de problemas complexos e a verificação de todas as etapas de cálculo.

5.2 Sala de aula virtual de PGR no ambiente *Moodle*

A sala virtual é dividida em abas que correspondem às diferentes etapas do curso, como mostra a Figura 2. As guias se dividem em "início", "elementos básicos de projeto", "curvas horizontais circulares simples", "curvas horizontais com transição", "superelevação, superlargura e seção transversal", "curvas verticais", "terraplenagem", "projeto de engenharia" e "atividades somativas". O conteúdo da disciplina está dividido em seis abas (da segunda à sétima). Dentre estas, cada aba contém seções de materiais de estudo, que estão divididas em videoaulas e material de leitura, e atividades, que são separadas em garantia de preparo (pré-aula) e atividade formativa (aula e pós-aula).



Figura 2: Estrutura da sala virtual de PGR no ambiente *Moodle*

A Tabela 1 apresenta a estrutura utilizada em todas as abas de conteúdo.

Tabela 1: Estrutura das abas de conteúdo

	Estrutura das abas		
Nome da aba	Material de Estudo	Material de Estudo	São disponibilizados vídeos com teoria (obrigatórios) e exercícios resolvidos (sugestão)
		Material de Leitura	São disponibilizados textos e sugestões de materiais para estudo
	Atividades	Garantia de Preparo	Questionário de múltipla escolha para primeira etapa da aula
		Atividade Formativa	Problema real ou simulado de engenharia, por meio de ABP. Atividade em grupo realizada na terceira parte da aula
		Atividade Formativa	Questionário aleatório com questões do tipo *cloze* sorteadas de banco de questões para a etapa de pós-aula

5.3 Infraestrutura para realização da SAI

O Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos (CCET/UFSCar) possui uma sala de metodologias ativas de ensino disponível para uso, por reserva. A sala foi implantada pelo projeto Movimenta CCET dentro da iniciativa de modernização de seus cursos financiados pela Capes e Fundação *Fulbright* no edital de 2018. A Figura 3 e a Figura 4 apresentam imagens de grupos de alunos da disciplina PGR utilizando os recursos disponíveis no ambiente desta sala em atividades formativas.



Figura 3: Grupo de alunos de PGR utilizando os próprios computadores para resolução das atividades



Figura 4: Grupos de alunos de PGR utilizado as telas para compartilhar a resolução das atividades

A sala é composta por mesas trapezoidais que podem formar diversos arranjos, suportes para papéis do tipo cartolina ou *flipchart* e telas para compartilhar o desenvolvimento do trabalho dentro do grupo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência são apresentadas as principais conclusões do trabalho considerando-se a experiência docente:

- O trabalho docente de "tutoramento", seleção, criação e/ou escolha dos materiais didáticos a serem utilizados, das metodologias ativas adequadas a cada REA, assim como, do conhecimento na mediação e aplicação das metodologias ativas em sala de aula é fundamental para garantia do processo de ensino-aprendizagem e efetivo desenvolvimento de competências nos estudantes.
- A partir da experiência acumulada, considera-se que se pode alcançar mais engajamento e eficiência de ensino com o uso de atividades de garantia de preparo e revisões resumidas no início das atividades de aula. Podem contribuir para esse efeito o uso de atividades baseadas em problemas contextualizados como complemento às aulas.
- É notável a participação dos alunos na solução dos problemas, com discussões internas ao grupo, elaboração de planilhas ou soluções conjuntas e discutidas e um elevado estado de ânimo para realização das atividades
- Usar metodologias ativas é um processo de transformação constante. Do docente se requer dedicação e tempo para conhecimento, aprofundamento e capacitação para aplicação das metodologias ativas, de forma a selecionar estratégias que se adequem ao seu próprio estilo de ensino e aprendizagem, as competências que se deseja desenvolver nos estudantes e aos recursos disponíveis para sua realização
- As ferramentas de IA têm sido utilizadas como facilitador do trabalho docente na elaboração de atividades e a sua integração ao ambiente *Moodle*. A IA permite a rápida preparação das atividades de garantia de preparo em questões de múltipla escolha. Entretanto, este tipo de questão é de difícil preparo e configuração no *Moodle*. As IAs permitem a rápida conversão de muitas questões simultaneamente em um arquivo do tipo ".xml" *Moodle* de fácil e rápida importação na plataforma.
- O processo de aprendizagem conta ainda com o desenvolvimento de um projeto geométrico completo de um trecho de rodovia com auxílio do programa GEOOFFICE, cuja licença é liberada aos alunos de forma completa e gratuita durante o período da graduação pela empresa proprietária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bacich, L.; Moran, J. *Metodologias Ativas para uma Educação Inovadora: Uma Abordagem Teórico-Prática*. (1ª ed.).: Penso, 2017.

Bergmann, J.; Sams, A. *Flip Your Classroom: Reach Every Student in Every Class Every Day*. (1. ed.). International Society for Technology in Education, 2012.

Elmôr, G. *et al. Uma Nova Sala de Aula é Possível - Aprendizagem Ativa na Educação*. (1ª ed.).: LTC, 2019.

Gamage, S. H. P. W.; Ayres, J. R.; Behrend, M. B. A systematic review on trends in using Moodle for teaching and learning. *International Journal of STEM Education*, v. 9, n. 9, 25 jan. 2022.

Hew, K. F.; LO, C. K.. Flipped classroom improves student learning in health professions education: A meta-analysis. *BMC Medical Education*, v. 18, n. 1, p. 1–12, 15 mar. 2018.

Kerimbayev, N. *et al.* Virtual educational environment: interactive communication using LMS Moodle. *Education and Information Technologies*, v. 25, n. 3, p. 1965–1982, 1 maio 2020.

Li, G.; Xu, J.. The Explore of Virtual Learning Environment: A Study of Higher Education. *2023 11th International Conference on Information and Education Technology (ICIET)*, p. 34–38, 2023.

Lo, C. K.; hew, K. F.. The impact of flipped classrooms on student achievement in engineering education: A meta-analysis of 10 years of research. *Journal of Engineering Education*, v. 108, n. 4, p. 523–546, 26 out. 2019.

Mazur, A. D.; Brown, B.; Jacobsen, M. Learning Designs using Flipped Classroom Instruction | Conception d'apprentissage à l'aide de l'instruction en classe inversée. *Canadian Journal of Learning and Technology*, v. 41, n. 2, 30 maio 2015.

Ng, D. T. K. *et al.* Teachers' AI digital competencies and twenty-first century skills in the post-pandemic world. *Educational Technology Research and Development*, v. 71, n. 1, p. 137–161, 1 fev. 2023.

Souza, L. A. F. de. Uma breve abordagem sobre procedimentos de ensino-aprendizagem e habilidades interpessoais na formação do engenheiro civil. *Revista de Estudos Interdisciplinares*, v. 6, n. 6, p. 01–23, 23 dez. 2024.

PEDALA IF: IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE COMPARTILHAMENTO DE BICICLETAS COMO ESTRATÉGIA PARA O ENSINO DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

Philippe Barbosa Silva, Luanna Oliveira Lima, Charles Pereira Chaves
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde

RESUMO
Este estudo analisou a percepção de estudantes de Engenharia Civil sobre o desenvolvimento de habilidades via Projeto Pedala IF, um sistema de compartilhamento de bicicletas que utilizou metodologia ativa (Aprendizagem Baseada em Projetos). A pesquisa empregou um questionário com 23 afirmações (escala Likert) aplicado a 21 estudantes, além de questões abertas. Os resultados quantitativos, pelo Teste de Friedman, mostraram que não houve diferenças significativas na percepção entre as habilidades avaliadas, indicando um impacto uniforme e holístico. A alta concordância, em todas as questões, de que o projeto está associado ao desenvolvimento ou aperfeiçoamento de habilidades e competências foi a observação geral. Qualitativamente, desafios como trabalho em equipe, gestão do tempo e recursos limitados foram frequentes. A discussão conclui que a metodologia é eficaz e proporciona aprendizado consistente, mas alguns ajustes são importantes para mitigar dificuldades e otimizar experiências futuras, promovendo um ambiente mais colaborativo e eficiente.

1. INTRODUÇÃO

Conforme Freeman *et al*. (2014), a adoção de metodologias ativas tem se mostrado uma forma eficaz de aproximar os estudantes das práticas profissionais e de promover maior engajamento e retenção do aprendizado. Assim, ao aplicar esses métodos, os cursos de Engenharia cumpririam o papel de formar profissionais não apenas capacitados tecnicamente, mas também capazes de enfrentar as complexas demandas sociais e ambientais da atualidade (Felder e Brent, 2016; Prince e Felder, 2020).

Nesse contexto, a Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP) se destaca como uma das metodologias ativas mais promissoras no ensino de Engenharia. Fundamentada nos princípios do aprendizado construtivista, a ABP coloca o estudante no centro do processo educacional, promovendo o desenvolvimento de projetos que partem de problemas reais como ponto de partida para a aquisição de conhecimentos e o desenvolvimento de competências (Barrows, 1986; Kolmos, 2009). Estudos demonstram que a ABP não apenas melhora a retenção do conhecimento, mas também fomenta habilidades fundamentais para o futuro engenheiro, como comunicação, gestão de projetos, tomada de decisão e adaptação a cenários incertos (Chiang e Lee, 2016; Hernández-de-Menéndez *et al*., 2019).

O objetivo deste trabalho é apresentar a análise da percepção dos estudantes da disciplina “Planejamento de Transportes” quanto ao desenvolvimento ou aperfeiçoamento de competências e habilidades por meio da execução do Projeto Pedala IF. De forma específica, o trabalho busca avaliar a eficácia da metodologia ativa de aprendizagem baseada em projeto (ABP) no contexto da disciplina.

2. PROJETO PEDALA IF

A disciplina obrigatória “Planejamento de Transportes” ofertada para estudantes do 7° período do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal Goiano (IF Goiano), tem como objetivo principal capacitar os estudantes para o entendimento do processo de planejamento de sistemas de transportes, especialmente no contexto urbano. De modo a aumentar a significância na aprendizagem e promover o desenvolvimento, para além dos aspectos técnicos, de *soft skills*, no primeiro semestre de 2025 foi empregada a metodologia ativa de aprendizagem baseada em projeto (ABP) no contexto da disciplina. Foi estruturada a proposta de planejamento e implantação de um sistema colaborativo de compartilhamento de bicicletas no Campus Rio Verde do IF Goiano. O projeto, baseado em um projeto de pesquisa realizado anteriormente, contemplou os aspectos iniciais do planejamento do sistema de transporte, a implantação de todos os componentes do sistema e o início da operação. A proposta impôs, necessariamente, que os estudantes aplicassem conceitos adquiridos nas aulas teóricas da disciplina e também, aspectos relativos à financiamento e publicidade do sistema, aquisição e adaptação de bicicletas, sistemas de tecnologia e planejamento e execução de obras.

Os sistemas de compartilhamento de bicicletas, conhecidos como *bike sharing systems*, são serviços que disponibilizam bicicletas para uso público, visando complementar outros modos de transporte e promover a mobilidade sustentável, especialmente em deslocamentos curtos (Shaheen *et al*., 2010). Conforme ITDP

(2018), o bom planejamento desses sistemas cria novas conexões com o transporte público, locais de trabalho e outros destinos, expandindo as redes de mobilidade urbana e conectando pessoas a novas oportunidades, também estando alinhado à Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012).

Entre 19/02 e 18/06/2025 uma equipe de vinte e sete estudantes desenvolveu as atividades/etapas do projeto apresentadas na Figura 1, desde a contextualização e entendimento do problema, passando pela coleta de dados e planejamento, até à implantação física do sistema e teste operacional. O SCB é composto por seis pontos de apoio/estações, cinco bicicletas operacionais e duas bicicletas reservas, sistema de rastreamento e localização em tempo real disponível ao usuário.

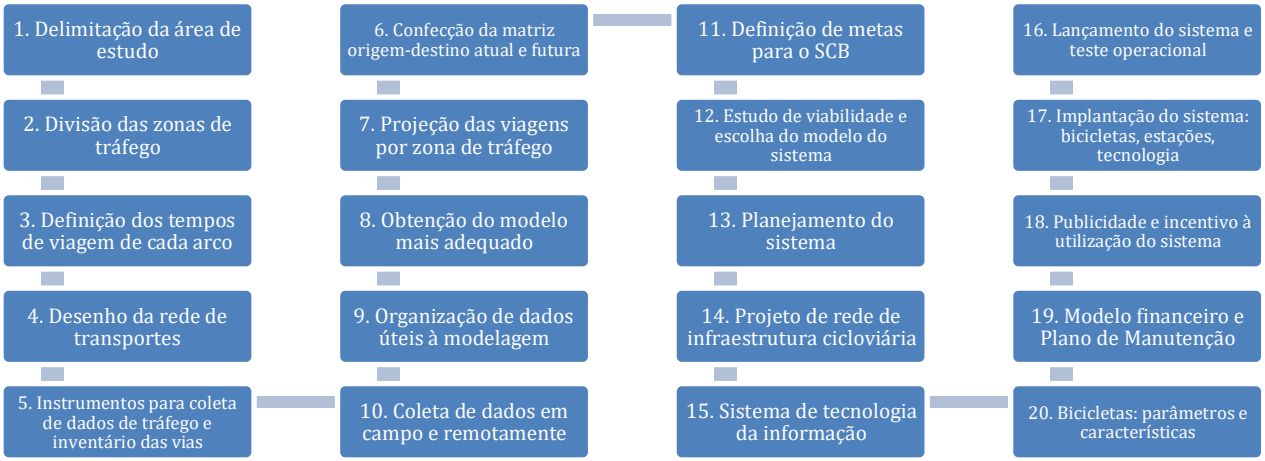


Figura 1: Atividades/etapas de desenvolvimento do Projeto Pedala IF

Na Figura 2 estão apresentadas diversas imagens e fotografias do processo de implantação do Pedala IF.

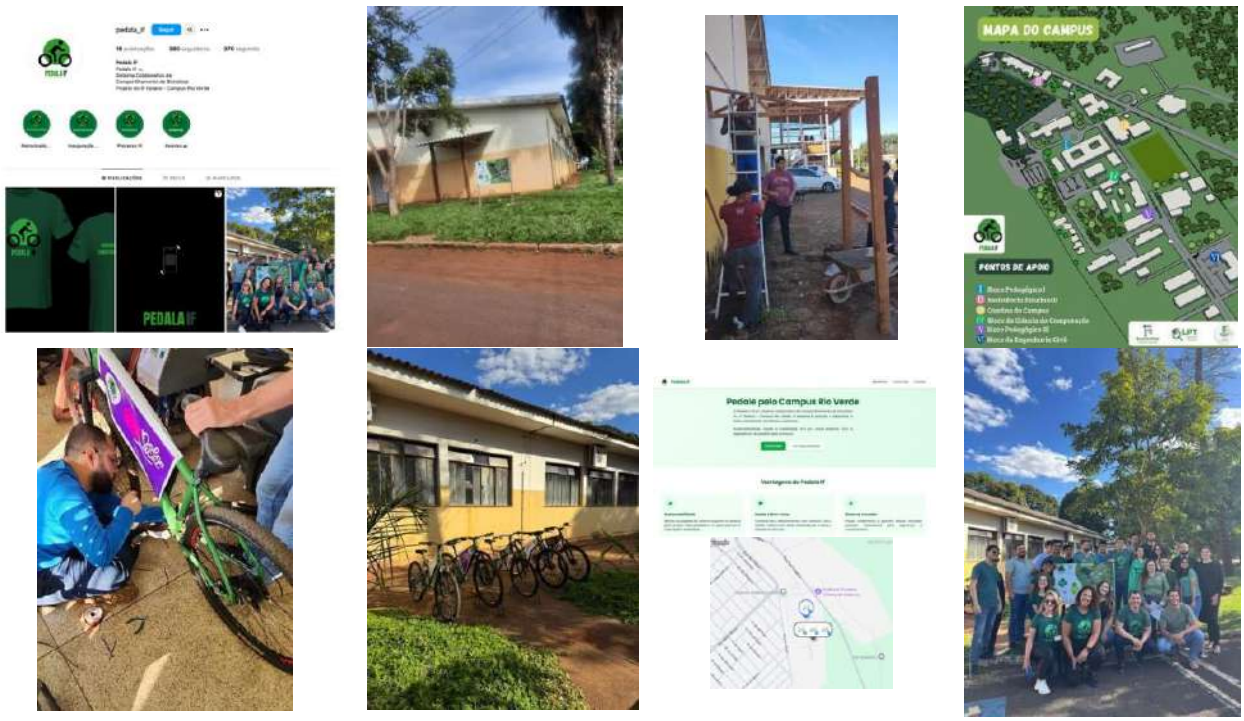


Figura 2: Imagens e fotografias do processo de implantação do Pedala IF

3. MÉTODO DA PESQUISA

Neste trabalho, três etapas principais foram executadas, a saber: i) Elaboração do instrumento de pesquisa para verificação da percepção dos estudantes quanto ao desenvolvimento e/ou aprimoramento de habilidades e competências por meio da execução do Projeto Pedala IF. O questionário, com 26 questões, foi estruturado em

três partes, sendo a primeira sobre a experiência e percepção, a segunda relacionada às catorze habilidades e competências, selecionadas com base Boelt *et al.* (2022), e a última parte, com questões de percepção geral, incluindo três perguntas discursivas. ii) Aplicação do questionário aos estudantes participantes do projeto, por meio de formulário eletrônico; iii) Análise e discussão dos resultados, por meio de estatísticas descritivas e comparações. Em especial, o teste de Friedman, teste não-paramétrico utilizado para comparar dados amostrais vinculados, foi empregado. Este teste é utilizado para análise de variância com medidas repetidas, permitindo avaliar se alguma das diferenças entre as medianas é estatisticamente significativa, tendo como hipótese nula (H_0) de que todas as medianas das respostas são iguais. O resultado permite observar se as respostas às diferentes questões possuem distribuição igual.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão do Projeto Pedala IF, com a completa implantação e início da operação do SCB, foi aplicado o questionário de avaliação aos estudantes envolvidos, resultando em vinte e uma respostas válidas. Inicialmente, para investigar se a percepção de ganho avaliada pelo questionário diferia significativamente entre si para a mesma amostra, empregou-se o Teste de Friedman para amostras relacionadas. Os resultados indicaram um valor-p calculado de 0,079, o que é superior ao valor de nível de significância adotado (alfa = 0,05), motivo pelo qual a hipótese nula não foi rejeitada.

A análise da consistência interna, utilizando o Teste de Friedman, revelou que não há diferenças estatisticamente significativas entre as distribuições das respostas para as 23 questões do questionário. Isso indica que a percepção dos estudantes sobre o desenvolvimento e aprimoramento de suas habilidades foi notavelmente uniforme e consistente em todos os aspectos avaliados pelo projeto. Após verificação da inexistência de diferenças significativas na distribuição das respostas, é possível avaliar e discutir os resultados gerais de resposta à cada questão, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição das respostas do questionário

Q	Discordo totalmente	Discordo	Neutro	Concordo	Concordo totalmente	Q	Discordo totalmente	Discordo	Neutro	Concordo	Concordo totalmente
1	5%	10%	14%	19%	52%	**13**	10%	5%	14%	19%	52%
2	5%	0%	19%	10%	67%	**14**	5%	5%	14%	19%	57%
3	5%	0%	14%	10%	71%	**15**	10%	5%	14%	14%	57%
4	5%	5%	5%	24%	62%	**16**	5%	5%	10%	24%	57%
5	5%	0%	24%	5%	67%	**17**	5%	5%	14%	14%	62%
6	10%	5%	19%	10%	57%	**18**	5%	0%	19%	14%	62%
7	5%	5%	24%	10%	57%	**19**	5%	5%	19%	5%	67%
8	5%	5%	19%	14%	57%	**20**	5%	0%	24%	10%	62%
9	5%	0%	24%	14%	57%	**21**	10%	5%	10%	14%	62%
10	5%	5%	14%	19%	57%	**22**	10%	5%	14%	19%	52%
11	5%	0%	19%	14%	62%	**23**	5%	0%	10%	14%	71%
12	10%	5%	29%	5%	52%	**Legenda:** Q - Questão					

Com base na Tabela 1 é possível observar a alta concordância (soma das categorias "Concordo" e "Concordo Totalmente") com as afirmações sobre os benefícios da metodologia ativa. A concordância combinada variou entre 67% e 86%, indicando uma percepção predominante de que o emprego de aprendizagem baseada em projeto efetivamente contribuiu para o desenvolvimento das habilidades propostas. Por outro lado, a porcentagem de estudantes que discordaram (soma das categorias "Discordo" e "Discordo Totalmente") foi notavelmente baixa em praticamente todas as questões, frequentemente igual ou inferior a 10%. Isso sugere que, para a amostra estudada, foi entendido que a metodologia ativa não teve um impacto negativo ou irrelevante nas habilidades avaliadas. Por fim, a proporção de respostas neutras variou entre as afirmações, com algumas questões apresentando até 29% de estudantes que não concordam nem discordam. Embora esses pontos possam indicar áreas onde a percepção do impacto não foi tão clara ou pronunciada para todos os estudantes, a tendência geral ainda aponta para uma percepção majoritariamente positiva ou neutra, e raramente negativa.

Apesar do patente reconhecimento de que a metodologia ativa empregada contribuiu para o aprimoramento ou desenvolvimento de habilidades e competências não técnicas inerentes à atuação do profissional de engenharia, é importante avaliar com atenção as questões em que houve acúmulo de discordâncias. Para tanto, foram selecionadas as seis afirmações com maior percentual (10%) de "Discordo Totalmente", apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Localização dos pontos de coleta utilizados na pesquisa

Questão	Afirmação	Definição
6	Você se sentiu motivado(a) e engajado(a) ao participar das atividades relacionadas ao projeto.	-
12	Após conclusão do planejamento e implantação do Pedala IF, a competência/habilidade Metacognição foi desenvolvida ou aprimorada.	**Metacognição:** Caracteriza-se como 'pensar sobre o pensar', incluindo a capacidade de refletir e analisar o próprio processo de pensamento, monitorar a aprendizagem e transferir o conhecimento para a prática.
13	Após conclusão do planejamento e implantação do Pedala IF, a competência/habilidade Navegação na Ambiguidade (Lidar com incertezas) foi desenvolvida ou aprimorada.	**Navegação na Ambiguidade (Lidar com incertezas):** A capacidade de lidar e se adaptar a situações incertas ou ambíguas, aprendendo com erros e superando questões imprevistas que surgem no processo de aprendizagem ou resolução de problemas.
15	Após conclusão do planejamento e implantação do Pedala IF, a competência/habilidade Gerenciamento de Projetos foi desenvolvida ou aprimorada.	**Gerenciamento de Projetos:** Envolve a organização e gestão coletiva do tempo, tarefas e recursos por uma equipe para cumprir requisitos e alcançar os objetivos de um projeto.
21	Após conclusão do planejamento e implantação do Pedala IF, a competência/habilidade Trabalho em Equipe foi desenvolvida ou aprimorada.	**Trabalho em Equipe:** Envolve a colaboração eficaz com colegas para atingir um objetivo comum, incluindo comunicação, respeito mútuo, divisão de tarefas, resolução de conflitos e interdependência responsável dentro de um grupo.
22	Em comparação com métodos tradicionais, a aprendizagem baseada em projetos proporcionou maior retenção dos conteúdos.	-

A discordância verificada na Questão 6 pode ser decorrente do fato do projeto demandar esforços em frentes de trabalho distintas do que é característico da atual do engenheiro civil, como por exemplo atividades de divulgação, produção de peças publicitárias, captação de recursos para apoio ao projeto. Isso ficou evidente ao longo das reuniões ao longo da execução do projeto. Já nas Questões 12 e 13, devido à apresentação de termos menos conhecidos (Metacognição e Navegação na Ambiguidade), isso pode ter dificultado a compreensão e resposta julgamento mais correto da afirmação.

Quanto às Questões 15 e 21, a relativa discordância dos estudantes é confirmada nas Questões 24 a 26, cujo campo era aberto para destaque de pontos positivos, limitações e sugestões ao projeto. Diversos estudantes apontaram não ter sido adequado delegar a responsabilidade pela organização das atividades aos próprios estudantes, sendo entendido por eles que a designação das atividades e mero cumprimento por eles seria o mais proveitoso. Associado a isso, quase todas as limitações e desafios apontados indicavam para a dificuldade do trabalho em equipe. Embora o "Gerenciamento de Projeto" e "Trabalho em Equipe" requeiram autonomia dos estudantes em importantes definições e gestão de conflitos, o projeto não se revelou ser muito útil nesse quesito.

Por fim, na Questão 22, dois estudantes entenderam que a metodologia empregada não favoreceu a retenção dos conteúdos abordados na disciplina "Planejamento de Transportes", o que pode ser justificado pelo fato de que, além do planejamento geral e ações de implantação por todos os estudantes, cada frente de trabalho se dedicou especificamente a determinadas atividades e essas, em certa medida, poderiam não estar diretamente ligadas aos conteúdos ministrados.

As Questões 24, 25 e 26, questão aberta, revelaram que o maior desafio enfrentado foi o trabalho em equipe, destacado como dificuldade de gerir conflitos, distribuir atividades/tarefas e manter o mesmo nível de comprometimento de todos os participantes. Foram apontados ainda como desafios o tempo limitado para a execução do projeto, falta de uma liderança entre os estudantes e limitação de recursos financeiros. Também foram apontados pontos positivos como a aplicação prática de conhecimentos e resolução de problemas reais.

E como sugestões, os estudantes indicaram a necessidade de divisão de grupos menores e definição clara das atividades de cada integrante pelo professor e adoção de melhores estratégias de comunicação entre os participantes do projeto.

5. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a percepção dos estudantes sobre o impacto de uma metodologia ativa aplicada a um projeto prático colaborativo ao longo de um semestre, visando desenvolver diversas habilidades. O Teste de Friedman confirmou a ausência de diferenças significativas na percepção de ganho entre as habilidades avaliadas, sugerindo que o projeto promoveu um desenvolvimento uniforme. Os resultados quantitativos, baseados em um questionário aplicado aos estudantes envolvidos, revelaram uma percepção predominantemente positiva dos participantes, atingindo concordância de até 86% entre os respondentes. Apesar dos resultados positivos, a análise das questões abertas também revelou desafios, sendo as principais dificuldades mencionadas pelos estudantes: problemas com trabalho em equipe (desalinhamento, conflitos e contribuições desiguais), gestão do tempo em relação a outras demandas e limitações de recursos.

Em suma, os resultados sugerem que a metodologia ativa adotada foi eficaz em proporcionar uma experiência de aprendizagem enriquecedora e consistente, mas também destacam a necessidade de ajustes para mitigar os desafios enfrentados pelos estudantes. Projetos futuros que considerem as limitações apontadas e implementem melhorias poderão não apenas consolidar os efeitos positivos da metodologia ativa, mas também criar um ambiente ainda mais inclusivo, colaborativo e eficiente, garantindo que todos os participantes tenham condições de participar plenamente e atingir o máximo de seu potencial.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio institucional e aos parceiros e patrocinadores do Projeto Pedala IF que viabilizaram sua execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrows, 1986 Barrows, H. S. (1986) A taxonomy of problem-based learning methods. *Medical Education*, v. 20, p. 481-486. DOI: 10.1111/j.1365-2923.1986.tb01386.x

Boelt, A. M.; Kolmos, A. e Holgaard, J. E. (2022) Literature review of students' perceptions of generic competence development in problem-based learning in engineering education. *European Journal of Engineering Education*, v. 47, n. 6, p. 1399-1420. DOI: 10.1080/03043797.2022.2074819

Chiang, C. e Lee, H. (2016) The Effect of Project-Based Learning on Learning Motivation and Problem-Solving Ability of Vocational High School Students. *International Journal of Information and Education Technology*, v. 6, n. 9, p. 709–712. DOI: 10.7763/IJIET.2016.V6.779

Felder, R. M. e Brent, R. (2016) Teaching and Learning STEM: A Practical Guide. San Francisco: Jossey-Bass.

Freeman, S.; Eddy, S. L.; Smith, M. K.; Okoroafor, N.; Jordt, H. e Wenderoth, M. P. (2014) Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, v. 111, n. 23, p. 8410-8415. DOI:10.1073/pnas.1319030111.

Hernández-de-Menéndez, M.; Vallejo Guevara, A.; Tudón Martínez, J. C.; Morales-Menendez, R. e Mora Tavarez, J. (2019) Active learning in engineering education. A review of fundamentals, best practices, and experiences. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, v. 13, n. 2, p. 909–922. DOI: 10.1007/s12008-018-0054-2

ITDP (2018) Guia de Sistemas de Bicicletas Compartilhadas. Rio de Janeiro: Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento.

Kolmos, A. (2009) Problem-Based and Project-Based Learning. In Jolvi, A. e Odls, B. M. (eds.) Cambridge Handbook of Engineering Education Research. Cambridge: Cambridge University Press, p. 141-160.

Prince, M. e Felder, R. M. (2020) Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases. *Journal of Engineering Education*, v. 95, n. 2, p. 123-138.

Shaheen, S. A.; Guzman, S. e Zhang, H. (2010) Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: Past, Present, and Future. *Transportation Research Record*, v. 2143, n. 1, p. 159–167. DOI: 10.3141/2143-20

Philippe Barbosa Silva (philippe.silva@ifgoiano.edu.br)
Luanna Oliveira Lima (luanna.oliveira@ifgoiano.edu.br)
Charles Pereira Chaves (charles.chaves@ifgoiano.edu.br)
Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Rodovia Sul Goiana, km 01, S/N, Zona Rural, Rio Verde, Goiás, Brasil

PROPOSTA DE GAMEFICAÇÃO DE ENSINO-APRENDIZAGEM VOLTADA AO DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE AEROPORTOS

Isabela Sarkis Cardoso[1], **Gabriela Hennig Osmari**[2], **Patrícia Hennig Osmari**[1]
[1]Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, [2]Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
As metodologias ativas de aprendizagem são reconhecidas por promoverem o engajamento e melhorarem os resultados dos alunos quando empregados para finalidades didáticas. Apesar do interesse crescente neste assunto, ainda existe um referencial limitado que aborda o uso de jogos educativos no ensino-aprendizagem em Engenharia. Este estudo buscou desenvolver um jogo de tabuleiro educativo, denominado AeroLudo, para auxiliar a fixação de conceitos de projetos de infraestrutura aeroportuária em cursos de Engenharia Civil. O jogo incentiva a participação ativa e a resolução colaborativa de problemas, alinhando-se aos princípios da aprendizagem ativa. Para tal, foi proposto um tabuleiro, regras do jogo e perguntas a serem respondidas ao longo das partidas. Foi aplicado um formulário para avaliação da atividade pelos participantes que indicou um resultado positivo. O AeroLudo se mostrou uma ferramenta eficaz para avaliação do aprendizado de futuras turmas, uma vez que amplia a participação ativa dos alunos e a compreensão de conceitos.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As metodologias ativas de aprendizagem têm ganhado destaque no cenário educacional contemporâneo em função do seu potencial em promover um ensino mais dinâmico e centrado no aluno. Diferentemente das abordagens tradicionais, onde o professor é o principal agente no processo transmissão de conhecimento, as metodologias ativas colocam o aluno como protagonista do processo de aprendizagem, o que incentiva sua participação ativa e crítica.

Segundo Bonwell e Eison (1991), as metodologias ativas envolvem estratégias que engajam os estudantes em atividades como discussões, resolução de problemas, projetos práticos e uso de tecnologias interativas. Essas práticas são fundamentadas na teoria construtivista de Piaget, que sugere que os alunos constroem seu próprio conhecimento a partir das interações com o ambiente, com os demais colegas e com o professor.

Silva *et al*. (2013) destaca que as metodologias ativas desenvolvem habilidades essenciais como pensamento crítico, criatividade e colaboração. Em seu estudo sobre jogos educativos, Lima e Melo (2013) propõem que jogos podem ser eficazes ferramentas de aprendizagem, especialmente quando integrados ao currículo de Engenharia. Os autores argumentam que os jogos não apenas tornam o aprendizado mais envolvente, como também facilitam a compreensão de conceitos complexos através da prática e da simulação.

A utilização de metodologias ativas na educação em Engenharia é evidenciada em alguns estudos realizados em universidades brasileiras. Pereira *et al*. (2015) e Bernardinis *et al*. (2017) desenvolveram , respectivamente, um baralho interativo e três atividades para a disciplina de Sistemas de Transportes do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná durante os anos de 2013, 2014 e 2016 que adotaram as metodologia de aprendizagem baseada em problemas e gameficação. Eles concluíram que essas abordagens tornam o processo de ensino-aprendizagem mais ativo e envolvente, além de promoverem uma melhor assimilação dos conteúdos teóricos e práticos. Evangelista e Silva (2023) elaboraram o jogo “SANCA!”, que é uma atividade de estratégia e de discussão que estimula o aprendizado sobre conceitos relacionados ao planejamento e análise de transportes. Concluiu-se que os jogos podem incentivar a crítica e a aplicação prática do conhecimento adquirido em sala de aula.

Apesar das evidências positivas, a quantidade de referências específicas sobre a aplicação das metodologias ativas na educação em Engenharia ainda é limitada. Este fato denota a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas e estudos para explorar as melhores práticas e os impactos a longo prazo dessas abordagens. Davoli e Pitombo (2023) destacam a importância de desenvolver e testar novos jogos educativos, como o Perfil, que avalia os conhecimentos dos alunos e promove a dedução lógica.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um jogo de tabuleiro funcional, denominado AeroLudo, que auxilie e reforce o aprendizado sobre o projeto de infraestrutura de aeroportos por meio da interação entre os jogadores. Além de realizar uma avaliação quantitativa e qualitativa respondida pelos participantes da atividade. O público-alvo foi composto pelos alunos da disciplina de Aeroportos do curso de graduação de Engenharia Civil

da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

2. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho de desenvolvimento do jogo educativo foi estruturada em três etapas para garantir a criação de uma ferramenta eficaz no ensino-aprendizagem de conceitos de infraestrutura aeroportuária para alunos de Engenharia Civil. A proposição do AeroLudo passou inicialmente pela fase de concepção do tabuleiro, das cartas, das regras e da elaboração de perguntas e de respostas sobre tópicos de infraestrutura aeroportuária. Posteriormente, foram aplicados jogos-teste com os alunos com o intuito de aprimorar a dinâmica do AeroLudo e de torná-lo mais atrativo e funcional. Na sequência, um questionário foi respondido pelos participantes para indicarem as suas impressões em relação ao jogo de ensino-aprendizagem.

2.1. Concepção, planejamento e desenvolvimento do AeroLudo

A concepção do jogo envolveu a criação da ideia central, que é baseada no aprendizado de projetos de infraestrutura aeroportuária. Foi realizada uma análise das demandas da disciplina para identificar os principais tópicos a serem abordados. Essa etapa foi crucial para definir o formato e as mecânicas do jogo, garantindo que ele fosse atrativo e educativo para os alunos.

Além disso, foram considerados diversos tipos de jogos para o desenvolvimento do AeroLudo, incluindo jogos de cartas e de tabuleiro. Cada dinâmica de jogo foi investigada quanto à sua adequação para avaliar o processo de aprendizado envolvido no projeto de aeroportos. Por exemplo, jogos de cartas, como “Trunfo”, poderiam ser utilizados para ensinar características específicas de itens relacionados ao tema. O “Jogo da Vida” poderia simular a jornada do projeto de infraestrutura de um aeroporto. Enquanto o “Ludo”, com regras mais simples, poderia ser adaptado para incluir perguntas ao longo do tabuleiro, para tornar o reforço de conceitos um processo ativo de ensino-aprendizagem.

A partir da análise preliminar, foi definido que o modelo de tabuleiro seria o do tipo “Ludo”, por se tratar de um tabuleiro consolidado na cultura brasileira, e, a essa dinâmica de jogo, foram incluídas cartas de perguntas para abordar os tópicos relacionados a infraestrutura aeroportuária. Desta maneira, como o tabuleiro tem a identidade de quatro cores, os tópicos selecionados da disciplina foram divididos em quatro grupos: 1. Comprimento de pista - vermelho; 2. Orientação de pista - amarelo; 3. Projeto geométrico - azul; 4. Projeto de pavimentação - verde. Para proporcionar maior agilidade para o jogo, utilizou-se um único peão por cor no lugar dos quatro peões do jogo tradicional.

2.2. Aplicação do jogo com o público-alvo

Foram realizados dois testes principais com os alunos de graduação em Engenharia Civil da disciplina de Aeroportos da EESC/USP no primeiro semestre de 2024. O objetivo dessa etapa foi testar a funcionalidade do jogo e aprimorá-lo conforme indicações dos alunos por meio de conversas durante a aplicação do jogo.

2.3. Avaliação do AeroLudo pelo público-alvo

Foi elaborado um formulário do Google para realização de uma avaliação quantitativa do jogo ensino-aprendizagem com cinco perguntas para atribuição de notas de 1 a 5, sendo 5 a maior nota e 1 a menor. As duas primeiras perguntas têm um conteúdo mais amplo, sendo: 1. Sobre o uso de metodologias ativas de aprendizado; e 2. Sobre o uso de jogos. As últimas três perguntas são sobre o AeroLudo especificamente, sendo: 3. Sobre a experiência do jogador; 4. Sobre o aprendizado durante o jogo; e 5. Se o aluno considera o jogo uma ferramenta de aprendizado para as próximas turmas. Além disso, foi incluída uma lacuna opcional para os alunos adicionarem as suas impressões qualitativas, o caráter optativo de fornecer esta resposta proporciona a opção de serem incluídos elogios e críticas ao jogo. A avaliação foi compartilhada com os alunos que estiveram presentes na segunda aplicação do AeroLudo e foram obtidas 14 respostas dentre os 23 participantes.

3. RESULTADOS

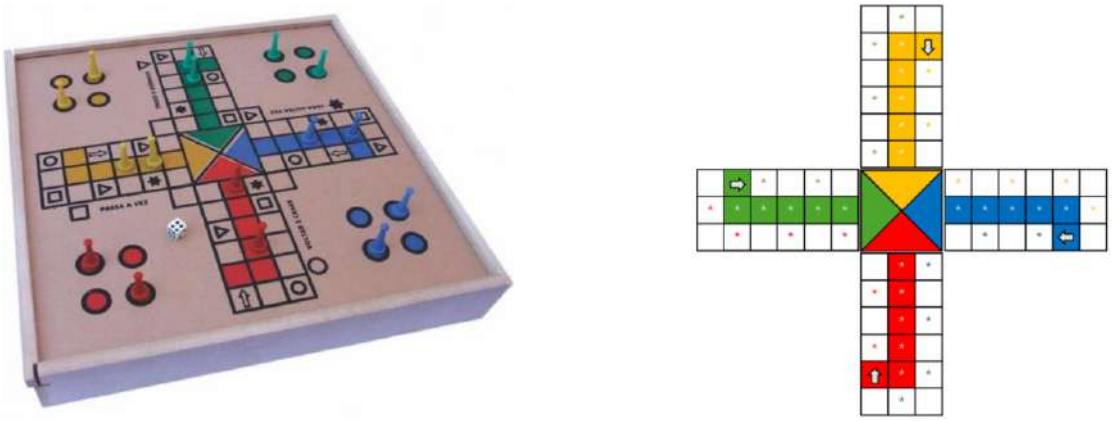
3.1. O jogo AeroLudo

Inicialmente, o tabuleiro foi elaborado, de acordo com a Figura 1, e definiu-se que as casas contendo um asterisco (*) correspondem a cartas de perguntas e estabeleceu-se que cada conjunto de tópicos estaria

relacionado com uma cor do jogo e uma área do tabuleiro. Por exemplo, o tópico de comprimento de pista, correspondeu a vermelho. Os asteriscos na cor branca correspondem a perguntas mais complexas sobre os quatro assuntos do jogo que são respondidas na parte final do jogo. Foram elaboradas 10 perguntas correspondentes a cada um dos tópicos do jogo, totalizando 40 perguntas, e, adicionalmente, foram elaboradas 10 perguntas mais complexas que correspondem a etapa final do jogo. As respostas foram organizadas em 5 folhas conforme a cor da carta de perguntas.

O jogo é composto por 1 tabuleiro do jogo, 1 peão de cada cor, 50 cartas de perguntas e 5 cartões de resposta. As regras do jogo foram elaboradas com o objetivo de incentivar a participação ativa e promover a resolução de problemas. Cada jogador avança no tabuleiro ao responder corretamente às perguntas relacionadas a esses temas. Em caso de respostas incorretas, o próximo time, em sentido horário, terá a oportunidade de responder à pergunta e, se a resposta estiver correta, jogará o dado para sortear o número de casas que poderá avançar.

A partida começa quando os jogadores definem qual a cor de peão a ser utilizada por cada time, considerando que eles iniciarão e terminarão na cor definida. Inicia a partida o time que sortear o maior valor com um dado. Ao longo do jogo, o peão percorre todas as áreas do tabuleiro, em sentido horário, conforme o valor sorteado com o dado em cada rodada. Em cada rodada, o time responderá a perguntas relacionadas a todos os tópicos, conforme a cor do asterisco da casa em que o peão estiver. Ao final da partida e após percorrer todas as cores do tabuleiro, o time entra no corredor onde estão localizadas perguntas mais complexas, indicadas por asteriscos brancos, que são relacionadas aos quatro temas. O primeiro grupo a mover seu peão para casa final será o vencedor.



(a) Tabuleiro tradicional de Ludo. (b) Tabuleiro adaptado para o AeroLudo.
Fonte: Loja do competidor, 2024.

Figura 1: Relação entre o tabuleiro de a) Ludo e b) AeroLudo.

3.2. Aplicação do jogo com o público-alvo

O primeiro teste foi aplicado com perguntas de dois blocos de conteúdo e 24 alunos, divididos em três grupos de 8 pessoas, que responderam às questões em duplas. Essa aplicação inicial ajudou a identificar pontos para aprimoramento, como a necessidade de cartões de respostas mais enxutos e regras mais explícitas. Com base no diálogo com os alunos durante e após a aplicação do jogo, iniciou-se uma fase de melhoria e otimização para garantir que o AeroLudo não apenas cumprisse seu propósito educacional, como também proporcionasse uma experiência de jogo agradável, dinâmica e motivadora para os alunos. Após o refinamento do jogo, a segunda aplicação ocorreu com o jogo completo e 23 participantes. A Figura 2 apresenta imagens das duas aplicações do AeroLudo com alunos da graduação.



(a) (b)

Figura 2: Registro fotográfico das aplicações do AeroLudo a) primeira aplicação e b) segunda aplicação.

3.3. Avaliação do jogo pelo público-alvo

A Figura 3 indica os resultados da avaliação quantitativa do AeroLudo obtida a partir das respostas do formulário. Sobre o uso de metodologias ativas de aprendizado em comparação aos métodos tradicionais de ensino, 71,4% das respostas foram "5", 7,1% avaliaram em "4" e "1" e 14,4% avaliaram em "3". Em relação à experiência de aprendizado proporcionada pelo AeroLudo para turmas de graduação em Engenharia Civil, 64,3% dos alunos atribuíram nota máxima e 37,7% deram nota "4". Em termos de como os jogadores avaliaram a experiência, 71,4% dos alunos avaliaram com nota "5" e 28,6% com nota "4". Sobre como o aluno avaliou o seu aprendizado durante a jogatina, 71,4% consideraram nota "5", 21,5% nota "4" e, por fim, 7,1% nota "3". A maioria dos alunos (92,9%) julgou o AeroLudo com nota máxima para ser utilizado como ferramenta de aprendizado para futuras turmas e apenas 1 aluno com nota "4".



(a) Pergunta 1: "Como você avalia o uso de metodologias ativas de aprendizado em comparação aos métodos tradicionais de ensino?"



(b) Pergunta 2: "Como você avalia o uso de jogos para o aprendizado no curso de graduação em Engenharia Civil?"



(c) Pergunta 3: "Como você avalia sua experiência durante o jogo?"



(d) Pergunta 4: "Como você avalia seu aprendizado durante aplicação do AeroLudo?"



(e) Pergunta 5: "Você acredita que o AeroLudo pode ser utilizado como ferramenta de aprendizado para as próximas turmas?"

Figura 3: Notas atribuídas para cada pergunta da análise quantitativa da avaliação do jogo pelo público-alvo.

Além dos resultados quantitativos, a avaliação qualitativa dos alunos apontou a relevância dessa metodologia ativa de ensino-aprendizagem. Todas as respostas indicaram aspectos positivos do jogo, e não houve apontamentos negativos. O aluno A indicou que "Às vezes ouvindo meus colegas falarem a resposta de outra forma me ajuda na compreensão. Além disso, fica mais dinâmico e é mais fácil se manter atento". O aluno B disse que "Fixação do conteúdo teórico dado em sala de aula.". O aluno C mencionou que "Entre os participantes do jogo houve uma interação e partilha do conhecimento, tornando o aprendizado leve e produtivo.". Por fim, o aluno D afirmou "Muito divertido e melhor que uma aula tradicional, ajuda a fixar conceitos e mantém os alunos dentro dos assuntos por quererem competir no jogo.".

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve o objetivo de analisar, de elaborar e de avaliar a aplicação de um do jogo de tabuleiro, denominado AeroLudo, para o ensino de conceitos de infraestrutura aeroportuária em cursos de Engenharia Civil. A partir da aplicação do jogo e sua avaliação, as seguintes conclusões foram obtidas:

- O jogo proposto demonstrou adotar uma abordagem eficaz para o ensino-aprendizagem;
- A aplicação do jogo em sala de aula mostrou que os alunos aplicaram os conhecimentos teóricos de maneira prática e interativa, promovendo um ambiente de aprendizado envolvente e colaborativo;
- Os testes realizados indicaram que a maioria dos alunos avaliou a experiência de aprendizado positivamente, evidenciando o potencial do jogo para aumentar o engajamento e a compreensão dos conceitos abordados na disciplina;
- A avaliação qualitativa reforça a importância de integrar métodos lúdicos no processo educativo, destacando a relevância do jogo em temas cruciais da disciplina e sua capacidade de facilitar uma compreensão mais profunda e prática dos temas.

A experiência positiva com o AeroLudo sugere a continuidade da adoção desta abordagem de ensino-aprendizagem, com a possibilidade de ajustes e expansões para outras disciplinas por meio da criação de novas cartas de perguntas e de respostas. Essa vivência pode contribuir significativamente para um ensino mais dinâmico e eficaz, que contribui para assimilação dos conteúdos voltados à prática da Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernardinis, M. A. P., Costa, R. A., Suguinoshita, M. C., Pinto, M. S. N. (2017). Análise da aplicação da gamificação e aprendizagem baseada em problemas na disciplina de sistemas de transportes do curso de engenharia civil da universidade federal do paraná nos anos de 2013, 2014 e 2016. In 16° Congresso Internacional de Ergonomia e Usabilidade de Interfaces Humano Tecnológica, Santa Catarina, v. 3. p. 84-92.

Bonwell, C. C., Eison, J. A. (1991). *Active Learning: Creating Excitement in the Classroom*. ASHE-ERIC Higher Education Report No. 1. George Washington University.

Davoli, J. P., Pitombo, C. S. (2023). Perfil: Um jogo de tabuleiro para revisão de conceitos de Engenharia de Transportes. In Anais do 37° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Santos, SP.

Evangelista, B. F., Silva, A. N. R. (2023). O desafio de mobilidade como tema de um jogo de tabuleiro com fins didáticos. In Anais do 37° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Santos, SP.

Lima, C. D. A., Melo, R. A. (2013). Jogos educativos para estradas e transportes. In Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Belém, PA.

Pereira, M. A., Freitas, M. S., Costa, R. A., Araujo, W. B. L. (2015). Construção de baralho interativo como ferramenta para aprendizado na disciplina Sistemas de Transportes do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná. In Congresso Nacional de Ambientes Hipermídia para Aprendizagem, São Luiz, MA.

Silva, S. D., Souza, C. D. R., D'Agosto, M. A. (2013). A utilização de metodologias participativas para aprimorar a formação profissional para o setor portuário: o caso do jogo do TECON. *Revista Transportes*, v. 21, p. 34-43.

Isabela Sarkis Cardoso (isabelasarkis.ca@gmail.com)
Universidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Avenida Trabalhador Sancarlense, Parque Arnold Schimidt, São Carlos, SP, Brasil
Gabriela Hennig Osmari (gabriela.osmari@acad.ufsm.br)
Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico Av. Roraima, n° 1000, bairro Camobi, Santa Maria, RS, Brasil
Patrícia Hennig Osmari (patriciahosmari@usp.br)
Universidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Avenida Trabalhador Sancarlense, Parque Arnold Schimidt, São Carlos, SP, Brasil

Metodologias e avaliação do ensino-aprendizagem

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

UMA AVALIAÇÃO DA PERCEPÇÃO DE APRENDIZADO, IMPACTO EMOCIONAL E PREFERÊNCIAS NA APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE ENSINO BASEADOS EM JOGOS

Gustavo Garcia Manzato[1], **Anna Silvia Palcheco Peixoto**[1]
[1] Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista (Unesp)

RESUMO
Este estudo avaliou o uso de aulas baseadas em jogos na disciplina de Pavimentação, comparando-as com aulas tradicionais quanto à percepção de aprendizado, impacto emocional e preferência dos estudantes. Os resultados indicaram que os jogos promoveram maior engajamento, colaboração e entusiasmo, enquanto as aulas tradicionais se destacaram na clareza conceitual. A maioria dos estudantes preferiu a combinação de ambos os métodos, reconhecendo o valor complementar das abordagens. Conclui-se que a integração de metodologias ativas pode enriquecer o ensino de Engenharia Civil, tornando-o mais dinâmico e eficaz.

1. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi avaliar a aplicação de aulas baseadas em jogos e aulas expositivas tradicionais na disciplina de Pavimentação para estudantes do quarto ano do curso de graduação em Engenharia Civil. Especificamente, procurou-se avaliar a preferência, percepção de aprendizado e impacto emocional de ambos os métodos de ensino.

2. MÉTODO

A disciplina de Pavimentação no curso de graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista (Unesp) é ministrada no sétimo termo do curso e possui uma carga horária de 60 horas. No primeiro semestre de 2025, a turma contou com 46 estudantes matriculados.

Tradicionalmente, os conteúdos da disciplina são ministrados por meio de aulas expositivas seguidas de exercícios e algumas práticas laboratoriais. No referido semestre, dois conteúdos foram selecionados para serem ministrados por meio de métodos de ensino baseados em jogos. Esses conteúdos foram: 1) definições e características de pavimentos asfálticos e de concreto, e 2) materiais utilizados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Essas práticas de ensino foram aplicadas em dois momentos distintos durante o semestre, antecedidos ou seguidos de aulas no formato tradicional.

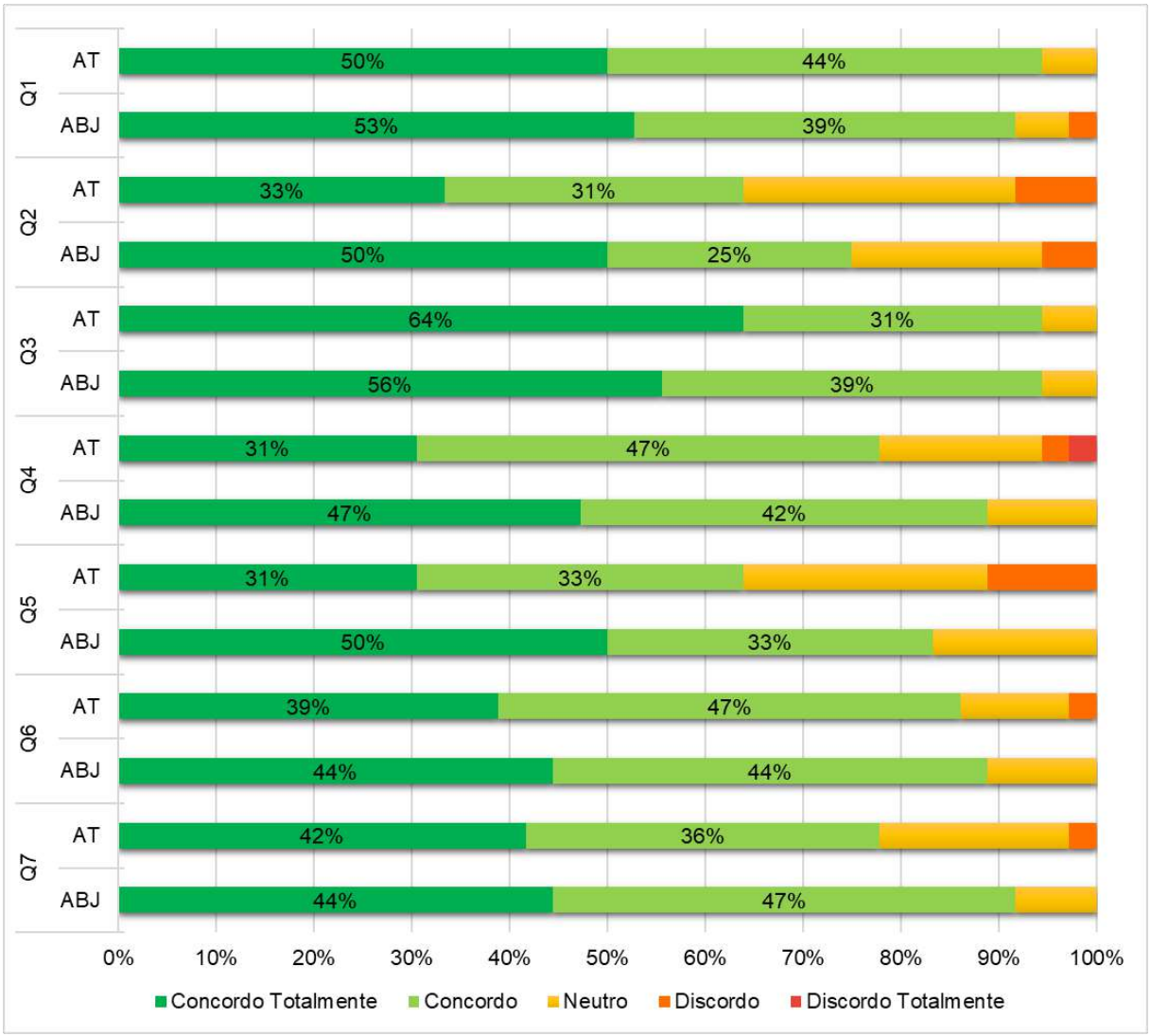
Para o primeiro conteúdo, a turma de estudantes foi subdividida em três equipes: a primeira representaria uma empresa especializada em pavimentação asfáltica; a segunda equipe representaria uma empresa especializada em pavimentos de concreto; e a terceira seriam clientes em busca de empresas de pavimentação para uma determinada obra. Durante uma semana, as equipes que representam as empresas de cada tipo de pavimento deveriam pesquisar sobre suas definições, características, aplicações, custos, etc. e elaborar uma apresentação no sentido de convencer os clientes de que a sua solução de pavimentação seria a mais indicada para a obra determinada. A equipe de clientes deveria pesquisar sobre a obra em questão e se apropriar do conhecimento sobre os possíveis tipos de pavimentação. Após uma semana, durante a aula, um debate foi organizado. As equipes de empresas tiveram a oportunidade de apresentar suas soluções de pavimentação para os clientes, os quais também puderam questioná-las tecnicamente. Ao final, os clientes apresentaram a decisão por qual empresa seria contratada. Na sequência, foi aplicado um teste para avaliar o aprendizado dos estudantes sobre pavimentos asfálticos e de concreto.

Para o segundo conteúdo, uma lista dos principais tipos de materiais utilizados em camadas de base, sub-base e reforço do subleito foi apresentada aos estudantes, organizada em grupos de materiais (granulares, cimentados, reciclados, asfálticos, etc.). Foi proposto que, durante uma semana, os estudantes deveriam pesquisar sobre esses materiais e elaborar uma síntese abordando as suas principais características, materiais empregados e possíveis aplicações em obras de pavimentação. Após uma semana, durante a aula, foi organizada uma dinâmica em que os estudantes eram sorteados para uma breve apresentação oral de um determinado grupo de materiais, também sorteado. O estudante sorteado poderia decidir se gostaria (ou não, considerando eventuais impossibilidades pessoais) de apresentar o assunto, ainda se faria isso sozinho ou com a participação de um colega da sala (escolhido por ele). Uma vez concluída a apresentação, era dada a oportunidade para o restante dos estudantes em sala fazerem eventuais complementações e questionamentos. Depois de finalizada a dinâmica, novamente foi aplicado um teste para a avaliar o aprendizado dos estudantes.

Ainda durante o semestre, quando não seriam mais desenvolvidas aulas baseadas em jogos, um formulário de avaliação foi elaborado e aplicado, de forma online, para os estudantes. Esse formulário abrangeu três abordagens: a primeira relacionada à percepção dos estudantes em relação à aprendizagem conforme os métodos de ensino desenvolvidos (aula tradicional e aula baseada em jogos); a segunda relacionada ao impacto emocional das duas metodologias; e, por fim, a terceira parte contou com questões diretas relacionadas à preferência dos estudantes pelos métodos empregados. A partir de critérios pré-definidos pelos autores, as questões foram elaboradas com auxílio de recursos de inteligência artificial, e estão apresentadas na seção de resultados.

3. RESULTADOS

A aplicação do formulário online entre os 46 estudantes retornou 36 respostas, o que corresponde a uma participação de 78%. A Figura 1 apresenta os resultados das questões relacionadas à percepção do aprendizado, tanto em relação às aulas desenvolvidas de forma tradicional como às aulas baseadas em jogos.

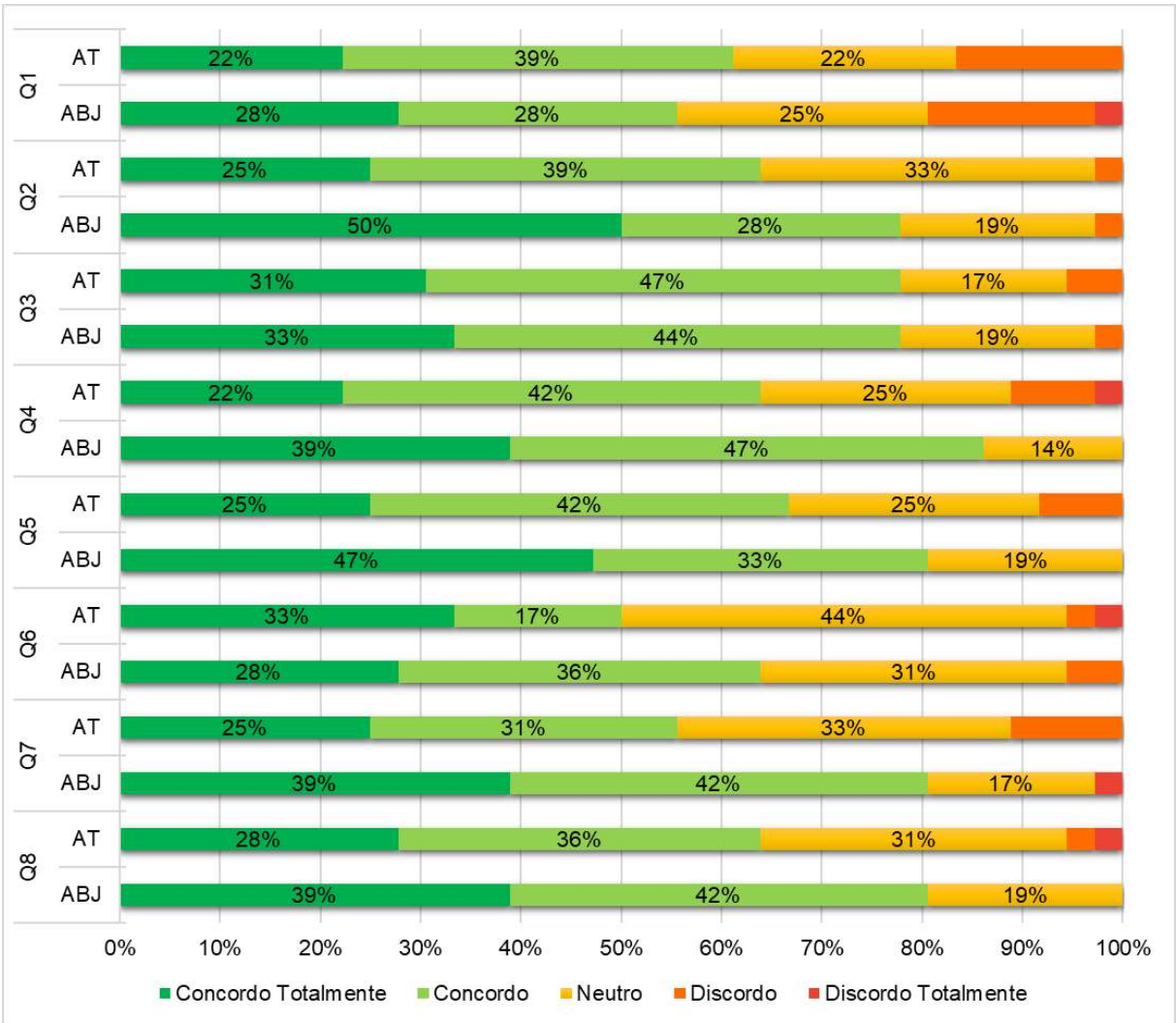


AT: aula tradicional; ABJ: aula baseada em jogos
Q1: O método de ensino me ajudou a compreender os conceitos
Q2: Senti-me motivado a participar da aula
Q3: O teste ao final da aula foi útil para verificar meu aprendizado
Q4: O método de ensino foi eficaz para a retenção do conhecimento
Q5: O método de ensino estimulou meu raciocínio crítico
Q6: O método de ensino proporcionou um ambiente de aprendizado adequado
Q7: O ritmo da aula foi adequado para o meu aprendizado

Figura 1: Resultados das questões relacionadas à percepção de aprendizado conforme método aplicado

Observa-se que nas questões relacionadas à motivação (Q2), eficácia (Q4), estímulo ao raciocínio crítico (Q5), ambiente de aprendizado adequado (Q6) e ritmo da aula (Q7), a abordagem baseada em jogos apresentou maiores concordâncias na percepção de aprendizado comparada à aula tradicional. Em relação à compreensão de conceitos (Q1), as respostas referentes a "concordo totalmente" resultaram em uma proporção ligeiramente maior para a aula baseada em jogos. Mas ao se adicionar os resultados para a resposta "concordo", a aula tradicional supera a aula baseada em jogos nesse aspecto. Ao se avaliar a aplicação de um teste ao final da aula para a verificação do aprendizado (Q3), ambos os métodos resultam em altas e praticamente iguais porcentagens de concordâncias, com um destaque para a maior porcentagem de total concordância em relação à aula tradicional.

A Figura 2 apresenta os resultados das questões relacionadas ao impacto emocional dos métodos de aprendizagem.



AT: aula tradicional; ABJ: aula baseada em jogos
Q1: O método ajudou a diminuir o nervosismo, insegurança ou medo de errar durante o processo de aprendizagem
Q2: O método despertou interesse genuíno pelo conteúdo, me incentivando a querer saber mais
Q3: Eu me senti mais seguro em relação à minha capacidade de aprender e compreender os conteúdos
Q4: O método promoveu um ambiente colaborativo, onde eu me senti parte do grupo
Q5: A abordagem utilizada incentivou o pensamento original, inovador e novas formas de resolver problemas
Q6: Eu me senti confortável para participar, fazer perguntas, opinar ou interagir com colegas e professores
Q7 Em me senti entusiasmado, empolgado ou conectado com o que estava sendo ensinado
Q8: A atividade me desafiou de forma estimulante, sem ser excessivamente difícil ou frustrante

Figura 2: Resultados das questões relacionadas ao impacto emocional conforme método de aprendizado

Observa-se que nas questões relacionadas ao interesse pelo conteúdo (Q2), pertencimento ao grupo (Q4),

incentivo ao pensamento original e inovador para resolver problemas (Q5), conforto e segurança para participar das atividades (Q6), engajamento e entusiasmo com o aprendizado (Q7) e desafio saudável (Q8), as aulas baseadas em jogos exibiram altas porcentagens de concordâncias de impacto emocional positivo, comparadas com as aulas tradicionais. Em relação ao nervosismo, insegurança ou medo de errar durante o processo de aprendizagem (Q1), uma parcela dos estudantes concorda totalmente que a aula baseada em jogos diminui esses sentimentos. Por outro lado, ao se adicionar os estudantes que responderam apenas "concordo", visualiza-se que a aula tradicional apresenta maiores porcentagens de concordância na diminuição desses sentimentos. Em relação à segurança no processo de aprendizagem e compreensão dos conteúdos (Q3), ambas abordagens proporcionaram altas concordâncias, com um ligeiro destaque para a aula baseada em jogos.

A Tabela 1 apresenta um resumo da terceira parte do formulário que se refere às preferências apresentadas pelos estudantes em relação aos métodos de aprendizagem. Nota-se que grande parte já havia tido algum contato com metodologias ativas de aprendizagem. Em relação à preferência pelo método de ensino, uma parcela significativa de estudantes (72%) prefere a combinação de aulas tradicionais com aulas baseadas em jogos. Por fim, grande parte dos estudantes (94%) acredita que a aula baseada em jogos não poderia substituir completamente a aula tradicional, mas que poderia ser aplicada de forma complementar.

Tabela 1: Resultados das preferências dos estudantes em relação aos métodos de aprendizagem

Questão	Alternativas	Respostas
Você já teve contato com metodologias ativas de aprendizagem antes desta experiência?	Sim	78%
	Não	22%
Qual metodologia de ensino você prefere?	Aula tradicional	14%
	Aula baseada em jogos	11%
	A combinação de ambas	72%
	Não tenho preferência	3%
Você acredita que o método baseado em jogos pode substituir completamente a aula tradicional?	Sim, seria uma abordagem mais eficaz	6%
	Não, mas pode ser usada como complemento	94%
	Não, prefiro exclusivamente a aula tradicional	0%

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo comparou aulas expositivas tradicionais e aulas baseadas em jogos na disciplina de Pavimentação, avaliando a percepção, preferência e impacto emocional entre estudantes de Engenharia Civil. Os resultados indicam que as metodologias baseadas em jogos promoveram maior engajamento, estímulo ao raciocínio crítico, colaboração e entusiasmo, enquanto as aulas tradicionais se destacaram ligeiramente na clareza conceitual e na redução de inseguranças.

A maioria dos estudantes demonstrou preferência por uma abordagem combinada, reconhecendo o valor complementar dos jogos ao ensino tradicional. Isso sugere que a integração de métodos ativos pode enriquecer o processo de aprendizagem, tornando-o mais dinâmico e participativo. Embora os resultados sejam promissores, o estudo se limita a um único contexto. Pesquisas futuras podem ampliar a análise para outras disciplinas e formatos. Ainda assim, os dados reforçam o potencial dos jogos como ferramenta pedagógica eficaz no ensino de Engenharia.

Gustavo Garcia Manzato (gustavo.manzato@unesp.br)
Anna Silvia Palcheco Peixoto (anna.peixoto@unesp.br)
Dep. de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Avenida Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01
17033-360 Bauru - SP - Brasil

Educação mediada por tecnologia

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DE PROJETO GEOMÉTRICO DE RODOVIAS: APLICAÇÕES COM QGIS E CIVIL 3D

Leonardo Pereira Morini[1], Luísa Vilanova Marques[1], Helena Karagrigoriou Galanos[1], Paula Sandri Rhoden[1], Daniel Presta Sergio García[2], Sílvio Lisboa Schuster[3], Alejandro Ruiz-Padillo[1,3]
[1]Laboratório de Mobilidade e Logística, Universidade Federal de Santa Maria, [2]Laboratório de Sistemas de Transportes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [3]Departamento de Transportes, Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Este trabalho apresenta a produção de materiais didáticos para o ensino de projeto geométrico de rodovias, desenvolvidos no contexto do Projeto Ponto de Partida. Foram elaborados três manuais e três *playlists* de videoaulas, utilizando os *softwares* QGIS e Autodesk Civil 3D, organizados segundo as etapas do projeto: modelagem territorial, geometria e terraplanagem. O processo incluiu pesquisa sobre as ferramentas, testes práticos, elaboração de roteiros, gravação de vídeos e escrita dos manuais com tutoriais passo a passo. Os materiais foram publicados e disponibilizados aos alunos em disciplinas da UFSM e da UFRGS, integrando atividades de aprendizagem baseada em projetos e em equipes. Como resultado, observou-se maior engajamento dos estudantes, melhora na compreensão técnica e de uso dos *softwares*, além de maior autonomia na elaboração de projetos. A iniciativa reforça a importância do uso de recursos digitais integrados ao ensino técnico, contribuindo para uma formação mais alinhada às exigências do mercado.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o ensino de Engenharia tem passado por uma transformação significativa, com o crescente uso de metodologias ativas no processo de ensino-aprendizagem. Ao contrário do modelo tradicional, centrado na transmissão unidirecional de conhecimento, essas metodologias colocam o estudante como agente ativo do seu aprendizado. Estratégias como aprendizagem baseada em projetos (*Project-Based Learning* - PBL) e em equipes (*Team-Based Learning* - TBL), resolução de problemas e estudos de caso vêm sendo incorporadas em diversas instituições, com resultados promissores, sobretudo em disciplinas que exigem a aplicação de conhecimentos multidisciplinares. A utilização dessas metodologias em cursos de Engenharia Civil e de Transportes tem contribuído para o desenvolvimento de competências profissionais mais alinhadas às exigências do mercado, especialmente em disciplinas relacionadas a projeto (Morais *et al.*, 2021). Nesse contexto, o planejamento feito pelo professor deve considerar não apenas os conteúdos que precisam ser abordados, mas também as habilidades e possibilidades de aprendizagem dos estudantes, mantendo um equilíbrio entre o ato de ensinar e o processo de aprender (Leal, 2019). Assim, guias práticos, tutoriais e roteiros de aula que integram conceitos teóricos com ferramentas digitais aplicadas à engenharia são indispensáveis nas metodologias contemporâneas de ensino nesses cursos (Fonseca e Silva, 2023).

Ademais, as metodologias ativas têm se destacado como ferramentas valiosas para tornar o ambiente educacional mais dinâmico, contribuindo tanto para o progresso acadêmico quanto para o desenvolvimento de habilidades dos estudantes (Renosto *et al.*, 2021). Um exemplo prático dessa abordagem é o "Projeto Ponto de Partida" (PPP), desenvolvido na disciplina de Projeto de Rodovias nos cursos de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que convida os discentes a elaborar um projeto de rodovia utilizando dados reais e características bastante próximas das desenvolvidas por empresas e profissionais que atuam no mercado, desde o levantamento topográfico até a definição da geometria da rodovia e movimentação de terras (Garcia *et al*., 2017). Essa proposta tem como objetivo integrar teoria e prática por meio de atividades que simulam o ambiente profissional, possibilitando que os discentes tomem decisões técnicas baseadas em critérios de projeto e condicionantes reais do terreno.

No PPP, a produção e uso de materiais didáticos sobre os *softwares* profissionais utilizados no projeto, adaptados às metodologias ativas, mostram-se fundamentais para a consolidação da abordagem proposta (Renosto *et al.*, 2021). Entre essas ferramentas, destacam-se os *softwares* de geoprocessamento e de projetos de infraestrutura, dentro da abordagem BIM (*Building Information Modeling*), cuja introdução no ensino de graduação tem facilitado a aprendizagem de conteúdos como traçado planimétrico, altimétrico e em seção transversal, modelagem de terreno e análise espacial, promovendo não apenas o domínio técnico, mas também uma maior aproximação com a prática profissional exigida em projetos de transportes. A aplicação didática desses *softwares* amplia significativamente o repertório técnico e conceitual dos estudantes, permitindo a integração entre teoria e prática e aproximando o processo de formação acadêmica das demandas reais do mercado. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento de competências específicas exigidas pelo setor

de infraestrutura, como a capacidade de interpretar e elaborar projetos com maior precisão, utilizando ferramentas adotadas na engenharia civil nos dias atuais. Assim, os futuros profissionais se tornam mais preparados para uma atuação qualificada, eficiente e alinhada às inovações tecnológicas (Borçato *et al.*, 2022).

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi a elaboração de materiais didáticos audiovisuais no contexto do PPP para apoiar a aprendizagem ativa de conteúdos relacionados a projetos rodoviários em cursos de engenharia civil, envolvendo a modelagem territorial, o projeto geométrico e de terraplanagem mediante os *softwares* de geoprocessamento QGIS e de projeto Autodesk Civil 3D. Tais materiais se compõem de manuais didáticos em formato de *e-book* e videoaulas explicativas, que facilitam que os alunos possam acompanhar todo o processo de capacitação nos softwares e elaboração de um projeto real de uma rodovia.

2. METODOLOGIA

O processo de elaboração dos recursos didáticos iniciou com a compreensão das funcionalidades dos *softwares* QGIS e Autodesk Civil 3D (Marques e Faria Filho, 2022). Na sequência, foram realizados testes práticos com os *softwares*, utilizando um projeto viário desenvolvido anteriormente, que serviu como base para simulações e validações técnicas dos procedimentos apresentados. Com base nesses estudos iniciais, foram elaborados os roteiros das videoaulas, considerando a segmentação por tópicos, o encadeamento didático e o alinhamento com os objetivos de aprendizagem de cada etapa do PPP. Em seguida, foi necessária a capacitação e aprendizagem em ferramentas de gravação e edição de vídeo, como os *softwares* oCam e Microsoft Clipchamp, além da criação das artes visuais dos vídeos. As versões iniciais dos materiais foram submetidas a discussões internas entre os autores, gerando ajustes nos conteúdos e aprimoramento da linguagem visual e didática.

A etapa seguinte consistiu na gravação das videoaulas, com base nos roteiros previamente aprovados, seguida da edição dos vídeos com as artes criadas, e publicação em *playlists* na plataforma aberta de vídeos YouTube. Para cada vídeo, foram gerados QR Codes, que seriam posteriormente inseridos nos manuais, permitindo o acesso rápido a partir das versões impressas e *e-books*. Em paralelo, os manuais foram sendo redigidos com base nas aplicações no projeto demonstradas nos vídeos, incluindo passo a passo ilustrado, dicas técnicas, *links* complementares e organização da elaboração do projeto. A equipe também definiu o estilo visual e formato editorial dos manuais, com padronização gráfica, organização por capítulos e linguagem técnica acessível.

Por fim, os manuais passaram por processos de edição textual, revisão técnica e estética, e foram finalizados para publicação digital e distribuição aos estudantes, por meio de plataformas institucionais e *links* permanentes alocados no site da Universidade Federal de Santa Maria e especificamente na página do Laboratório de Mobilidade e Logística, assim como nas suas redes sociais. Relatos de experiências similares em Engenharia ressaltam que essas etapas são essenciais para garantir a qualidade do material e seu acesso efetivo aos discentes (Belisário *et al.*, 2020).

3. RESULTADOS

Os produtos finais compreendem três manuais e três *playlists* de videoaulas correspondentes, que permitiram a construção de um material didático diversificado, integrando diferentes recursos de apoio ao ensino, alinhado às necessidades práticas da formação acadêmica em projeto de rodovias nos cursos de Engenharia Civil e de Transportes. Os recursos didáticos desenvolvidos neste trabalho seguem a lógica sequencial de desenvolvimento de um projeto de rodovia, desde o tratamento de dados geoespaciais até as etapas finais de terraplanagem, utilizando os *softwares* QGIS e Autodesk Civil 3D, no formato de tutoriais com passo a passo e recursos visuais complementares, favorecendo a aplicação tanto no ensino remoto quanto no presencial. Cada volume e cada *playlist* estão alinhados a uma fase do Projeto Ponto de Partida (PPP), mas também prevendo certa flexibilidade permitindo a aplicação dos materiais em diferentes formatos e contextos de aprendizagem.

O volume I do manual (link - Figura 1a) e a *playlist* de 11 videoaulas relacionada (link - Figura 2a) estão dedicados à utilização do QGIS e introduz os estudantes à obtenção, manipulação e análise de dados topográficos e ambientais. Nessa etapa inicial, alinhada à fase de estudo de traçado da rodovia, os alunos aprendem a baixar modelos digitais de elevação, gerar curvas de nível, delimitar áreas de preservação, calcular declividades e analisar alternativas de traçado preliminar. O objetivo é desenvolver a compreensão geoespacial do território e fornecer subsídios para decisões iniciais de projeto. Dessa forma, o conteúdo começa pela

instalação do próprio *software* e dados básicos das funcionalidades e continua orientado por atividades práticas com dados de um cenário real, promovendo a autonomia dos discentes e fortalecendo sua aprendizagem prática. Essa primeira parte do material finaliza com a preparação dos resultados obtidos para uso na fase seguinte.



Figura 1: Capas dos manuais didáticos desenvolvidos. (a) Volume I; (b) Volume II; (c) Volume III.

Na etapa seguinte, representada pelo volume II do manual (link - Figura 1b), o projeto foca na utilização do *software* Autodesk Civil 3D, no qual os estudantes utilizam as informações obtidas no QGIS para desenvolver o projeto geométrico da rodovia. As atividades iniciam com a importação de arquivos *shapefile* e *geotiff*, e evoluem para a geração de alinhamentos horizontais e verticais, avaliação de interferências, criação de perfis longitudinais, definição do greide, elaboração de seções transversais e aplicação de superelevação e superlargura. Essa fase integra os conhecimentos de topografia com a geometria da rodovia, permitindo a simulação realista do traçado proposto e conta com o cálculo de indicadores de desempenho a partir dos relatórios gerados pelo *software*. Cada capítulo do manual se apoia nas 17 videoaulas desenvolvidas (link - Figura 2b), que acompanham o mesmo processo de aprendizagem, de forma clara e acessível, sobre um exemplo de projeto existente.



Figura 2: Exemplos de capas das videoaulas. (a) QGIS; (b) Civil 3D para geometria; (c) Civil 3D para terraplanagem.

Por fim, o volume III (link - Figura 1c), dedicado ao projeto de terraplanagem, fecha o ciclo com o dimensionamento e a análise volumétrica de cortes e aterros. Por meio da modelagem de superfícies, construção de diagramas de massas, relatórios de movimentação de terra e distribuição de volumes de corte e aterro, os estudantes adquirem competências técnicas fundamentais sobre balanceamento de terras e impactos econômicos das decisões adotadas nas fases anteriores. Todo o conteúdo foi organizado com ênfase na clareza didática, com apoio de mais 12 videoaulas (link - Figura 2c) que completam o conjunto de materiais audiovisuais acessíveis.

Uma vez desenvolvidos os materiais, eles foram disponibilizados para a comunidade acadêmica de forma totalmente gratuita e foram aplicados na execução do PPP nas disciplinas relacionadas já durante dois semestres no Curso de Engenharia Civil da UFSM. O uso dos recursos didáticos em sala de aula foi acompanhado de atividades baseadas nas metodologias ativas de PBL e TBL previstas no PPP, nas quais os estudantes desenvolveram em equipes, ao longo de cada semestre, um projeto rodoviário completo. Os alunos foram responsáveis por aplicar os conteúdos estudados, tomar decisões técnicas justificadas e expor os resultados em relatórios e apresentações, com o apoio dos professores responsáveis das disciplinas e demais colaboradores do projeto. A experiência proporcionou ganhos expressivos na autonomia, na capacidade de análise crítica e no domínio das ferramentas técnicas utilizadas, ajudando os alunos a desenvolverem habilidades mais complexas de aprendizado e a se tornarem mais ativos no próprio processo de estudo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção dos três volumes de manuais didáticos voltados ao uso dos *softwares* QGIS e Autodesk Civil 3D representou uma importante contribuição ao ensino de projetos rodoviários em cursos de Engenharia Civil. Organizados de forma sequencial, os materiais acompanharam as principais etapas de um projeto rodoviário, desde o tratamento de dados geoespaciais até a análise volumétrica de cortes e aterros, permitindo aos estudantes vivenciar um processo próximo da realidade profissional. Além disso, a integração com vídeo-aulas, acessadas por meio de QR Codes e disponibilizadas em plataformas de vídeo, facilitou o uso autônomo dos conteúdos, ampliando as possibilidades de estudo fora do ambiente de sala de aula.

A experiência com os recursos didáticos desenvolvidos nas disciplinas de projeto de rodovias demonstrou resultados positivos em termos de aprendizado, engajamento e domínio das ferramentas técnicas. Os estudantes mostraram maior segurança na utilização dos *softwares*, capacidade de tomar decisões com base em critérios técnicos e maior organização na elaboração de projetos. Os professores também relataram que, com o apoio dos materiais, as atividades práticas puderam ser desenvolvidas com mais profundidade. Diante dos bons resultados alcançados com os três volumes, referentes à modelagem territorial, projeto geométrico e de terraplanagem, encontra-se em desenvolvimento o Volume IV, que abordará a elaboração de projetos ferroviários utilizando o Civil 3D. A proposta busca expandir o escopo da iniciativa e atender a outras áreas da infraestrutura de transportes, mantendo a mesma abordagem didática baseada na aplicação prática e no uso de ferramentas digitais em cenários reais.

É importante ressaltar que os materiais produzidos não substituem o ensino teórico referente ao planejamento de rodovias, parâmetros normativos e fundamentos de projeto geométrico. Pelo contrário, funcionam como complemento prático, permitindo que os estudantes apliquem o conhecimento teórico já adquirido em situações simuladas de projeto. Essa integração entre teoria e prática foi fundamental para potencializar a aprendizagem e aproximar os discentes da realidade profissional.

Por fim, destaca-se a importância de seguir aprimorando os materiais e acompanhando a evolução dos *softwares* utilizados, bem como garantir que os alunos tenham acesso adequado às tecnologias necessárias para o seu uso. Também se recomenda a adoção de instrumentos avaliativos mais sistemáticos, como questionários de percepção e desempenho, com o objetivo de aprofundar a análise dos impactos pedagógicos da proposta. Acredita-se que esse tipo de iniciativa pode ser adaptado e aplicado em outras instituições de ensino e disciplinas da área de transportes, respeitando as particularidades curriculares e contextuais de cada realidade.

Agradecimentos
Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processo 305384/2025-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Belisário, A. B.; D. G. Faria; D. H. de S. Chaves; G. M. de Almeida e M. Cardoso (2020) Relatos de experiência de inserção de tecnologias digitais no ensino de Engenharia. *Revista Docência do Ensino Superior*, *10*, 1–18. doi:10.35699/2237-5864.2020.15139.

Borçato, A. G.; C. Hackbarth e N. Damaceno Aguida Melo (2022) Uso de softwares no processo de ensino-aprendizagem dos cursos de engenharia civil da educação profissional e tecnológica. *Revista Extensão & Cidadania*, *10*(17), 84–100. doi:10.22481/recuesb.v10i17.10524.

Fonseca, L. P. G. e J. E. da Silva (2023) Ferramentas Digitais de Apoio ao Ensino de Projeto Arquitetônico e Desenho Técnico no Ensino Remoto. *EaD em Foco*, *13*(1), e2080. doi:10.18264/eadf.v13i1.2080.

Garcia, D. S. P.; C. T. Nodari; J. F. Albano; M. A. Wandscheer; F. F. F. dos Santos; C. L. Andriola; C. P. Demore e T. K. Lanes (2017) Projeto ponto de partida: o ensino de projetos de rodovias através de uma abordagem lúdico-real-didática. *Transportes*, *25*(3), 135. doi:10.14295/transportes.v25i3.1327.

Leal, B. M. F. (2019) BIM no ensino de tecnologia da construção. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, *10*, e019027. doi:10.20396/parc.v10i0.8653550.

Marques, S. T. e Faria Filho, R. F. (2022) Estudo do software livre QGIS no desenvolvimento do projeto geométrico de rodovias. *Revista de Engenharia Civil IMED*, *8*(2), 69. doi:10.18256/2358-6508.2021.v8i2.4373.

Morais, I. B. de A.; O. Vendrametto e G. C. G. Carvalho (2021) Formação de um profissional inovador com a utilização de metodologias de aprendizagem ativa: avaliação da intervenção. *Research, Society and Development*, *10*(17), e119101724150. doi:10.33448/rsd-v10i17.24150.

Renosto, A. F.; L. P. Antunes, E. M. Somavilla e A. Ruiz-Padillo (2021) Estudo das percepções de docentes e discentes sobre a aplicação de metodologias ativas em disciplinas de graduação em Engenharia Civil. *Educitec - Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico*, *7*, e170921. doi:10.31417/educitec.v7.1709.

Leonardo Pereira Morini (leonardo.morini@acad.ufsm.br)
Luísa Vilanova Marques (luisa.marques@acad.ufsm.br)
Helena Karagrigoriou Galanos (helena.karagrigoriou@acad.ufsm.br)
Paula Sandri Rhoden (paula.sandri@acad.ufsm.br)
Daniel Presta Sergio García (daniel.garcia@ufrgs.br)
Sílvio Lisboa Schuster (silviolschuster@ufsm.br)
Alejandro Ruiz-Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria,
Av. Roraima, n° 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

Educação mediada por tecnologia

Relatórios de teses e dissertações em andamento



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA O ENSINO E APRENDIZAGEM EM ENGENHARIA

João Pedro Davoli, Cira Souza Pitombo
Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO
O presente estudo, de mestrado em andamento, propõe avaliar o uso de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) e percepções relativas à sua aplicação no ensino e aprendizagem em engenharia, através de um procedimento composto por duas etapas principais. A primeira etapa consistirá em um levantamento de dados, via questionário *online*, com o objetivo de coletar informações sobre o uso de ferramentas de IA entre estudantes de graduação em engenharia e realizar uma análise exploratória dos dados a fim de investigar frequência e qualidade de uso de IA, percepções e desempenho acadêmico formal e não formal. A segunda etapa consistirá no desenvolvimento e aplicação de um experimento, na forma de atividade avaliativa, que combina o método de Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) com o auxílio de ferramentas de IA, buscando avaliar a percepção dos alunos e possíveis benefícios associados ao uso da tecnologia. O experimento encontra-se em andamento em uma disciplina de graduação.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O atual cenário da educação superior apresenta novos desafios decorrentes do aumento da velocidade das informações e do rápido avanço da tecnologia. No intuito de tornar a experiência de aprendizagem mais interativa e interessante ao estudante, surgem as metodologias ativas de ensino-aprendizagem. Tais metodologias têm como principal característica atribuir o protagonismo ao estudante em seu processo de aprendizagem, cabendo ao educador a função de orientador ou facilitador do processo (Bonwell e Eison, 1991; Dale, 1969). Não diferente para o aspecto tecnológico, o processo de ensino-aprendizagem vem sofrendo influência da inserção de tecnologias inovadoras, como as ferramentas de inteligência artificial (IA). Entre outras maneiras, pode-se definir IA como a aplicação de métodos que simulam o comportamento inteligente para a resolução de problemas complexos (Coppin, 2004).

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal investigar os usos e as percepções de estudantes de engenharia quanto à aplicação de ferramentas de IA para fins de ensino-aprendizagem. Além disso, têm-se como objetivos específicos:

- Identificar padrões de utilização das ferramentas de IA por estudantes de graduação em engenharia;
- Avaliar a percepção dos alunos, antes e depois de uma atividade avaliativa proposta com o uso conjunto de metodologias ativas (Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP)) e ferramentas de IA.

3. REVISÃO PRELIMINAR DA LITERATURA

As metodologias ativas de ensino-aprendizagem são diversas, cada qual com abordagens e objetivos distintos, tais como: Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP), Aprendizagem Baseada em Equipe (ABE), sala de aula invertida, ensino sob medida, gamificação, entre outras. Apesar de serem particulares nos métodos, abordagens e objetivos, todas essas metodologias compartilham a ideia central de protagonismo do educando e buscam engajar os estudantes de forma ativa no processo de aprendizagem. Nesse sentido, muitos trabalhos ressaltam melhorias importantes com a adoção de tais técnicas, como aumento da participação e interação dos alunos, aumento das notas nas avaliações e melhoria nos hábitos de estudo (Crouch e Mazur, 2001; Marrs e Novak, 2004; Dichev e Dicheva, 2017; Carvalho et al., 2022).

As ferramentas de IA quando associadas ao processo de ensino e aprendizagem dão suporte ao aluno ao permitir criar experiências de aprendizagem personalizadas (Furman, 2024), auxiliar em tarefas específicas, como programação (Bravo e Cruz-Bohorquez, 2024) e dar suporte para o uso de metodologias ativas (Slomp et al., 2024). Estudos também apontam impactos positivos da tecnologia em aspectos psicológicos dos alunos, como aumento da motivação (Zhang, 2024) e diminuição da ansiedade (Gao, 2024). Embora o implemento de ferramentas de IA no ensino em engenharia traga diversos benefícios, tanto para educadores quanto para estudantes, é importante reconhecer que seu uso também traz desafios. Alguns desafios enfrentados estão relacionados à falta de instrução dos educadores, respostas equivocadas das ferramentas, respostas enviesadas e limitações técnicas (Santos e S. Junior, 2024).

4. MÉTODO ADOTADO

O procedimento metodológico adotado se divide em duas atividades principais: um questionário *online* para a avaliação do uso de ferramentas de IA por estudantes de engenharia para fins de aprendizagem e uma atividade avaliativa, baseada em Aprendizagem Baseada em Problemas (APB) com o uso de ferramentas de IA.

Na primeira etapa do estudo, foi elaborado um questionário, destinado a estudantes de graduação de cursos de engenharia da Escola de Engenharia de São Carlos, dividido em três seções: perguntas gerais; familiaridade e frequência de uso das ferramentas de IA; e percepções do uso de IA para fins de aprendizagem. A primeira seção foi composta por perguntas relacionadas a informações do perfil do estudante, enquanto as seções subsequentes tratarão efetivamente das perguntas relacionadas à IA. O questionário foi submetido à análise do Comitê de Ética e, uma vez aprovado, será divulgado via *email* aos estudantes de engenharia da unidade. As respostas coletadas, durante o período de aplicação do questionário, serão analisadas com o objetivo de identificar padrões de uso e percepções que possam estar relacionadas ao perfil do estudante, características socioeconômicas e indicadores de desempenho e engajamento em atividades acadêmicas.

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento e aplicação de uma atividade baseada em ABP com a proposta do uso de ferramentas de IA. Antes do início de tal atividade, os alunos participantes do experimento responderam ao questionário descrito na primeira etapa do estudo. A atividade foi dividida em três etapas: identificação da situação problema e proposição de três alternativas de solução; análise financeira das alternativas; e análise multicritério das alternativas. A cada etapa finalizada, os alunos apresentaram um resumo do trabalho com as principais soluções encontradas, identificando aplicações de IA utilizadas, para a avaliação do projeto de forma continuada. Os problemas analisados na atividade estão relacionados a temáticas importantes, associadas à mobilidade, tais como “descarbonização”, “mototáxi e segurança viária”, “transporte público”, etc. Após a apresentação final da atividade, o trabalho foi avaliado e, durante a devolutiva da atividade, os alunos participaram de uma entrevista onde foram questionados sobre os impactos da experiência proposta na aprendizagem e na influência da atividade com relação às percepções e mudanças no uso de ferramentas de IA para fins de aprendizagem. Além das informações coletadas na entrevista, os alunos também responderam ao questionário novamente ao fim do experimento, a fim de comparar as respostas fornecidas no questionário aplicado antes e depois do desenvolvimento da atividade. A Figura 1 apresenta o método adotado para ambas as etapas principais através do fluxograma.

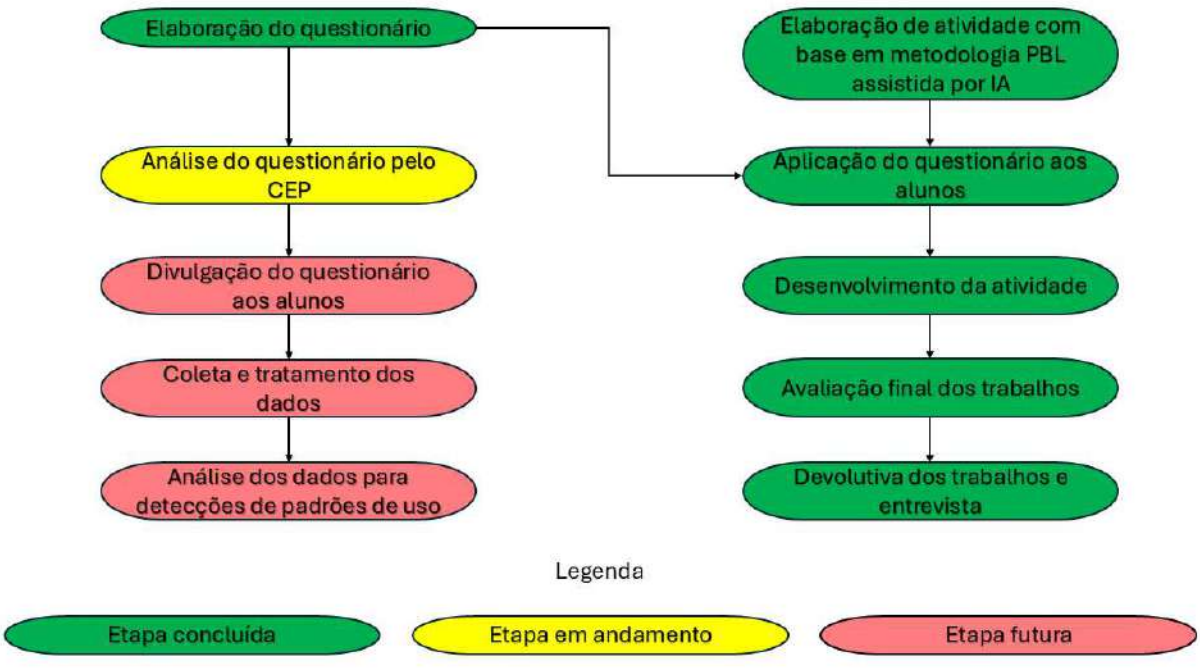


Figura 1: Fluxograma do método proposto

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como principais contribuições, espera-se que, através dos resultados obtidos, haja a elaboração de diretrizes que direcionem o uso eficiente e responsável de tais ferramentas para fins de aprendizagem, implementando o seu uso de forma a automatizar tarefas repetitivas e não limitar a criatividade dos estudantes.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta pesquisa foi apoiado pelo CNPq (processo 305973/2023-1) e pela Capes (processo 88887.957727/2024-00).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bonwell, C. e J. Eison, (1991) Active learning: Creating Excitement in the Classroom. ASHE-ERIC, Higher Education Report n. 1. Washington, DC: George Washington University.

Bravo, F. A., E Cruz-Bohorquez, J. M. (2024) Engineering Education in the Age of AI: Analysis of the Impact of Chatbots on Learning in Engineering. Education Sciences, 14(5), 484. DOI: 10.3390/educsci14050484

Carvalho, M.U., Pitombo, C.S., Pedreira Júnior, J. U. e De Souza, F.L.U. (2022) Experiências associadas ao uso de metodologias ativas de aprendizagem no ensino remoto emergencial, Revista de Ensino de Engenharia, 41: p 540-553. DOI: 10.37702/REE2236-0158.v41p540-553

Coppin, B. (2004) Artificial intelligence iluminated. 1. ed. Boston: Jones and Barlett Publishers.

Crouch, C. e E. Mazur, (2001) Peer Instruction: Ten Years of Experience and Results. American Journal of Physics, v. 69, p. 970–977.

Dale, E. (1969) Audiovisiual methods in teaching. 3. ed. New York: Holt, Reinhart & Winston.

Dichev, C. e D. Dicheva (2017) Gamifying education: what is known, what is believed and what remains uncertain: a critical review. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 14 (1), 9.

Furman, G. D. (2024) Enhancing Engineering Education: The Role of Artificial Intelligence in Personalizing Learning and Outcomes. 4th International Conference on Big Data Engineering and Education (BDEE), p. 61-65. DOI: 10.1109/BDEE63226.2024.00018

Gao, S. (2024) Can Artificial Intelligence Give a Hand to Open and Distributed Learning? A Probe into the State of Undergraduate Students' Academic Emotions and Test Anxiety in Learning via ChatGPT. The International Review of Research in Open and Distributed Learning, DOI: 10.19173/irrodl.v25i3.7742.

Marrs, K. e G. Novak (2004) Just-in-Time Teaching in Biology: Creating an Active Learner Classroom Using the Internet. Cell Biology Education, v. 3, p. 49-61.

Santos, S. e S. Junior, G. (2024) Opportunities and Challenges of AI to Support Student Assessment in Computing Education: A Systematic Literature Review. Proceedings of the 16th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU), vol. 2, p. 15-26. DOI: 10.5220/0012552500003693.

Slomp, E. M., Ropelato, D., Bonatti, C. E Da Silva, M. D. (2024) Adaptive Learning in Engineering Courses: How Artificial Intelligence (AI) Can Improve Academic Outcomes. IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE), p. 1-6. DOI: 10.1109/EDUNINE60625.2024.10500580.

Zhang, Z. (2024) Research on the impact of artificial intelligence on college students' learning. Computer Life, 12(3), 23-25. DOI: 10.54097/0mwt0e03 .

João Pedro Davoli (joaopdavoli@usp.br)
Cira Souza Pitombo (cirapitombo@usp.br)
Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
Av. Trabalhador São Carlense, 400 - São Carlos - SP, Brasil.

Acompanhamento dos estudantes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ANÁLISE COMPARATIVA DA EVASÃO NOS CURSOS DE ENGENHARIA CIVIL E TECNOLOGIA EM ESTRADAS DO IFCE *CAMPUS* FORTALEZA

Ligia Holanda Barbosa[1], **Kevin Cristian Paulino Freires** [2], **Otávio José de Freitas Gomes**[3], **Ingryd Capistrano Pinto Tavares**[1]
[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, [2]Facultad Interamericana de Ciencias Sociales, [3]Universidade Federal do Ceará

RESUMO
A engenharia de transportes é uma área estratégica, sendo a formação superior realizada, em grande parte, nos cursos de Engenharia Civil. Contudo, a evasão acadêmica tem dificultado a formação de novos profissionais. Este artigo investiga a evasão no curso de Engenharia Civil do Instituto Federal do Ceará – *campus* Fortaleza, em comparação ao curso de Tecnologia em Estradas. A metodologia envolveu análise documental com dados de ingressantes entre 2012.2 e 2025.1, além da revisão bibliográfica. Os resultados indicam evasão de 41,1% no curso de Engenharia Civil, índice inferior à média nacional entre 2001 e 2011 (50%) e à evasão do curso de Tecnologia em Estradas (64,4%). Durante a COVID-19 o curso de Engenharia Civil registrou sua maior taxa de evasão (64,7% em 2021.1) e, no geral, o abandono foi predominante. Conclui-se que há necessidade de incorporar novas tecnologias na grade curricular e ampliar investimentos em bolsas de iniciação científica.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A qualificação profissional tem sido impactada por transformações decorrentes da globalização e pelas exigências do mercado de trabalho. No campo da Engenharia, observa-se a necessidade de formação contínua para suprir demandas operacionais da sociedade (Godoy e Almeida, 2020).

A educação em engenharia no Brasil enfrenta desafios relacionados à incorporação de tecnologias e à formação de profissionais com domínio técnico adequado às novas exigências do setor. A ausência de adaptação a esse cenário compromete o progresso científico e tecnológico do país (Borges e Almeida, 2013). Soares (2024) destaca que a ciência de dados é um atrator de jovens pesquisadores e ainda pontua que, com as novas Diretrizes Nacionais Curriculares (DNCs), há uma oportunidade de integrar explicitamente a área de Engenharia Civil com áreas básicas, incluindo Computação.

A infraestrutura de transportes exerce papel relevante no desenvolvimento do país ao viabilizar a mobilidade de pessoas e o escoamento de mercadorias. No Brasil, o transporte rodoviário concentra a maior parte do transporte de cargas e passageiros, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024). A formação de profissionais para esse setor ocorre principalmente em programas de pós-graduação *lato sensu* e *stricto sensu*, sendo que, no nível de graduação, a responsabilidade recai, em grande parte, sobre os cursos de Engenharia Civil (Silva Jr *et al*., 2023). A evasão no ensino superior, no entanto, representa um fator que limita a inserção de novos profissionais no mercado (Godoy e Almeida, 2020).

O curso de Tecnologia em Estradas, ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *campus* Fortaleza, é uma formação de nível superior tecnológica direcionada à atuação em obras de infraestrutura rodoviária, projeto de rodovias e dimensionamento de pavimentos. O currículo contempla conteúdos relacionados ao planejamento, execução e restauração de rodoviárias, terraplanagem, entre outros. O estudo de Barbosa *et al*. (2024) examinou a evasão nesse curso entre os semestres 2007.2 e 2022.1, identificando o abandono como a forma mais recorrente. Dificuldades em disciplinas da área de exatas, como Cálculo I e II, foram as principais causas apontadas como motivo mais recorrente para evasão.

Diante da taxa média de evasão nos cursos de engenharia no Brasil entre 2001 e 2011 (cerca de 50%, segundo Freitas *et al*., 2017), da concentração da formação na área de transportes nos cursos de Engenharia Civil e da atuação limitada de instituições de ensino na capacitação de profissionais para o setor, especialmente em contextos urbanos (Silva Jr et al., 2023), torna-se relevante a compreensão das formas de evasão dos cursos que formam profissionais na área de transportes. Neste sentido, este artigo tem como objetivo investigar as ocorrências de evasão no curso de Engenharia Civil, por meio de uma análise comparativa com o curso de Tecnologia em Estradas, ambos vinculados ao Departamento de Construção Civil do IFCE – *campus* Fortaleza.

2. METODOLOGIA

A revisão de literatura foi conduzida com base em publicações acadêmicas disponibilizadas nas plataformas Google Acadêmico, *Oasis* e *Scielo*, com o objetivo de fundamentar teoricamente a pesquisa. Essa etapa permitiu a aplicação da triangulação de dados, entendida como o exame do fenômeno investigado a partir de diferentes ângulos e fontes, o que conferiu maior confiabilidade aos achados e reduziu possíveis vieses na construção do referencial teórico. O *corpus* da investigação é composto por dados referentes a 952 estudantes que ingressaram no curso de Engenharia Civil do IFCE – *campus* Fortaleza –, entre os semestres 2012.2 e 2025.1. As informações foram obtidas junto à Coordenação de Controle Acadêmico (CCA) da instituição, em formato de planilha, sendo tratadas e analisadas por meio do *software* Excel.

Como o curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFCE – *campus* Fortaleza iniciou em 2012.2, os dados relativos a este curso iniciaram no respectivo semestre, diferentemente do curso de Tecnologia em Estradas, que iniciou em 2007.2 – o que possibilitou Barbosa *et al*. (2024) fazerem uma análise com dados em um intervalo de tempo maior (até 2022.1). Assim, para a realização deste estudo, foram considerados dados de: 952 ingressantes entre 2012.2 e 2025.1 no curso de engenharia civil; 758 ingressantes no curso de Tecnologia em Estradas entre 2012.2 e 2022.1; e, ao fazer comparações entre os dois cursos, foram considerados apenas os dados dos estudantes que ingressaram no período compreendido entre 2012.2 e 2022.1 (721 estudantes do curso da engenharia). Os registros analisados incluem variáveis como nome, número de matrícula, situação acadêmica, entre outros dados relevantes à análise da trajetória estudantil. Os dados do curso de Tecnologia em Estradas para uso de comparação foram apresentados por Barbosa *et al*. (2024).

3. RESULTADOS

De acordo com Pereira *et al*. (2022) e Barbosa *et al*. (2024), os tipos de evasão acadêmica podem ser classificados em: (i) abandono; (ii) cancelamento voluntário; (iii) cancelamento compulsório; (iv) trancamento de matrícula; (v) transferência externa; e (vi) transferência interna. Segundo informações da CCA do IFCE – *campus* Fortaleza, o abandono ocorre em duas situações: quando o estudante não realiza a renovação da matrícula por dois semestres consecutivos ou quando mantém a matrícula trancada por mais de quatro semestres. O cancelamento compulsório refere-se à perda da matrícula por excesso de faltas. O cancelamento voluntário decorre de solicitação formal do próprio estudante para desligamento do curso. As transferências interna e externa referem-se, respectivamente, à mudança de curso dentro da instituição e à migração para outra instituição de ensino.

A Figura 1a apresenta os dados referentes à evasão no curso de Engenharia Civil. O número de discentes ingressantes por semestre variou entre 25 e 51 com flutuações ao longo dos anos. Apesar da oscilação na evasão dos estudantes no curso de engenharia, observa-se que há semelhança ao curso de Tecnologia em Estradas (Barbosa *et al*., 2024) (Figura 1b), sobretudo na tendência de diminuição no número de evasão. Quanto a evasão, sua principal forma é o abandono, seguida pelo cancelamento voluntário (Figura 2), também semelhante ao curso de Tecnologia em Estradas para o período entre 2012.2 e 2022.1 (Barbosa *et al*., 2024). Entretanto, durante os últimos 2 anos o abandono registrou uma queda gradual.

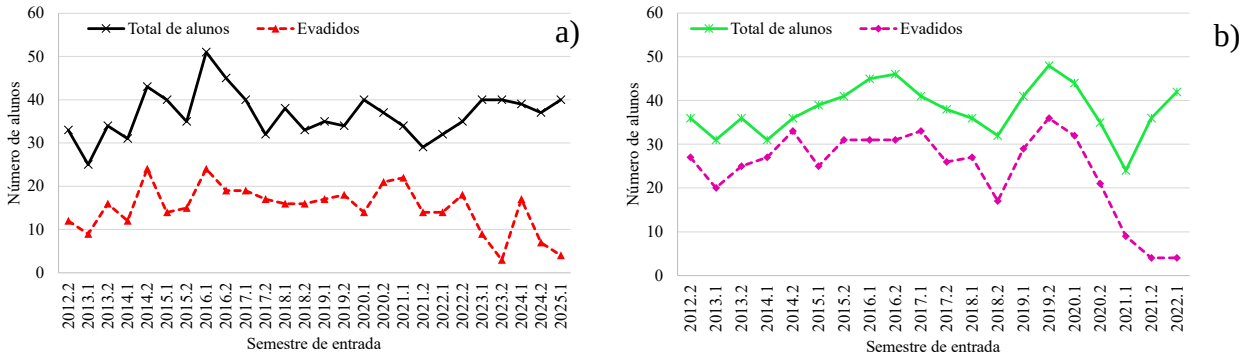


Figura 1: Dados de evasão. a) Engenharia Civil e b) Tecnologia em Estradas

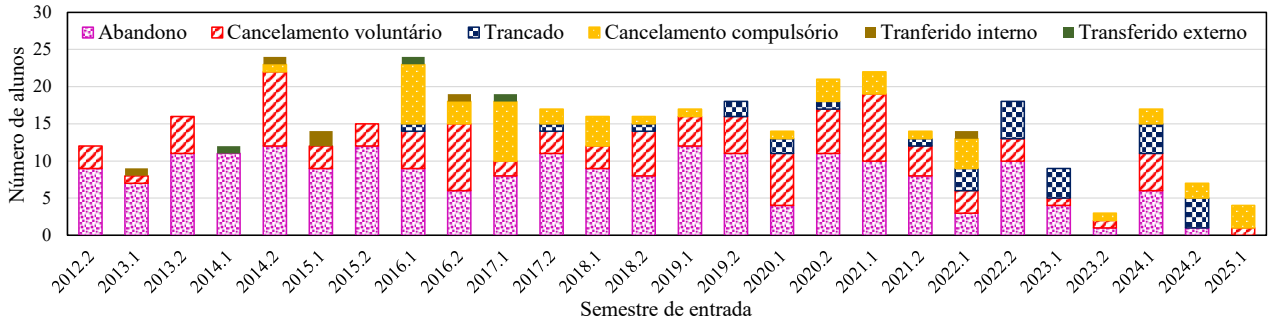


Figura 2: Formas de evasão no curso de Engenharia Civil

Os maiores índices de evasão no curso de Engenharia Civil do IFCE foram registrados nos semestres 2020.2 (56,8%) e 2021.1 (64,7%), coincidindo com o período da pandemia de COVID-19 e a transição para o ensino remoto. Esse contexto representou um obstáculo adicional para os estudantes, que enfrentaram dificuldades de adaptação às novas metodologias de ensino, acesso limitado a recursos tecnológicos e instabilidade emocional. Diversos estudos indicam que esse cenário contribuiu para o agravamento das taxas de evasão nas instituições de ensino superior (Bardach *et al*., 2020; García-Alberti *et al*., 2021).

A Figura 3a apresenta a distribuição proporcional das diferentes formas de evasão no curso de Engenharia Civil. A modalidade mais recorrente é o abandono, representando mais da metade dos casos (51,92%). Em seguida, destacam-se o cancelamento voluntário (26,09%) e o cancelamento compulsório (12,28%). O trancamento de matrícula (7,42%), a transferência interna (1,53%) e a transferência externa (0,77%) ocorrem com menor frequência.

A Figura 3b ilustra a situação acadêmica dos discentes do semestre 2012.2 ao semestre 2025.1. Do total de estudantes que ingressaram no curso entre 2012.2 e 2025.1, 31,2% (297) permaneceram regularmente matriculados, enquanto 27,7% (264) concluíram a graduação. A taxa de evasão corresponde a 41,1% (391), percentual inferior ao identificado por Barbosa *et al*. (2024) no curso de Tecnologia em Estradas, cuja evasão supera a metade dos matriculados (65,8%), considerando de 2007.2 a 2022.1, e 64,4% entre 2012.2 e 2022.1.

Embora o índice de evasão no curso de Engenharia Civil esteja abaixo da média observada nos cursos de engenharia entre 2001 e 2011 (50%) (Freitas *et al*., 2017), o mesmo ainda se mostra superior à média geral de evasão no ensino superior brasileiro entre 2001 e 2005 (22%) e menor ao registrado nas universidades públicas (60%) (Reis *et al*., 2012).

Estudo da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), realizado em 2007, revelou que, apesar de 450 mil candidatos terem disputado 198 mil vagas em cursos de engenharia nos vestibulares em todo o país, apenas 115 mil foram efetivamente preenchidas, resultando em 83 mil vagas ociosas (Reis *et al*., 2012). Esses dados indicam que, apesar da elevada demanda inicial, os cursos de Engenharia e Construção continuam a apresentar taxas expressivas de evasão (apesar da diminuição, como mostra a Figura 1a), o que evidencia a necessidade de medidas estruturais voltadas à permanência e ao sucesso acadêmico dos estudantes.

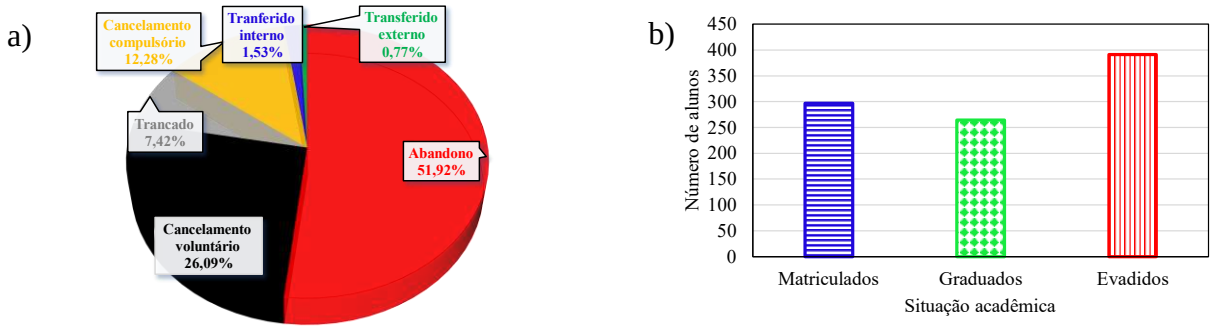


Figura 3: Situação dos estudantes do curso de Engenharia Civil. a) Proporção de cada forma de evasão. b) Distribuição dos alunos no curso entre 2012.2 e 2025.1

A Figura 4a apresenta a distribuição percentual dos estudantes do curso de Engenharia Civil do IFCE por sexo, enquanto a Figura 4b detalha a participação feminina ao longo dos semestres analisados. Observa-se predominância do sexo masculino, que representa 72,12% do total de matriculados. Embora a presença de homens seja historicamente superior nos cursos de engenharia, estudos indicam um crescimento gradual da participação feminina. De acordo com Oliveira e Maia (2021), entre 2014 e 2016 houve um aumento de 8,4% na matrícula de mulheres em cursos de graduação na área.

No caso específico do curso de Engenharia Civil do IFCE – *campus* Fortaleza, a presença feminina apresenta oscilações ao longo dos semestres, variando entre 7,5 e 51,7%. Entre 2014 e 2016, não se observou uma tendência clara de crescimento, diferentemente do padrão nacional. No entanto, entre os semestres 2020.2 e 2023.1, observaram-se taxas mais elevadas de ingresso feminino, com destaque para 2021.2, quando, pela primeira vez entre os períodos analisados, a taxa de ingresso de mulheres (51,7%) superou a dos homens, representando mais da metade dos ingressantes.

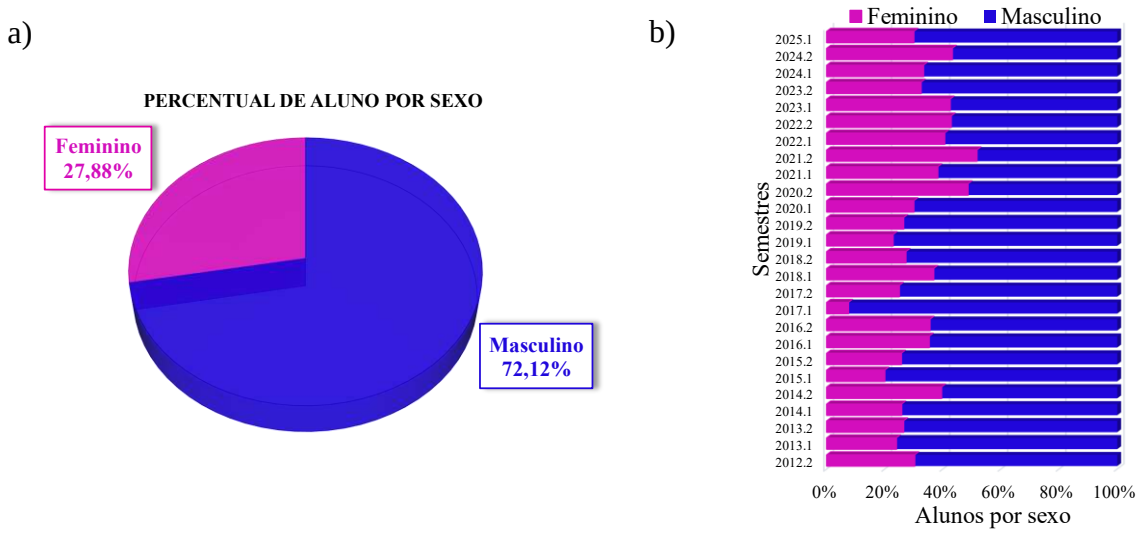


Figura 4: Panorama da situação dos estudantes por sexo

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou a evasão no curso de Engenharia Civil do IFCE – *campus* Fortaleza, com base em dados acadêmicos referentes ao período de 2012.2 a 2025.1. A investigação teve como foco não apenas caracterizar os padrões de evasão, mas também compará-los com os do curso de Tecnologia em Estradas da mesma instituição, dada a relevância estratégica da formação de profissionais para o setor de transportes, especialmente em contextos urbanos. Os resultados mostraram o abandono como principal forma de evasão em ambos, mas com menor índice na Engenharia Civil, que também registrou maior proporção de concluintes (27,7% para e Engenharia e 8,6% para o curso de Estradas). Essa diferença pode refletir o maior prestígio e as oportunidades associadas ao título de engenheiro em relação à formação tecnológica.

A contribuição central deste artigo reside em evidenciar e investigar as ocorrências de evasão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil do IFCE – *campus* Fortaleza, que tem impacto direto na formação de profissionais qualificados para atuar na área de infraestrutura de transportes – setor importante ao desenvolvimento socioeconômico e à competitividade nacional. Ao identificar padrões de evasão e suas possíveis causas, o estudo subsidia o planejamento de políticas institucionais mais eficazes, sugerindo a implementação de novas tecnologias que toquem a área da computação na grade curricular e também investindo em mais programas de iniciação científica, com maior oferta de bolsa, contribuindo com a permanência estudantil e à valorização de cursos estratégicos, como o de Tecnologia em Estradas.

Considerando a importância desses cursos para a formação de capital humano em áreas técnicas e a crescente demanda por soluções de mobilidade e logística, faz-se necessária a adoção de estratégias pedagógicas inovadoras, ações de apoio acadêmico e financeiro, além da reestruturação curricular orientada à realidade do

mercado. Tais medidas podem reduzir os índices de evasão e ampliar o impacto social e econômico desses cursos, fortalecendo a formação de profissionais alinhados às demandas modernas da infraestrutura nacional.

Como sugestão de trabalhos futuros, o presente artigo orienta que este estudo seja ampliado para que sejam observadas as formas de evasão de cursos de Engenharia Civil de outros *campi*, podendo ainda contemplar a investigação de cenário de outras instituições de impacto, como a Universidade Federal do Ceará. Sugere-se ainda que os próximos estudos possam incorporar também dados temporais socioeconômicos das regiões onde os cursos de Engenharia civil são ofertados, para entender como estes fatores se associam à evasão. Por fim, é recomendado também que sejam feitas consultas com formulários para entender os principais motivos associados às evasões, formando assim uma análise qualiquantitativa.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pela disponibilização dos dados e à professora da instituição Juceline Bastos pela participação ativa no desenvolvimento deste trabalho. Os autores agradecem ainda ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo fomento à pesquisa por meio da disponibilização de bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, L. H.; K. C. P Freires e J. B. S Bastos (2024) Investigação da evasão no curso de estradas do IFCE/Fortaleza. *In: Anais do 38º Congr. Pesquisa e Ensino em Transportes, 2024, Florianópolis. Galoá.* Disponível em: https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/investigacao-da-evasao-no-curso-de-estradas-do-ifcefortaleza?lang=pt-br (acesso em: 30/06/2025).

Bardach, L.; M. Lüftenegger.; S. Lüftenegger.; C. Spiel e B. Schober (2020) Context-related problems and university students' dropout intentions - the buffering effect of personal best goals. *European Journal of Psychology of Education*, n. 35, p. 477-493. DOI: 10.1007/s10212-019-00433-9.

Borges, M. N. e N.N de Almeida (2013) Perspectivas para engenharia nacional: desafios e oportunidades. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 32, n. 3, p. 71-78.

CNT (2024) Relatório Gerencial: Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Brasília, Confederação Nacional do Transporte.

Freitas, B. A. de.; E. C. A. C. da Costa e C. P. da Costa (2017) Fatores da evasão discente no curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba. *Revista Principia*, v. 1, n. 34, p. 69–76. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n34p69-76.

García-Alberti, M.; F. Suárez.; I. Chiyón e J. C. M. Feijoo (2021) Challenges and Experiences of Online Evaluation in Courses of Civil Engineering during the Lockdown Learning Due to the COVID-19 Pandemic. *Education Science*, v. 11, n. 2, p. 59. DOI: 10.3390/educsci11020059.

Godoy, E. V e E. Almeida (2020) Evasão nos cursos de engenharia: um olhar para os trabalhos do COBENGE de 2000 a 2014. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, v. 13, n. 3. DOI: 10.3895/rbect.v13n3.8583.

Oliveira, C. B. de.; C. L. Maia (2021) Análise sobre a evasão feminina no curso de engenharia civil da Ufc campus Russas Analysis of female evasion in the civil engineering course of UFC campus Russas. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n.11, p. 105900-105909. DOI: 10.34117/bjdv7n11-294.

Pereira, V. R. F.; C. O. e K. C. P. Freires (2022) Evasão e retenção: uma análise sobre o curso de licenciatura em matemática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Fortaleza. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 2, p. 15-57. DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/educacao/curso-de-licenciatura.

Reis, V. W.; P. J. M. Cunha e I. M. P. A. Spritzer (2012) Evasão no ensino superior de engenharia no Brasil: um estudo de caso no CEFET/RJ. *In Anais do XL Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*. Pará: COBENGE. DOI: 10.37423/210403804.

Silva Jr., C. A. P. da.; H. B. Fontenele e A. N. R da Silva (2013) Estilos de ensino *versus* estilos de aprendizagem no processo de ensino aprendizagem: uma aplicação em transportes. *Transportes*, v. 21, n. 2, p. 30-37. DOI: 10.4237/transportes.v21i2.686.

Soares, J. B (2024) Reflexões sobre aplicações de Inteligência Artificial: modelos físicos e modelos baseados em dados como paradigmas de pesquisa na infraestrutura viária. *Transportes*, v. 32, n. 3, p. 30-45. DOI: 10.58922/transportes.v32i3.3045.

Ligia Holanda Barbosa (ligia.holanda.barbosa62@aluno.ifce.edu.br)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará *campus* Fortaleza, Departamento de Construção Civil, Av. Treze de Maio, 2081, Benfica, Fortaleza, CE, Brasil

AUTOCONSCIÊNCIA, AUTOLIDERANÇA E COMPETÊNCIAS TRANSVERSAIS: UM ESTUDO COM ESTUDANTES DE ENGENHARIA DA MOBILIDADE

Lílian Barros Pereira Campos[1], **Janaína Antonino Pinto**[2], **Roger Júnio Campos**[1]
[1]Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira, [2]Universidade Estadual de Campinas

RESUMO
O exercício da Engenharia da Mobilidade exige um perfil profissional dotado não só de competências técnicas específicas, mas também de competências transversais (CTs), tais como comunicação, inovação e criatividade. Diante disso, uma prática efetiva para a formação integral do estudante envolve abordagens reflexivas que promovam a autoconsciência e a autoliderança dos estudantes. Neste contexto, o presente artigo analisa relatos de 28 estudantes de Engenharia da Mobilidade que participaram de uma prática formativa baseada na autoavaliação de CTs e na elaboração de planos de melhoria personalizados. Foi identificado que as principais barreiras para o desenvolvimento de CTs incluem fatores emocionais, falta de tempo, escassez de vivências práticas e limitações contextuais. As estratégias relatadas para superar estas barreiras foram agrupadas em seis categorias: estudo autodirigido, criação de rotinas, definição de objetivos, colaboração entre pares, treinamento ativo e uso de recursos digitais.

1. INTRODUÇÃO

As demandas globais têm levado instituições de ensino em engenharia a repensarem suas práticas pedagógicas, com o objetivo de oferecer experiências de ensino-aprendizagem que tornem o estudante protagonista do próprio processo formativo (Campos *et al*, 2025). No Brasil, um exemplo concreto dessa mudança são as novas Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de Engenharia, publicadas em 2019, que incentivam as universidades a proporcionarem vivências práticas mais efetivas, em articulação com agentes externos e contextos profissionais.

Nesse cenário, docentes e gestores das instituições têm buscado alternativas às práticas tradicionais, por meio da adoção de estratégias de aprendizagem ativa. O modelo convencional, no qual o professor detém o monopólio do saber e o aluno assume um papel passivo na aquisição do conhecimento, vem sendo criticado por sua inadequação às formas de aprendizagem características da Geração Z, que demanda abordagens mais dinâmicas, colaborativas e personalizadas. É neste sentido que a produção de conhecimento e a construção de experiências de aprendizagem reflexivas e que promovam a autoconsciência e a autoliderança têm sido valorizadas (Campos e Pinto, 2023). Neste contexto, o docente não se compromete a trazer respostas prontas, mas se dedica à colocação de perguntas-chave que conduzirão o estudante por um processo de autodescoberta e desenvolvimento profissional.

Esta discussão torna-se o pano de fundo para o presente artigo que tem como objetivo apresentar uma análise sobre as principais barreiras e estratégias que estudantes de Engenharia da Mobilidade relatam no que se refere ao desenvolvimento de suas competências transversais (CTs). 28 estudantes de Engenharia da Mobilidade participaram de uma prática de autoconsciência e autoliderança na qual eles fizeram a autoavaliação das CTs e a elaboração de um plano de melhoria que levou em conta as principais barreiras para o desenvolvimento das CTs e pela definição de estratégias para desenvolvê-las. A atividade foi realizada durante a disciplina de Administração na Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira e envolveu dados de estudantes matriculados no período de 2023 a 2025. Destaca-se que esse estudo de caso faz parte do projeto "Desenvolvimento de Competências Transversais (CTs) na Engenharia" registrado na Plataforma Brasil (CAAE: 61376922.70000.5094).

2. AUTOCONSCIÊNCIA, AUTOLIDERANÇA E DESENVOLVIMENTO DAS COMPETÊNCIAS TRANSVERSAIS

Oferecer experiências de aprendizagem que considerem a dimensão humana do ambiente de trabalho é um dos maiores desafios no ensino de engenharia é. Nesse campo, os desafios não podem ser enfrentados apenas com conhecimento específico. A natureza interdisciplinar da engenharia e a complexidade dos problemas atuais exigem profissionais com experiências, conhecimentos, perspectivas e habilidades diversas (Joslyn e Hynes, 2016).

Por esse motivo, as chamadas competências transversais (CTs) têm um papel fundamental na formação dos engenheiros (Campos e Pinto, 2023). Essas competências são consideradas transversais, pois vão além das disciplinas específicas e estão fortemente ligadas à prática profissional (Lima *et al*., 2017). Na literatura, essas

competências recebem diversas denominações, como "genéricas", "transferíveis" ou "dinâmicas" (Halász e Michel, 2011). Assim, entende-se que as CTs são capacidades mais amplas exigidas no mundo do trabalho, envolvendo atitudes e comportamentos que auxiliam o indivíduo a aplicar seus conhecimentos em diferentes situações, sendo essenciais para a vida profissional (Lima *et al*., 2017). Diversos estudos apontam uma lista de CTs desejáveis para engenheiros, tais como: comunicação, criatividade, inovação, adaptabilidade, organização, resolução de problemas, resiliência, proatividade, trabalho em equipe, entre outras (Campos e Pinto, 2023). Nesse contexto, os estudantes de engenharia devem ser apoiados não apenas no desenvolvimento de suas competências específicas, mas também no aprimoramento de suas CTs.

Diante disso, como afirma Eurich (2018), a autoconsciência é considerada uma metacompetência que deve ser desenvolvida antes do aprimoramento das demais CTs. Para esta autora, o indivíduo que tem uma maior consciência de si, amplia sua capacidade de identificar como aprimorar as demais competências transversais. Seguindo esta visão apresentada por Eurich (2028), é necessário que o estudante conheça suas próprias dimensões internas para que possa desenvolver outras competências. Nesse sentido, a autoconsciência pode ser compreendida como um estado de atenção direcionada para si mesmo e representa o grau em que a pessoa é capaz de articular seus valores pessoais e profissionais, bem como suas crenças sobre papéis e responsabilidades, os quais moldam sua identidade profissional (Cech, 2014).

Abid *et al.,* (2021) argumenta que a autoconsciência antecede a autoliderança no processo de desenvolvimento das CTs. Ou seja, a autoconsciência é o primeiro passo rumo à autoliderança, conduzindo os indivíduos à gestão de comportamentos eficazes e produtivos (Abid *et al.,* 2021). Assim, a autoliderança pode ser entendida como um processo abrangente de influência sobre si mesmo, que envolve a motivação para realizar tanto tarefas motivadoras quanto necessárias, mesmo que não despertem motivação intrínseca (Stewart *et al*., 2019). Bryant e Kazan (2013) observam que os autolíderes desenvolvem um senso de autoconsciência e eficácia, com capacidade de influenciar sua comunicação, suas emoções e seu comportamento.

Woods et al. (2000) sugerem que o desenvolvimento das CTs é mais eficaz quando os estudantes praticam suas CTs, especialmente ao considerar a autoconsciência e a autoliderança como conceitos centrais. Nesse contexto, o papel do professor se distancia do modelo tradicional, no qual o docente é o detentor do saber e responsável por mostrar o comportamento adequado (Masetto, 2018). Em vez disso, o instrutor atua como um orientador, tutor ou *coach*, incentivando os alunos a alcançarem as atitudes e habilidades desejadas, oferecendo *feedback* construtivo durante o processo (Woods *et al.*, 2000).

Woods et al. (2000) propõem que o desenvolvimento de competências transversais (CTs) passa pela identificação das CTs a serem desenvolvidas, sua inclusão no plano de ensino e comunicação clara de sua importância aos alunos. O docente deve ainda promover práticas frequentes e estruturadas para aplicação das CTs, com *feedback* imediato e baseado em critérios objetivos. Ainda, para fortalecer a autoliderança, recomenda-se o incentivo ao monitoramento como um processo metacognitivo de regulação das próprias ações e reflexão crítica sobre experiências anteriores.

3. METODOLOGIA

A pesquisa, de natureza básica e com objetivo exploratório, buscou identificar as principais barreiras e estratégias que estudantes de Engenharia da Mobilidade relatam no que se refere ao desenvolvimento de suas competências transversais (CTs). Os estudantes participantes desta pesquisa eram matriculados em uma disciplina obrigatória de Administração na Universidade Federal de Itajubá – campus Itabira. Os dados foram coletados por meio de formulários eletrônicos nos quais os estudantes responderam questões sobre: a) a frequência de prática das 13 CTs selecionadas a partir da análise do perfil do egresso dos cursos de engenharia envolvidos neste estudo; b) quais CTs os estudantes devem priorizar o desenvolvimento (foi sugerido que cada estudante escolhesse 3 CTs para a elaboração de um plano de melhoria); c)quais as principais barreiras para o desenvolvimento das CTs priorizadas e d) estratégias de desenvolvimento de CTs identificadas e escolhidas pelos estudantes.

As respostas foram analisadas de forma quantitativa e qualitativa. Os dados numéricos, respondidos por 28 estudantes, foram tabulados e analisados por estatística descritiva para identificar a frequência de prática e as CTs mais priorizadas. Os dados textuais, respondidos por 15 estudantes, foram analisados por meio de análise

de conteúdo, com categorização dos relatos e uso de citações diretas para ilustrar as conclusões.

Antes da coleta de dados, o projeto Desenvolvimento de Competências Transversais (CTs) na Engenharia foi apresentado aos estudantes. Nesta oportunidade, as 13 CTs mencionadas nas portarias do Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE) dos cursos de engenharia oferecidos pela UNIFEI – campus Itabira foram apresentadas aos estudantes, a saber: Comunicação oral e escrita, Inovação, Criatividade, Resiliência, Empreendedorismo, Colaboração, Multidisciplinaridade, Organização, Atualização constante quanto a novas tecnologias, Proatividade, Criticidade para resolução de problemas, Ética e humanismo e Propositividade. Assim, o significado de cada CT e exemplos práticos foram apresentados aos estudantes.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise da experiência de desenvolvimento de competências transversais (CTs) realizada com estudantes participantes deste estudo.

Para identificar a frequência de prática das CTs dos estudantes envolvidos no estudo, foram apresentadas 13 afirmações correspondentes a cada CT analisada neste trabalho. Para cada afirmação, os estudantes assinalaram a frenquência de prática das CTS em uma escala *Likert* de 5 pontos sendo: 1- nunca, 2 - raramente, 3 - algumas vezes, 4 - a maioria das vezes e 5- sempre. A Figura 1 apresenta o percentual de estudantes que responderam 4 e 5 para cada questão com o intuito de identificar a diferença de frequência de prática entre as CTs.

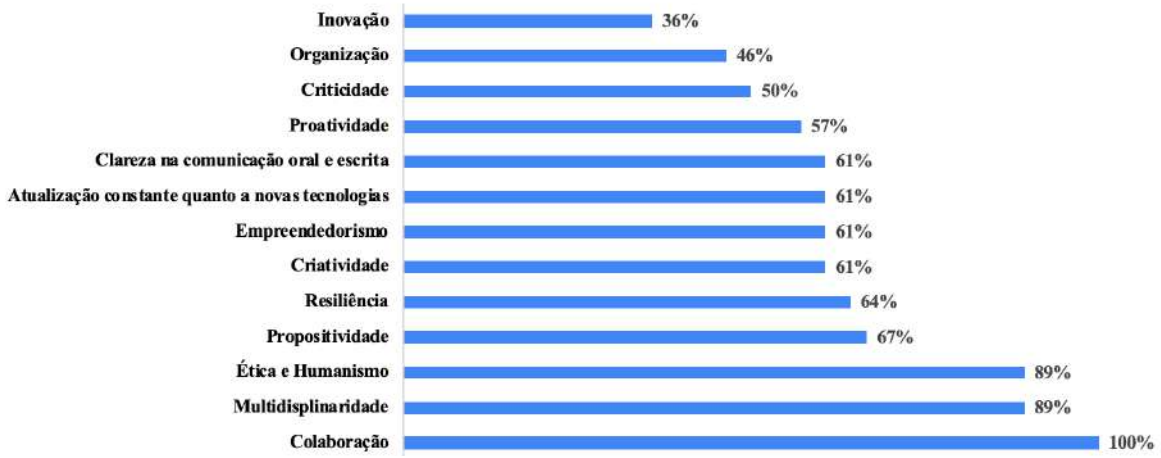


Figura 1: Percentual de estudantes com alta frequência de prática de CT (4 a maioria das vezes e 5 sempre) (n=28)

Conforme representado na Figura 1, as CTs inovação, organização, criticidade e proatividade são as que os estudantes reportam menor frequência de prática, o que pode indicar que estas CTs são mais difíceis de serem praticadas pelos estudantes respondentes. Já as CTs colaboração, multidisciplinaridade, ética e humanismo tiveram percentual de frequência maior, uma vez que mais 89% dos respondentes responderam 4 ou 5 para estas CTs.

Após a etapa de autoavaliação por meio da identificação da frequência de prática das CTs, os estudantes foram convidados a escolher 3 CTs para as quais eles elaboraram um plano de melhoria. Das 13 CTs apresentadas, criatividade, empreendedorismo, organização e comunicação foram as mais escolhidas. Embora inovação e criticidade estejam entre as CTs com menor frequência de prática, elas não foram priorizadas pelos estudantes.

4.1. Principais barreiras no desenvolvimento de CTs

Nesta fase da coleta de dados, aos estudantes foi perguntado quais as principais causas da dificuldade de praticar as CT priorizadas. As respostas foram lidas e categorizadas em quatro grupos: barreiras pessoais ou emocionais, barreiras por falta de tempo ou vivências, barreiras relacionadas ao ambiente/contexto de vida e falta de prática ou formação. A quantificação dos relatos por categoria é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Quantidade de relatos sobre barreiras no desenvolvimento de CT por categoria

Barreiras internas (emocionais e pessoais)	Falta de tempo e de vivências	Barreiras do Ambiente e Contexto	Falta de Prática e Formação
17 (45%)	7 (18%)	5 (13%)	9 (24%)

A maior parte dos relatos dos estudantes (17) mencionou barreiras internas para o desenvolvimento das CTs. A seguir apresenta-se um exemplo de relato sobre as barreiras internas:

> *"Eu preciso ser uma pessoa mais aberta, ainda tenho muito receio, sou uma pessoa muito tímida, isso acaba que atrapalha o meu desenvolvimento."Estudante 1*

A segunda maior categoria de relatos está relacionado à falta de prática e formação sobre as CTs, como relatado pelo Estudante 9:

> *"Uma das principais causas é a falta de prática [da criatividade], pois no cotidiano acaba não sendo tão comumente trabalhado. Falta de diversidade e experiências diferentes vividas. Falta de inspiração também é uma das causas relevantes." Estudante 9*

A terceira categoria de barreiras mais mencionada foi a categoria relacionada à falta de tempo e de vivências nas CTs, como colocado pelo estudante 7:

> *"Por ter muitas coisas para conciliar, matérias, projeto, iniciação científica, além das coisas fora da faculdade, creio que sempre dá pra ser mais organizado e ter um planejamento melhor, a questão é como implementar isso."Estudante 7*

A quarta categoria de relatos menciona as barreiras relacionadas ao ambiente e ao contexto no qual os estudantes vivem:

> *"Cresci e estudei em um ambiente mais convencional, com ênfase em cumprir normas e menos incentivo à experimentação e à criatividade." Estudante 15*

Os relatos desta categoria evidenciam que há estudantes que reconhecem que o ambiente exerce influência sobre o desenvolvimento de CTs. Nestes relatos, os estudantes remeteram ao passado, mas também mencionaram que condições atuais interferem em seu comportamento atual, como dito pelo estudante 2:

> *"Criar uma ideia inovadora pode ser uma tarefa desafiadora em qualquer época, mas atualmente pode ser ainda mais difícil por diversas razões. Em primeiro lugar, vivemos em uma época de grande acesso à informação. Com a internet e as redes sociais, temos acesso a uma enorme quantidade de informações e ideias que já foram propostas e desenvolvidas. Isso pode tornar mais difícil encontrar um nicho ou uma lacuna no mercado que ainda não tenha sido explorada. "Estudante 2*

Analisando as barreiras de desenvolvimento das CTs mencionadas pelos estudantes é possível identificar que há o reconhecimento que trata-se de um processo multifacetado, influenciado não só por aspectos externos mas também internos. Esta etapa de reflexão tem um papel importante na externalização de possíveis barreiras que os estudantes podem ressignificar com vistas ao seu desenvolvimento profissional.

4.2. Estratégias de desenvolvimento de CTs identificadas e escolhidas pelos estudantes

Analisando os relatos sobre as estratégias para o desenvolvimento das CTs foi possível identificar 6 grupos de práticas apontadas pelos estudantes: estudos autodirigidos, criação de hábitos e rotinas, definição de objetivos, aprendizado com os pares, treinamento ativo e uso de recursos digitais e ferramentas *online*.

O primeiro grupo de relatos destacou o estudo autodirigido, com ênfase em livros, vídeos, *podcasts* e tutoriais como fontes para aprimorar criatividade, empreendedorismo e criticidade, além de práticas como leitura matinal, escrita reflexiva e uso de técnicas como os "5 Porquês" e "*Design Thinking*". O segundo grupo de relatos tratou da criação de hábitos e rotinas, incluindo o uso de métodos como Pomodoro, listas de tarefas, aplicativos de organização e produtividade focada inspirada em *Cal Newport*. O terceiro grupo de relatos focou na definição de objetivos e planejamento estratégico, com ações como cronogramas de aprendizagem, metas semanais/mensais e foco em áreas específicas de atuação. O quarto grupo de relatos abordou a colaboração, valorizando trocas de ideias, escuta ativa, projetos interdisciplinares e práticas para desenvolver oratória e comunicação. No quinto grupo, foram mencionados treinamentos de oratória, mapas mentais, desafios criativos, criação de planos de negócio e análise de problemas. Por fim, o sexto grupo de relatos mencionou o uso de recursos digitais, como plataformas de cursos *online*, aplicativos de produtividade, fóruns especializados, canais de YouTube e participação em eventos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A experiência apresentada neste estudo oportunizou aos estudantes a prática da autoconsciência e da autoliderança ao proporcionar um espaço estruturado de reflexão e planejamento pessoal. Por meio da autoavaliação da frequência com que aplicam 13 competências transversais (CTs), os estudantes foram levados a reconhecer suas forças e fragilidades, promovendo um olhar mais crítico sobre suas atitudes e hábitos. A priorização de três CTs para desenvolvimento e a elaboração de planos personalizados estimularam a autoliderança, exigindo definição de metas, tomada de decisão e busca por estratégias autônomas. O estudo apontou tanto as principais barreiras quanto estratégias utilizadas pelos estudantes, reflexões que podem ser utilizadas para discutir o assunto em outras oportunidades de desenvolvimento de CTs.

É importante salientar que a pesquisa apresenta limitações, como a amostra restrita a uma única instituição, o que reduz a generalização dos achados. Além disso, a coleta por autodeclaração pode introduzir vieses subjetivos, e a ausência de acompanhamento longitudinal impede avaliar impactos duradouros. Para futuras investigações, a amostra será ampliada para diferentes contextos, incluindo avaliações externas e estudos longitudinais que acompanhem a evolução da autoconsciência e autoliderança ao longo do tempo.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abid, G., Arya, B., Arshad, A., Ahmed, S., e Farooqi, S. (2021). Positive personality traits and self-leadership in sustainable organizations: Mediating influence of thriving and moderating role of proactive personality. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 299-311.

Bryant, A. e Kazan, A. L. (2013) *Self-leadership: how to become a more successful, efficient, and effective leader from the inside out.* Nova York: McGraw-Hill.

Campos, L. B. P. e Pinto, J.A. (2023) Skills development with a focus on self-awareness and self-management: the power is in the student's hand. In 2023 International Conference on Active Learning in Engineering Education (PAEE/ALE). PAEE/ALE, pp. 103-111.

Cech, E. A. (2014) Culture of disengagement in engineering education? *Sciense. Technology. Human Values*, 39, pp. 42–72. DOI: 101177/0162243913504305.

Eurich, T. (2018). Insight: *The surprising truth about how others see us, how we see ourselves, and why the answers matter more than we think*. Nova York: Crown Publishig Group.

Halász, G., e Michel, A. (2011). Key Competences in Europe: interpretation, policy formulation and implementation. *European Journal of Education,* 46(3), 289-306.

Joslyn, Cole H. e Hynes, Morgan M. (2016). Measuring Changes in Self-awareness and Social-awareness of Engineering Students' Engaging in Human-Centered Design. In: 2016 ASEE Annual Conference & Exposition.

Lima, R. M., Mesquita, D., Rocha, C. e Rabelo, M. (2017) Defining the Industrial and Engineering Management Professional Profile: a longitudinal study based on job advertisements. *Production,* 27 (spe). DOI: https://doi.org/10.1590/0103-6513.229916.

Masetto, M. T. (2018) Metodologias ativas no ensino superior: para além da sua aplicação, quando fazem a diferença na formação de profissionais? *Revista e-Curriculum,* 16(3) pp. 650-667. DOI: https://doi.org/10.23925/1809-3876.2018v16i3p650-667.

Stewart, G. L., Courtright, S.H. e Manz, C.C (2019). Self-leadership: A paradoxical core of organizational behavior. Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior, 6, pp. 47-67. https://doi.org/10.1146/annurev-orgpsych-012218-015130.

Woods, D., Felder, R, Rugarcia A. e Stice, J. (2000) The future of engineering education III. Developing critical skills. *Chemical Engineering Education*, 34(2).

Nomes dos Autores Acadêmicos: Lílian Barros Pereira Campos (liliancampos@unifei.edu.br) Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira, Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Rua Irmã Ivone Drummond, 200, Distrito Industrial II, Itabira, MG, Brasil. Janaína Antonino Pinto (janainaantonino@unicamp.br) Universidade Estadual de Campinas, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária, Campinas, SP, Brasil. Roger Junio Campos (rogercampos@unifei.edu.br) Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira, Instituto de Ciências Tecnológicas, Rua Irmã Ivone Drummond, 200, Distrito Industrial II, Itabira, MG, Brasil.

Extensão no ensino em transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ENSINAR PARA APRENDER: RELATO DE ATIVIDADES DE EDUCAÇÃO PARA O TRÂNSITO DESENVOLIDAS POR DISCENTES DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Nathan Erick Santos Souza[1], João Vitor Sousa[2], Ryan Carlos de Souza[1], Cintia Isabel de Campos[1]
[1]Universidade Federal de Goiás, [2]Universidade de Brasília

RESUMO
O objetivo desse artigo é apresentar o desenvolvimento de ações de educação para o trânsito, executadas na Escola Municipal Francisco Rafael Campos, em Aparecida de Goiânia, para as turmas do 9° e 4° ano do ensino fundamental, como uma estratégia de ensino aos discentes da disciplina Trânsito e Educação do curso de Engenharia de Transportes. Assim, o artigo relata as etapas desenvolvidas pelos graduandos em sala de aula, desde a escolha da temática, que para o 9° ano, foi "A política", e para o 4° anos foi "O que seria uma rua ideal?", inserida no contexto de ruas completas e utilizando do manual brasileiro de sinalização; além disso, a exposição dos materiais utilizados para o estudo dos temas, como a Constituição Federal; e a aplicação dessas atividades, elaboradas para elucidar conceitos para os estudantes. Ao final, foi relatado como essas atividades contribuem para o aperfeiçoamento da formação do discente.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O curso de Engenharia de Transporte, ofertado pela Universidade Federal de Goiás (UFG), foi criado no ano de 2015 e em sua grade curricular oferece ao aluno a oportunidade de cursar a disciplina de Trânsito e Educação, que aborda assuntos voltados a organização do trânsito, quais são os órgãos de controle e fiscalização, além de desenvolver e incentivar ações educativas para o trânsito junto à comunidade externa e à universidade por meio de ações de extensão (UFG, 2016). Essa ação se torna importante, pois visa desenvolver e incentivar ações de educação para o trânsito junto à comunidade externa e à universidade por meio de ações de extensão (Gadotti, 2017), contribuindo assim para o processo de curricularização da extensão (Brasil, 2018).

Nessa perspectiva, desde 2021, a disciplina "Trânsito e Educação" promove atividades por meio do projeto de extensão "Educatrans - Educação e Trânsito andam juntos", que estabelece um vínculo entre os discentes da universidade e a comunidade externa, viabilizando a experiência prática desse tema para os discentes (Campos e Souza, 2024; Souza e Campos, 2024) e oportunizando o aprendizado discente em uma abordagem ativa. Diante disso, o objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de ações de extensão de educação para o trânsito, executadas na Escola Municipal Francisco Rafael Campos, em Aparecida de Goiânia para as turmas do 9° ano e do 4° ano, como uma estratégia de ensino da disciplina Trânsito e Educação do curso de Engenharia de Transportes. Assim, além das considerações iniciais, que contextualiza o relato apresentado que será apresentado, este artigo contempla na seção 2 as etapas aplicadas na disciplina e vivenciadas pelos discentes, na seção 3 apresenta as atividades executadas e encerra com as considerações finais, na seção 4.

2. MATERIAIS E ETAPAS PARA O PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES

A disciplina Trânsito e Educação ofertada no segundo semestre de 2024, baseou-se no método *Hands-on*, a partir da premissa da construção do conhecimento de maneira ativa (aprender fazendo), em que os dois estudantes envolvidos participam como vetores das atividades propostas (De Holanda, 2007). Assim, foi organizada em duas etapas, a teórica e a prática. Iniciou com aulas teóricas com temas como: trânsito e sociedade, a educação para o trânsito no Código de Trânsito Brasileiro (CTB) e outros; Exemplos práticos de educação no trânsito, expondo a sua importância; e abordagens estratégicas para a transmissão de mensagens, de acordo com a faixa etária e a série a ser trabalhada, utilizando a literatura do Elvik (2015).

Após esta etapa introdutória e niveladora da disciplina, foi iniciada a segunda etapa, com a proposta do projeto prático (ações de extensão presenciais). Os discentes receberam orientações sobre tema, público alvo e tempo para execução e deveriam planejar a execução das ações. O público alvo das ações consistiam em alunos da Escola Municipal Francisco Rafael Campos, localizada no município de Aparecida de Goiânia, Goiás. A primeira ação seria realizada com duas turmas do 9° ano, com o tema: O trânsito e as eleições. A segunda ação, seria aplicado à uma turma do 4° ano, com tema de reconhecimento do espaço viário. Em ambas as ações, os temas deveriam ser trabalhados em linguagem acessível e explicativa, adaptadas para cada um dos públicos. Ainda, deveriam ser executados em um único período, matutino ou vespertino, devendo iniciar, encerrar no mesmo período e contemplar elementos lúdicos e participativos, de modo que houvesse interação e uma participação ativa. A partir das orientações apresentadas, os discentes da disciplina iniciaram um processo de preparação, que envolveu pesquisa sobre os temas e sobre o público alvo para planejarem as duas ações

propostas no projeto.

Para a ação 1, foram feitas buscas na *internet* (usando o site do senado federal) para entender a função dos gestores público, como prefeitos e vereadores; Para a etapa 2 além de pesquisar artigos voltados ao "O desenho de cidades seguras" (Welle et al., 2016), ao "Guia global de desenho de ruas" (Global Designing Cities, 2018), a "Cidade para pessoas" (Gehl, 2013) e "Ruas completas no Brasil" (Santos et al., 2021); buscou-se artigos na Constituição Federal (Brasil, 1988), e a lei que rege o Plano Diretor (Brasil, 2001) das cidades brasileiras.

Para a ação 2, a leitura do material do Conexão DNIT (Brasil, [s.d.]): 31-"A localização do trânsito a partir da orientação"; 85-"Acessibilidade no trânsito para cadeirantes"; 270-"O ar que não cuidamos é o ar que respiramos", inspirou na criação da temática dessa ação. Utilizou também os documentos "O desenho de cidades seguras" (Welle et al., 2016), o "Guia global de desenho de ruas" (Global Designing Cities, 2018), "Cidade para pessoas" (Gehl, 2013) e "Ruas completas no Brasil" (Santos et al., 2021), e, sobre a sinalização, o manual brasileiro de sinalização (Brasil, 2022), quanto à sinalização de regulamentação, de advertência, de indicação e horizontal, foi utilizado, com intuito de compreender o papel dessas sinalizações, a sua coloração, o tamanho e o seu posicionamento ideal, para com motoristas e pedestres.

Após essa etapa de busca por conhecimentos, os discentes da disciplina propuseram as atividades a serem realizadas nas ações 1 e 2, que foram previamente divididas em quatro etapas para seguir uma sequência lógica de apresentação dos temas, e facilitar a execução das atividades. A denominação das ações, bem como a descrição dos participantes de cada uma delas e suas respectivas etapas estão graficamente representadas na figura 1.

	Descrição dos participantes	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Ação 1 Nome: Política, Trânsito e educação	30 estudantes do 9º ano do fundamental, faixa etária entre 14 a 17 anos	Apresentação teórica da função dos gestores públicos através de slides.	Atividade de reflexão sobre os conceitos dos artigos 5° e 6° da Constituição Federal	Desenvolvimento de "propostas políticas" por parte dos alunos	Debate e votação nas propostas apresentadas
Ação 2 Nome: Ruas completas até a escola	35 estudantes do 4° ano do fundamental, com faixa etária entre 10 a 12 anos.	Apresentação do tema ruas completas através de slides.	Discussão e debate acerca dos temas abordados na apresentação	Atividade de pintura de placas de trânsito	Elaboração de maquete e debate final sobre o tema

Figura 1: Descrição das atividades realizadas em cada uma das ações

O método mais lúdico também aplicado às duas turmas, fundamentou-se na utilização de recursos que prendessem a atenção dos alunos ao longo da ação. Para o 4° ano, a proposta dessa atividade consistia na distribuição de cópias impressas das placas de sinalização vertical de regulamentação, de advertência e de indicação, para as crianças pintarem de forma igual aos apresentados em sala. Para a turma do 9° ano, foi proposto para se dividirem em grupos e, nele, conteria um prefeito e dois vereadores, para que pudessem desenvolver propostas voltadas à mobilidade urbana no entorno do colégio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As duas ações foram realizadas em dias distintos. A primeira ação foi realizada em dois dias, um para cada turma do 9º ano, e ocorreu nos dias 11 e 18 de setembro de 2024, com a participação de aproximadamente 30 estudantes em cada dia, entre 14 a 17 anos. A segunda ação ocorreu no dia 23 de outubro de 2024, e contou com a participação de aproximadamente 35 estudantes do 4° ano do fundamental, com faixa etária entre 10 e 12 anos.

3.1 AÇÃO COM AS TURMAS DO 9° ANO

Para a primeira ação houve um aprofundamento prévio nos seguintes temas: mobilidade urbana, ruas completas e política. Após o nivelamento, a primeira etapa consistiu em uma apresentação teórica do tema da atividade. Essa etapa tinha, como objetivo, expor aos alunos qual é a função dos gestores públicos - prefeito e do vereador - na cidade e demonstrar como as decisões tomadas por eles podem impactar, de forma positiva ou negativa, a mobilidade urbana. A etapa seguiu com perguntas que ajudassem os alunos a refletir sobre o tema, entre elas: "Como você se desloca até ao colégio?"; "Quais são os problemas identificados na infraestrutura no trajeto de sua casa até ao colégio?"; e "Como estes problemas poderiam ser resolvidos?". Após isso, foi apresentado o

conceito de Ruas Completas, por meio da apresentação de *slides*, com o intuito de demonstrar que um elevado nível de qualidade da infraestrutura viária e dos serviços de mobilidade urbana não está limitado apenas aos projetos conceituais e cidades do exterior, mas também podem ser encontrados em cidades brasileiras.

A segunda etapa consistiu na apresentação de um quadro informativo, orientado pela pergunta "Você sabia?". A pergunta serviu para aguçar a curiosidade, e teve por finalidade, abordar os artigos 5° e 6° da Constituição Federal; explicando que o direito de ir e vir (Brasil, 1988, art. 5º), junto ao direito ao transporte (Brasil, 1988, art. 6º) é assegurado constitucionalmente. Devido a isso, foi feita uma pergunta para refletirem: "Se temos a constituição a nosso favor, que nos garanta o direito ao transporte público de qualidade e de ir e vir, porque ainda precisamos ficar dependentes de motos e carros?". Em adição, foram apresentados conceitos sobre Plano diretor (Brasil, 2001), mostrando-os que o crescimento ordenado da cidade deve-se também a este documento e que qualquer alteração feita nele, impacta diretamente na mobilidade urbana. Além disso, esclarecendo que a sua alteração é resultado de audiências públicas (Brasil, 2025), que podem ocorrer dentro ou fora da Câmara Municipal, destacando a importância da participação da comunidade para levar suas problemáticas ao debate. Assim, foi retratado quais são os atores responsáveis pela redução desses impactos negativos à mobilidade urbana, que são os prefeitos e vereadores. A apresentação dos gestores públicos se deu pela sua função e qual a sua relevância na cidade. A terceira etapa contou com uma atividade, cujo nome foi "ser político", em que os estudantes se dividiram em grupos, cada um deles contendo um prefeito e dois vereadores. Esta atividade foi elaborada para que os alunos pudessem desenvolver propostas voltadas à mobilidade urbana no entorno do colégio. Ao final, na quarta etapa foram distribuídas cédulas de votação para que a turma pudesse votar e escolher o grupo (chapa) que tivesse a melhor proposta de solução para os problemas de mobilidade urbana e trânsito, simulando um processo eleitoral.



Figura 2: Ação presencial "Política, Trânsito e Educação" realizada com estudantes do 9° ano

3.2 Ação com alunos do 4° ano

Assim como a primeira, a segunda ação contou com uma apresentação por parte dos proponentes, acerca dos seguintes temas: Ruas completas; Acessibilidade; Sinalização horizontal, vertical, advertência, indicação e regulamentação. Destarte, foram definidos os temas abordados para essa atividade, por meio de questionamentos, como "O que seria uma rua ideal?".

A primeira etapa contou com a definição e apresentação do tema "Ruas Completas", junto a pergunta "O que seria uma sinalização viária adequada?", elencando também os elementos voltados à acessibilidade (Brasil, [s.d.]) e arborização urbana (Brasil, [s.d.]). Ao final da apresentação dos temas aplicou-se uma prova aos alunos, a fim de fixar os conhecimentos apresentados. Na segunda etapa, houve um debate direcionado sobre o tema: "o que seria o trânsito?". Nesse momento, alguns alunos se voluntariaram para responder a pergunta, expondo alguns problemas na mobilidade urbana, a ausência de sinalização viária, a escassez de arborização urbana. A etapa seguiu com a apresentação do conceito de rua ideal, infraestrutura, compartilhando de espaço entre veículo e pedestre e transporte motorizado e não motorizado, aplicada ao contexto de ruas completas (Global Designing Cities, 2018; Welle et al., 2016; Gehl, 2013; Santos et al., 2021); Além de explicar a importância da arborização adequada nos bairros e nas vias, tanto para o meio ambiente, e de forma igual trânsito de pedestres, apresenta impacto positivos à sociedade (Global Designing Cities, 2018; Welle et al., 2016; Gehl, 2013; Santos et al., 2021).

A terceira etapa contou com a apresentação de alguns elementos da sinalização viária, para facilitar a assimilação dos conceitos, foram utilizadas algumas réplicas em escala reduzida das placas de sinalização presentes no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (Brasil, 2022). Seguinte a apresentação foi

disponibilizada cópias impressas com desenhos de placas de trânsito para que os alunos pudessem pintá-las, sempre atentando-se ao significado de cada uma dessas cores. A figura 3 apresenta as atividades realizadas durante a quarta etapa, que contou com a elaboração de uma maquete feita de EVA, para colar na lousa, com o objetivo de aplicação de todos estes conceitos apresentados ao decorrer da ação. Durante a montagem da maquete os alunos puderam aplicar os conhecimentos de sinalização, calçadas acessíveis, ciclofaixas, faixa de pedestres, entre outros elementos que compõem uma rua completa.



Figura 3: Ação presencial 4° ano

A percepção do engajamento na participação dos alunos nas ações, mensurando a sua efetividade, foi realizada de forma observacional indireta, partindo da percepção dos discentes proponentes. Durante as ações, foram observados aspectos de interesse, participação e foco nas atividades propostas. Partindo disso, quanto à efetividade das ações ressalta-se que, na primeira ação, por mais que grande parte dos alunos mantiveram-se atentos e engajados a apresentação dos conceitos, notou-se uma breve dispersão por uma parte minoritária da turma. Contudo, as etapas que contaram com a interação entre os alunos e atividades em grupo mostraram-se mais efetivas que as etapas que haviam apenas apresentação de *slides*, corroborando com a literatura Cool (2004) “A aprendizagem é produzida como resultado da interação entre o sujeito e o ambiente e se traduz invariavelmente numa modificação comportamental[...].”. Para a segunda ação, notou-se que os alunos participaram de maneira ativa de cada uma das etapas, mostrando-se atentos às apresentações e atividades propostas, apresentando questionamentos enriquecedores para a discussão e mostrando fixação dos conteúdos apresentados durante a última etapa, que contou com atividades de fixação de conhecimentos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo descreveu ações presenciais desenvolvidas na disciplina Trânsito e Educação, por meio do projeto de extensão Educatrans, demonstrando como essas têm facilitado o ensino de transportes e contribuído para a formação do profissional em engenharia de transportes. Especificamente, as ações relatadas contribuíram para a formação do engenheiro de transportes, uma vez que a pesquisa sobre a Constituição ratificou que uma cidade que oportunizam o direito de se locomover a todos os cidadãos, por meio das diferentes modalidades de transportes, beneficia a acessibilidade e a inclusão. Por consequência, o conceito de Ruas Completas possibilitou compreender a aplicação do direito constitucional e também que esta conceituação não se limita apenas ao cenário teórico. Dessa forma, o estudo sobre prefeitos e vereadores foram de grande valia, pois o engenheiro ao final da graduação, pode-se tornar um futuro gestor, assim tendo papel fundamental para aplicação desse conceito na realidade do contexto brasileiro. Além disso, possibilitou o desenvolvimento de habilidades para aprendizados de forma autônoma, por meio da busca de conhecimentos técnicos e científicos para embasar suas ações. Além disso, o engajamento e a formação do senso crítico e o desenvolvimento de outras habilidades como práticas em gestão, elaboração e tomada de decisões, comunicação e trabalho em equipe são reflexos do enriquecimento curricular e profissional desses futuros engenheiros de transportes. Com isso, as atividades práticas atreladas à extensão universitária mostram-se como uma importante ferramenta para a formação desses engenheiros.

Ainda, as atividades propostas cumprem um importante papel no fomento da cultura de segurança viária, colaborando de forma direta com a sociedade, assim, a documentação dessas experiências pode auxiliar outros projetos de extensão, promovendo e subsidiando a realização de novas ações voltadas para a educação no trânsito. O êxito na execução dessas atividades evidencia que a transmissão dos conhecimentos sobre trânsito para o público infanto-juvenil pode, a longo prazo, contribuir para a criação de uma cultura de segurança viária. Por fim, para trabalhos futuros, sugere-se meios de mensurar os impactos das atividades realizadas a longo prazo e também mensurar quais o impacto da participação no projeto de extensão para a carreira profissional desses engenheiros.

Agradecimentos
Agradecimento à Pró-reitoria de Extensão e Cultura (PROEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) pela bolsa de extensão. Aos discentes da disciplina Trânsito e Educação, à coordenadora do Projeto EducaTrans e aos membros do projeto de extensão e a escola participante das ações do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brasil (1988) *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm (acesso em: 2 jul. 2025).

Brasil (2001) *Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001*. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. (acesso em: 2 jul. 2025).

Brasil (2018) *Resolução nº 7, de 18 de dezembro de 2018*. Estabelece as Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira e dá outras providências. Ministério da Educação.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (s.d) *A localização do trânsito a partir da orientação*. Conexão DNIT – Atividade 31. [S. l.]: DNIT, . Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/conexao/atividades/31 (acesso em: 30 jun. 2025).

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (s.d.) *Acessibilidade no trânsito para cadeirantes.* Conexão DNIT – Atividade 85. [S. l.]: DNIT, . Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/conexao/atividades/85 (acesso em: 30 jun. 2025).

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (s.d.) *O ar que não cuidamos é o ar que respiramos*. Conexão DNIT – Atividade 270. [S. l.]: DNIT. Disponível em: https://servicos.dnit.gov.br/conexao/atividades/270 (acesso em: 30 jun. 2025).

Brasil. Ministério dos Transportes (2022) *Manuais Brasileiros de Sinalização de Trânsito*. Brasília, DF: Ministério dos Transportes,. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/senatran/manuais-Brasileiros-de-sinalizacao-de-transito (acesso em: 2 jul. 2025).

Brasil. Tribunal Superior Eleitoral. (2024) *O que fazem o prefeito e o vereador? Confira quais são as funções desses cargos*. Brasília, DF: TSE. Disponível em: https://www.tse.jus.br/comunicacao/noticias/2024/Novembro/o-que-fazem-o-prefeito-e-o-vereador-confira-quais-sao-as-funcoes-desses-cargos (acesso em: 2 jul. 2025).

Campos, Cintia ; J. V. L. Souza (2024) Relato Do Projeto De Extensão Educatrans - Educação E Trânsito Andam juntos In: *ANAIS DO 38º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*, Florianópolis. Anais eletrônicos..., Galoá, 2024. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2024/trabalhos/relato-do-projeto-de-extensao-educatrans-educacao-e-transito-andam-juntos?lang=pt-br> (acesso em: 09 Jul. 2025).

Souza, J. V. L.; C. Campos (2024) La universidad como promotora de acciones de educación para un tránsito seguro in: *Sociedad Chilena de Ingenieria De Transporte*, Chile. Disponivel em: https://estudiosdetransprte.org/sochitran/article/view/302 (acesso em: 14 jul. 2025)

Cool, César; J. Palacios; A. Marchesi (2004) *Desenvolvimento psicológico e educação: Psicologia da educação escolar*. 2ª ed. Vol. 2. Porto Alegre: Artmed.

Deus, S.. (2020) *Extensão universitária: trajetórias e desafios*. Editora Pre-UFSM. ISBN: 978-65-87668-01-7.

De Holanda, C. A. M.; C. A. D. Bezerra (2007) Aplicação de uma abordagem "Hands-on" na disciplina introdução a engenharia. *XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia* - COBENGE. p. 1-9.

Gadotti, M. (2017) Extensão universitária: para quê. *Instituto Paulo Freire*, v. 15, n. 1-18, p. 1.

Gehl, J. (2013). *Cidades para pessoas*. São Paulo: Perspectiva.

Global Designing Cities, Initiative (2018) *Guia global de desenho de ruas*. São Paulo: Editora Senac São Paulo, p. 1-455.

Lovato, F.L.; , A. Michelotti; E.L.L Silva. (2018) Metodologias ativas de aprendizagem: uma breve revisão. A*cta Scientiae*, v. 20, n. 2.

Santos, A. M.; et al. (2025) I semana da engenharia florestal da universidade federal do sul da bahia: relato de uma experiência de extensão curricularizada. *Extensio: Revista Eletrônica de Extensão*, v. 22, n. 51, p. 85-100. Disponível em: https://doi.org/10.5007/1807-0221.2025.e96531 (acesso em: 3 jul. 2025).

Santos, Paula; A. Samios; B. Batista. (2021) Ruas completas no brasil: promovendo uma mudança de paradigma. *World Resources Institute*, Disponível em: https://doi.org/10.46830/wrirpt.19.00106 (acesso em: 9 jul. 2025)

UFG (2016). *Projeto Pedagógico Do Curso de Engenharia de Transportes Da Universidade Federal de Goiás*. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/767/o/PPC_Engenharia_de_Transportes_-_v1.pdf?1469472408 (acesso em: 14 jul. 2025)

Welle, Ben;C. Adriazola-Steil; R. King; C. Sarmiento;Q. Liu; M. Obelheiro (2016) *O desenho de cidades seguras: Diretrizes e Exemplos para Promover a Segurança Viária a partir do Desenho Urbano*. 1a ed. Porto Alegre: WRI Brasil;

EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA COMO FERRAMENTA PARA PROPAGAÇÃO DO ENSINO EM TRANSPORTES

Maria Ingridy Lacerda Diniz[1], Osires de Medeiros Melo Neto[2], Mariana Silva Nascimento[1], Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix[1], Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena[1].
[1]Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, [2]Universidade Federal de Lavras - UFLA

RESUMO
As atividades de extensão são fundamentais na graduação por integrarem teoria e prática, promovendo a formação cidadã e o engajamento social dos estudantes. Este artigo apresenta uma ação extensionista realizada por alunos do curso de Engenharia Civil que objetivou o ensino lúdico e interativo sobre os modais de transporte e sinalização viária para alunos do ensino fundamental de uma escola pública. A metodologia envolveu a apresentação do conteúdo em sala de aula, simulações com sinalização viária e dinâmicas participativas, além da aplicação de um questionário para avaliar a percepção dos participantes quanto ao aprendizado e à abordagem utilizada. Os resultados indicam que a oficina contribuiu para a conscientização sobre segurança viária entre os alunos beneficiados e para o desenvolvimento de competências técnicas e sociais entre os discentes da graduação. A experiência reforçou o papel da extensão na formação dos graduandos em Engenharia Civil perante a sociedade.

1. INTRODUÇÃO

O ensino de engenharia de transportes ocupa um papel estratégico na formação de profissionais capazes de lidar com os desafios contemporâneos da mobilidade urbana, da logística e da infraestrutura viária (Oliveira e Silva, 2015). Diante do crescimento urbano acelerado, da necessidade de sustentabilidade nos deslocamentos e da complexidade das redes de transporte, torna-se cada vez mais relevante que os cursos de graduação em Engenharia Civil incorporem práticas pedagógicas inovadoras e articuladas com a realidade social. Nesse sentido, a extensão universitária apresenta-se como uma importante ferramenta complementar ao ensino tradicional, promovendo a articulação entre saberes acadêmicos e demandas da sociedade (Andrade Jr. *et al.*, 2019).

Nesse contexto, projetos de extensão universitária voltados ao ensino de transportes vêm se consolidando como estratégias eficazes para integrar os estudantes às dinâmicas locais, estimulando a reflexão crítica e a responsabilidade social. Conforme Zimmermann *et al.* (2017), as ações extensionistas promovem a interação direta com comunidades, instituições públicas e setores produtivos, possibilitando a construção de soluções contextualizadas e o desenvolvimento de habilidades práticas. Além disso, a extensão contribui para o fortalecimento da cidadania e para a democratização do conhecimento técnico-científico.

O ensino em transportes, nesse sentido, deve incorporar metodologias que permitam a aproximação com problemas reais da sociedade. Como destaca Santos (2021), atividades de extensão no campo dos transportes permitem que os estudantes experimentem o conhecimento de forma aplicada, ao mesmo tempo em que contribuem para a conscientização da população sobre temas relevantes como segurança no trânsito, acessibilidade e mobilidade. Essa abordagem prática e social do ensino contribui para um processo formativo mais completo, centrado no desenvolvimento de competências interdisciplinares e na promoção da cidadania.

A curricularização da extensão vem sendo adotada nas instituições de ensino superior brasileiras como uma forma de consolidar esse compromisso social da universidade, tornando obrigatório o envolvimento dos estudantes em projetos que dialoguem com a comunidade externa (Oliveira e Portas, 2024). No ensino de engenharia de transportes, essa obrigatoriedade representa uma oportunidade para o desenvolvimento de projetos educativos que, ao mesmo tempo em que promovem a aprendizagem significativa, geram impacto positivo na sociedade.

A formação em Engenharia exige uma abordagem interdisciplinar, crítica e aplicada, que vá além da mera transmissão de conteúdos técnicos. Segundo Teixeira Júnior e Rios (2018), é necessário promover a aproximação entre teoria e prática para que os estudantes desenvolvam competências voltadas à resolução de problemas reais, à análise sistêmica e à atuação ética no espaço urbano. Essa perspectiva é reforçada por Ruiz-Padillo *et al.* (2021), ao destacar que o ensino de transportes deve dialogar com as dimensões sociais, ambientais e econômicas do deslocamento humano, valorizando metodologias ativas e participativas.

Nesse sentido, este artigo apresenta a concepção, execução e resultados de uma atividade de extensão do curso de Engenharia Civil voltada ao ensino em transportes para alunos do ensino fundamental de uma escola pública municipal. A proposta contribuiu com a discussão sobre metodologias de ensino e práticas pedagógicas no campo da engenharia de transportes, alinhando-se à subárea temática, ao propor uma experiência que reforça o vínculo entre ensino, extensão e formação profissional. Com base em uma proposta didático-extensionista, buscou-se aplicar estratégias de aprendizagem significativa aliadas à produção de materiais de apoio acessíveis e interativos, com o objetivo de potencializar a compreensão dos temas abordados em sala de aula. A iniciativa também visou ampliar o impacto social da universidade, ao produzir conteúdo que pudessem ser utilizados por estudantes de diferentes instituições e níveis de formação.

2. METODOLOGIA

A metodologia para execução da pesquisa se desenvolveu em 3 etapas principais: a definição do público alvo da atividade, o desenvolvimento de materiais que foram utilizados na extensão e o desenvolvimento de um questionário para avaliar a efetividade da atividade de extensão. Cada etapa foi descrita nos tópicos a seguir.

2.1. Definição do público alvo

A atividade extensionista foi voltada a estudantes do 6º ano do ensino fundamental de uma escola pública municipal, totalizando 30 alunos participantes. A escolha desse público se deu com base em dois critérios principais: (i) a necessidade de promover a educação viária desde a infância, conforme previsto na Política Nacional de Trânsito (2014), e (ii) foi observado que nessa faixa etária (entre 10 e 11 anos), muitos alunos começam a realizar deslocamentos a pé de forma autônoma para a escola, passando a interagir diretamente com o ambiente viário urbano. Essa vivência cotidiana no espaço público torna o momento oportuno para ações de conscientização sobre normas básicas de trânsito e segurança de pedestres.

Segundo Santos (2021) quanto mais cedo se inicia a formação para o trânsito seguro, maior é a probabilidade de internalização de comportamentos conscientes e preventivos. Nesse sentido, a seleção do público visou maximizar o impacto social e educativo da atividade, aproximando os conteúdos abordados na oficina à realidade dos participantes.

Além disso, a parceria com uma escola pública municipal reforça o compromisso da extensão universitária com a democratização do conhecimento e a aproximação entre universidade e comunidade local, conforme orientado pelas Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira (BRASIL, 2018).

2.2. Desenvolvimento de materiais didáticos

A construção dos materiais didáticos ocorreu em duas etapas complementares, com foco na adaptação dos conteúdos das disciplinas de Planejamento dos Transportes e de Estradas à linguagem apropriada para o público-alvo. Como destacado por Meireles e Afonso (2024), em ações extensionistas voltadas à educação básica, é essencial que os materiais sejam desenvolvidos com base na ludicidade, na clareza e na contextualização, de forma a facilitar a compreensão e o engajamento dos estudantes.

Na primeira etapa, os discentes da graduação elaboraram uma apresentação em slides estruturada com base em conteúdos fundamentais sobre modais de transporte, sinalização viária e regras básicas de trânsito. A linguagem foi adaptada, priorizando frases curtas, imagens ilustrativas e exemplos do cotidiano urbano, como a travessia em faixas de pedestres, o significado das cores do semáforo e o uso correto da calçada. Exemplos de como os slides foram adaptados se encontram na figura 1.



Figura 1: Exemplos de adaptação de conteúdo de forma lúdica para alunos do ensino fundamental

A segunda etapa consistiu no planejamento e confecção de atividades lúdicas que funcionassem como instrumentos de fixação do conteúdo apresentado. Foram criados jogos de perguntas e respostas, dinâmicas em grupo e simulações utilizando placas de trânsito confeccionadas com material reciclável, além de pequenos semáforos simulados. A proposta metodológica adotou elementos da aprendizagem baseada em jogos, reconhecida por seu potencial motivador e pelo estímulo à participação ativa dos alunos.

2.3. Questionário de avaliação

Para avaliar a eficácia da atividade extensionista junto ao público atendido, foi elaborado e aplicado um questionário ao final da oficina. A proposta de avaliação buscou compreender tanto a percepção dos alunos sobre os conteúdos abordados quanto a efetividade das metodologias utilizadas, permitindo ajustes em futuras edições da atividade.

O questionário foi construído com base em princípios de avaliação formativa e adaptado ao perfil cognitivo dos alunos do ensino fundamental. Segundo Duarte *et al.* (2019), instrumentos avaliativos para crianças e adolescentes devem ser objetivos, claros e preferencialmente curtos, a fim de evitar dispersão e garantir respostas mais consistentes. Assim, foram elaboradas 5 questões: quatro do tipo fechado, com alternativas de múltipla escolha, e uma questão aberta, que permitia aos alunos expressar livremente sua opinião sobre a atividade. As questões abordaram temas como compreensão do conteúdo, interesse pelas atividades, percepção de aprendizado e sugestões de melhoria.

O questionário foi realizado em formato digital, utilizando a plataforma *Google Forms*, o que facilitou a aplicação, a coleta de dados e a organização das respostas. A aplicação foi feita com o auxílio dos discentes da graduação, que prestaram suporte aos alunos sempre que necessário, garantindo que todos pudessem compreender e responder ao questionário com autonomia.

3. RESULTADOS E DISCURSSÕES

3.1. Apresentação em sala de aula

A partir da apresentação do conteúdo para o público alvo, os discentes do curso de Engenharia Civil desenvolveram habilidades importantes como a comunicação, a didática e o trabalho em equipe ao atuarem como ministrantes da oficina. Além disso, houve uma ampliação do senso de responsabilidade social e da compreensão sobre a aplicação prática dos conteúdos das disciplinas de Planejamento dos Transportes e Estradas. A vivência em um ambiente escolar também contribuiu para a formação humanística dos futuros engenheiros.

Também se observou que essa abordagem contribuiu para tornar a atividade mais dinâmica e acessível, criando um ambiente favorável à troca de saberes entre os discentes da graduação e os alunos do ensino fundamental, e reforçando o papel pedagógico da extensão como via de mão dupla entre universidade e sociedade.

3.2. Dinâmicas e jogos sobre o conteúdo ministrado

Ao final da apresentação em sala de aula os alunos foram direcionados ao ginásio da escola para realizarem brincadeiras de perguntas e respostas para que os alunos pudessem colocar em pratica o conteúdo estudado de maneira lúdica e interativa, a partir de jogos como amarelinha de perguntas e gincanas de quem acerta primeiro.

3.3. Avaliação da extensão pelos alunos

A avaliação da atividade extensionista foi realizada por meio de questionário aplicado aos alunos do ensino fundamental que participaram da oficina. Os dados coletados revelam percepções positivas quanto à importância do conteúdo, à aprendizagem adquirida e ao interesse por ações educativas similares no futuro.

Observou-se que todos os alunos participantes (100%) responderam afirmativamente às questões “1 - Você achou importante o que aprendeu sobre o trânsito hoje?”, “2 -Você já tinha ouvido falar sobre os diferentes tipos de transporte (modais)?” e “3 - Você gostaria que acontecessem outras palestras ou oficinas na sua escola com temas parecidos?”. Esses resultados indicam não apenas o interesse dos alunos pelo tema, mas também a percepção de relevância social e educativa da atividade. Segundo Lima et al. (2020), ações extensionistas que utilizam metodologias interativas e contextualizadas tendem a gerar maior engajamento entre estudantes da

educação básica, especialmente quando os temas abordam aspectos do cotidiano, como segurança viária e mobilidade urbana.

Em relação à questão 4, "Você aprendeu algo novo na palestra (algo que você não sabia antes)?", os resultados apresentados demonstraram que 50% dos alunos identificaram o modal dutoviário como o conteúdo inédito aprendido durante a oficina. Esse dado sugere que, apesar de os modais rodoviário, ferroviário, aquaviário e aeroviário já serem de conhecimento prévio da maioria dos estudantes, o modal dutoviário ainda é pouco difundido no ambiente escolar e fora dele.

Além disso, 30% dos alunos relataram ter aprendido sobre diferentes tipos de embarcações, enquanto 20% afirmaram que compreenderam o significado de uma placa de trânsito que até então desconheciam. Esses dados evidenciam que a oficina não apenas reforçou saberes previamente adquiridos, mas também ampliou o repertório dos participantes em relação a temas que geralmente não são abordados em seu cotidiano escolar. A combinação de abordagem lúdica, linguagem acessível e conexão com a realidade local foi fundamental para facilitar esse processo de aprendizagem, conforme argumentam Faria e Silva (2020), ao defenderem a eficácia de práticas pedagógicas ativas no ensino para crianças e adolescentes.

Por fim, a oficina também foi avaliada quanto à parte considerada mais interessante pelos participantes. Os dados indicaram que 75% dos alunos destacaram as brincadeiras e atividades lúdicas como o momento mais atrativo, 15% preferiram a apresentação dos palestrantes e 10% valorizaram a interação em sala de aula. Esses resultados reforçam a importância das metodologias ativas no ensino para crianças, especialmente em temas como trânsito e transportes.

Observou-se, contudo, que diferentes perfis de alunos responderam melhor a diferentes formatos. Algumas crianças se mostraram retraídas durante as explicações formais, mas participaram ativamente das brincadeiras. Em contrapartida, outras demonstraram insegurança nas atividades lúdicas, mas tiveram bom desempenho nas discussões em sala. Isso evidencia a necessidade de diversificar estratégias pedagógicas, a fim de contemplar múltiplos estilos de aprendizagem e promover a inclusão efetiva no processo educativo.

De maneira geral, os resultados demonstram que a atividade cumpriu seu papel tanto no sentido de promover educação para o trânsito quanto de contribuir com a ampliação do conhecimento sobre os sistemas de transporte. A avaliação positiva por parte dos alunos, aliada à identificação de conteúdos novos assimilados, reforça o potencial das ações extensionistas como instrumento de aprendizagem significativa, além de fortalecer a relação entre universidade e sociedade. Por fim, destaca-se que tais experiências contribuem não apenas para a formação cidadã dos alunos atendidos, mas também para a formação de engenheiros mais conscientes de seu papel social e comprometidos com a transformação da realidade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A oficina sobre sistemas de transportes e sinalização viária proporcionaram aos alunos do ensino fundamental uma experiência educativa lúdica e interativa, promovendo maior conscientização sobre segurança no trânsito e mobilidade urbana. A partir da extensão realizada, os estudantes puderam compreender a importância da sinalização viária, o que contribui diretamente para a formação de cidadãos mais conscientes e preparados para o convívio social no trânsito.

A interação entre os alunos de Engenharia Civil e os estudantes do ensino fundamental foi extremamente enriquecedora, promovendo uma troca de conhecimentos intergeracional e interdisciplinar. A participação ativa dos alunos da escola nas dinâmicas e atividades propostas demonstrou o interesse e a eficácia da abordagem lúdica e prática adotada. Para os discentes da graduação, a experiência proporcionou o desenvolvimento de competências como comunicação, liderança e empatia, além de reforçar a importância do papel social do engenheiro. A atividade também permitiu a aplicação prática dos conteúdos estudados em sala de aula, fortalecendo a relação entre teoria e prática. De forma geral, a iniciativa contribuiu significativamente para o fortalecimento do compromisso social da instituição e para a formação cidadã dos envolvidos.

Agradecimentos
Ao Centro Universitário de Patos – UNIFIP e ao Instituto Educacional Doutor Dionísio da Costa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade Jr. J. de M.; L. P. de Souza e N. L. C. da Silva. (2019). Metodologias ativas: práticas pedagógicas na contemporaneidade. Campo Grande: Editora Inovar, 203p. ISBN 978-65-80476-01-5 Disponível em: https://educacao.riodasostras.rj.gov.br/maisedu/media/2022-06 07_livro_metodologias_ativas_pr%C3%A1ticas_pedag%C3%B3gicas_na_contemporaneidade.pdf (acesso em 03/07/2015).

BRASIL. (2018) Resolução CNE/CES nº 7. Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira e regulamenta o disposto na Meta 12.7 da Lei nº 13.005/2014. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, p. 109-110. Disponível em: https://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=104251-rces007-18&category_slug=dezembro-2018-pdf&Itemid=30192 (aceso em 03/07/2025).

BRASIL. (2014) Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 514, de 18 de dezembro de 2014. Dispõe sobre a Política Nacional de Trânsito, seus fins e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/resolucao5142014.pdf. (acesso em: 04/07/2025).

Duarte, L.Q.; K.H.B. Rolim; J. A. de L. Coêlho. (2019). Avaliação da aprendizagem na educação infantil. Anais do VI Encontro de Jovens Investigadores / Brasil – Portugal. ISSN: 2594-8318. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/join/2019/TRABALHO_EV124_MD1_SA33_ID1707_22082019215748.pdf (acesso em: 04/07/2025).

Meireles, F.F.D.; H.C.A.D.G. Afonso. (2024). A extensão universitária obrigatória voltada para a educação básica como recurso para atingir metas do plano nacional de educação. *SciELO Preprints*. https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.8093

Oliveira, A. e R. Portas. (2024). Cidadania em Diálogo: O Papel Transformador Da Extensão Universitária. A prática da extensão universitária na formação e no impacto dos agentes envolvidos. Campinas, SP: Editora Splendet PUC-Campinas. ISBN 978-65-89946-34-2 Disponível em < https://www.puc-rio.br/sobrepuc/admin/vreep/download/Ebook%20FOREXT%202024.pdf (acesso em 03/07/2015).

Oliveira, G. M. de. e A. N. R. da Silva. (2015). Desafios e perspectivas para avaliação e melhoria da mobilidade urbana sustentável: um estudo comparativo de municípios brasileiros. *TRANSPORTES* v. 23, n. 1, p. 59-68. DOI:10.4237/transportes.v23i1.768

Ruiz-Padillo, A.; C. T. Nodari; D. S. P. García; V. Stefanello. (2021). Caminhos para aplicação de práticas inovadoras de ensino para aprendizagem ativa na engenharia de transportes [recurso eletrônico] / Coordenado pela SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS. 260 p.

Santos, A. M. dos. (2021). Ações na escola para educação e segurança no trânsito [E-book] /– Goiânia : [s.n.], 2021. 123 p. ; il. ISBN (E-book): 978-65-00-23822-8

Santos, A.M. dos. (2021). CURRICULARIZAÇÃO DA EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA: RELATO DE UMA EXPERIÊNCIA NUM CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES. *Revista Extensão & Cidadania*, v. 9, 136–152. DOI: 10.22481/recuesb.v9i16.9193

Teixeira Jr, P.R. e M.P.G. Rios. (2018). THE HUMANITIES IN THE PRODUCTION ENGINEER'S TRAINING: TRENDS AND TENDENCIOSITY. *Revista de Ensino de Engenharia*, *v.* 37. DOI: 10.5935/2236-0158.20180016

Zimmermann, M. H; R. M. C. F. Silveira e A. L. Crisostimo. (2017). A Extensão Universitária Intra/ Extramuros e a Construção Do Conhecimento Científico. Guarapuava: Ed. Unicentro. p. 27-54. ISBN 978-85-7891-208-6. Disponível em: https://www3.unicentro.br/ppgen/wp-content/uploads/sites/28/2017/11/A-Extens%C3%A3o-Universitaria-e-a-Produ%C3%A7%C3%A3o-de-Conhecimento.pdf (acesso em 03/07/2015).

Maria Ingridy Lacerda Diniz (mariaingridydiniz@gmail.com)
Universidade Federal de Campina Grande, Rua Aprígio Veloso, nº 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, Brasil.
Osires de Medeiros Melo Neto (osiresdemedeiros@gmail.com)
Universidade Federal de Lavras, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia, Aquenta Sol - Câmpus Universitário - CEP 37200-000 - Lavras, MG, Brasil.
Mariana Silva Nascimento (mariana.s.nascimento@estudante.ufcg.edu.br)
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA, Rua Aprígio Veloso, nº 882, Bairro Universitário, Campina Grande, Paraíba Brasil.
Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix (chrysttyan.thalles@estudante.ufcg.edu.br)
Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Rua Aprígio Veloso, nº 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, Brasil.
Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena (adriano.elisio@professor.ufcg.edu.br)
Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Rua Aprígio Veloso, nº 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, Brasil.

EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES: UMA AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO ESTUDO DE CASO COMO ESTRATÉGIA DE ENSINAGEM

Daniela Vanessa Rodriguez Lara[1,2], **Matheus Lemos Nogueira**[1], **Caroline Tomazoni Santos**[1]
[1]Universidade Federal do Paraná, [2]Universidade de São Paulo

RESUMO
O objetivo deste trabalho consiste em analisar o estudo de caso como estratégia de ensinagem, aplicado à atividade extensionista em Engenharia de Transportes, desenvolvida na disciplina *Introdução à Engenharia e Inovação*, do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O estudo de caso investiga, por meio de questionário *online*, as principais barreiras ao uso de modos ativos e transporte público coletivo nos deslocamentos da comunidade acadêmica até o *campus* Centro Politécnico da UFPR. Os resultados da atividade de extensão foram apresentados em formato de relatório e exposição de *banners* na Feira da disciplina. A análise qualitativa da atividade extensionista demonstrou, além da importância da extensão universitária para a formação tanto pessoal quanto profissional de todos os envolvidos, a adequabilidade e replicabilidade da estratégia ao contexto da extensão universitária, em diferentes ambientes acadêmicos e cursos de graduação.

1. INTRODUÇÃO

A institucionalização e a curricularização da extensão nas instituições de ensino superior brasileiras são temas amplamente debatidos desde a década de 1990 (FORPROEX, 2007). O tripé composto pelo ensino, pesquisa e extensão impulsiona não apenas uma formação profissional, cultural e social abrangente dos estudantes, como também a práxis do conhecimento acadêmico em comunidades locais (Biondi, 2011; Floriano *et al.*, 2017). Devido à sua importância, as atividades de extensão devem instigar os alunos no processo de desenvolvimento e aperfeiçoamento acadêmicos, formando cidadãos críticos e capacitados (Floriano *et al.*, 2017; Pinheiro e Narciso, 2022).

Para garantir a adesão das instituições de ensino superior às ações de extensão foi estabelecida a Resolução n° 2, de 24 de abril de 2019, que institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia (MEC, 2019) e apresenta recomendações para a elaboração do novo Projeto Pedagógico do Curso (PPC). No Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR), o PPC foi atualizado em 2023 (UFPR, 2023). Embora essas especificações normativas já existam há alguns anos, a implementação das atividades de extensão em cursos de graduação, como o curso de Engenharia Civil, ainda enfrenta entraves, falta de clareza e dificuldades.

Nesse contexto, foi criada a disciplina *Introdução à Engenharia e Inovação*, inserida na nova grade curricular do curso de Engenharia Civil da UFPR. A disciplina é categorizada como integradora e extensionista. A primeira categoria refere-se ao fato de nela atuarem, em conjunto, professores dos Departamentos de Transportes (DTT), de Construção Civil (DCC) e de Hidráulica e Saneamento (DHS). A segunda refere-se à curricularização da extensão, conforme diretrizes da Resolução nº 7 do Conselho Nacional de Educação, vinculado ao Ministério da Educação (MEC, 2018). O presente artigo trata da atividade de extensão em Engenharia de Transportes realizada junto ao DTT.

As atividades de extensão inseridas nas disciplinas de graduação em engenharia demandam a aplicação de estratégias de ensinagem compatíveis com metodologias de aprendizagem ativas, como o estudo de caso. Segundo Anastasiou e Alves (2015), essa estratégia envolve a análise detalhada e objetiva de uma situação real que exige investigação e representa um desafio para os estudantes. No estudo de caso, o papel principal do professor consiste em mediar a construção do conhecimento e orientar o estudante na investigação do tema proposto, desde a identificação do problema até a formulação de possíveis soluções (Vieira *et al.*, 2017). Na disciplina *Introdução à Engenharia e Inovação*, adotou-se o estudo de caso como estratégia de ensinagem. Dessa forma, o objetivo deste artigo consiste em analisar essa abordagem no contexto da atividade extensionista em Engenharia de Transportes desenvolvida ao longo da disciplina. Por sua vez, o principal intuito da atividade de extensão é evidenciar a importância e promover o incentivo do uso de sistemas não motorizados e coletivos em todos os ambientes, inclusive no universitário.

2. A DISCIPLINA INTRODUÇÃO À ENGENHARIA E INOVAÇÃO

A disciplina integradora e extensionista *Introdução à Engenharia e Inovação* é ofertada semestralmente aos alunos calouros do curso de Engenharia Civil, sob a responsabilidade do DTT, do DCC e do DHS. A cada departamento está vinculado um projeto de extensão, que varia a cada semestre letivo. Desde sua criação, a disciplina já foi ministrada por 17 docentes, o que representa cerca de 25% do corpo docente do curso de Engenharia Civil (Santos *et al*., 2025). Neste estudo, é abordado o primeiro semestre de 2025, período no qual a disciplina teve sua quinta edição e contou com a participação de seis docentes, sendo dois deles do DTT. Os projetos de extensão vinculados aos departamentos deste semestre foram: o Grupo de Estudos em Transportes (GET) e o Escritório Popular de Planejamento e Engenharia Urbana (EPPEU), ambos vinculados ao DTT; o Grupo de Estudos em Durabilidade de Estruturas (GEDE), vinculado ao DCC; e Água & Ação, vinculado ao DHS.

O plano de ensino da disciplina pode ser dividido em três etapas. A primeira etapa ocorreu entre abril de 2025 e início de maio de 2025. Nessa etapa, foram realizadas aulas expositivo-dialogadas abordando temas como o papel da engenharia na sociedade, as atribuições do engenheiro, formulação formal de problemas e ética; dinâmicas práticas e de gamificação, tais como o jogo *Jenga*, *Padlet* e construção de pontes de macarrão. A segunda etapa ocorreu em maio de 2025. Nessa etapa, os 94 discentes foram divididos em turmas menores e passaram a atuar em atividades extensionistas específicas a cada um dos Departamentos (DTT, DCC, DHS). Após a divisão das turmas, foi proporcionado um espaço de discussão entre os alunos, para que, caso houvesse interesse, fossem realizadas trocas entre os integrantes de cada turma. Na terceira etapa, realizada em junho de 2025, cada turma vinculada a um departamento e grupo de extensão, conduziu atividades específicas de forma independente das demais. Como produto final, cada equipe entregou um relatório técnico contendo a síntese dos resultados. Além disso, as atividades de extensão desenvolvidas foram apresentadas oralmente, em formato de *banner*, durante a *V Feira de Introdução à Engenharia e Inovação*. O evento foi aberto ao público e contou com a participação de docentes, discentes, e servidores da comunidade acadêmica, bem como membros da comunidade local.

3. A ATIVIDADE EXTENSIONISTA DA ÁREA DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

A atividade extensionista realizada junto ao Departamento de Transportes foi desenvolvida na terceira etapa da disciplina *Introdução à Engenharia e Inovação*. Ela incluiu 34 alunos vinculados a um dos seguintes grupos de extensão: GET ou EPPEU.

3.1. Formulação do tema da atividade de extensão

No primeiro semestre de 2025, a proposta dos docentes baseou-se em dois temas centrais e, a partir de cada um, foram definidas as questões de pesquisa a serem investigadas pelos discentes. A justificativa para escolha dos temas está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11.2. e 11.7, que discorrem sobre o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes. A Tabela 1 apresenta um resumo dos temas, perguntas de pesquisa, hipóteses e objetivos elaborados para a atividade de extensão pelos docentes.

Tabela 1: Resumo dos temas, perguntas de pesquisa, hipóteses e objetivos formulados para a atividade de extensão

Tema	Perguntas de Pesquisa (PP)	Hipótese	Objetivos
Barreiras ao uso de modos de transportes mais sustentáveis nos deslocamentos ao *campus* Centro Politécnico da UFPR.	PP1. Qual o modo de transporte mais frequentemente utilizado pela comunidade acadêmica para chegar ao *campus*?	Os deslocamentos de estudantes para o *campus* são realizados majoritariamente por modos de transportes motorizados individuais, ou seja, modos não sustentáveis.	Identificar as principais barreiras ao uso de modos mais sustentáveis nos deslocamentos até o *campus.*
	PP2. Quais as barreiras ao uso de modos de transportes mais sustentáveis apontadas pela comunidade acadêmica nesses deslocamentos?		
	PP3. Como o uso de modos ativos e do transporte público coletivo poderia ser incentivado no *campus*?		
Percepção de segurança pública e escolha modal nos deslocamentos ao *campus* Centro Politécnico da UFPR.	PP4. Qual a percepção de segurança dos diferentes usuários de modos de transportes no *campus*?	A segurança pública é um fator que afeta negativamente a escolha por modos de transportes mais sustentáveis nos deslocamentos até o *campus*.	Promover uma melhora da sensação de segurança nos deslocamentos até o *campus*.
	PP5. Nos deslocamentos ao *campus*, a percepção de segurança está associada com a escolha do modo?		

3.2. Procedimentos de análise

Os docentes da área de transportes propuseram que os discentes com eles alocados realizassem uma análise exploratória acerca das principais barreiras ao uso de modos ativos e de transporte público coletivo nos deslocamentos da comunidade acadêmica até o *campus* Centro Politécnico da UFPR, localizado no bairro Jardim das Américas em Curitiba/PR.

Como principal procedimento metodológico, os alunos aplicaram um questionário *online* adaptado do projeto de pesquisa *My Neighbourhood, My Streets* desenvolvido por Scholes *et al.* (2016). O questionário foi elaborado e formulado na plataforma *Tally* pelos docentes, sendo testado previamente com os integrantes do GET. O questionário adaptado possui 32 perguntas que abordam a mobilidade, a percepção de segurança e a caracterização dos respondentes. Após a coleta de dados, foi realizada a análise exploratória dos dados utilizando o *software livre Jasp*. A análise exploratória dos resultados incluiu: estatística descritiva, elaboração de tabelas de contingência e verificação do teste qui-quadrado de independência.

3.3. Aplicação da atividade de extensão nos grupos de trabalho

Os 34 alunos da turma foram divididos em 6 grupos, com 5 a 6 integrantes cada, de acordo com os blocos temáticos do questionário, conforme listado a seguir:

- G1: Caracterização dos usuários e Escolha modal (PP1);
- G2: Barreiras que impedem ou dificultam a locomoção a pé no entorno do *campus* (PP2 e PP3);
- G3: Barreiras que impedem ou dificultam a locomoção a pé até o *campus* (PP2 e PP3);
- G4*: Barreiras que impedem ou dificultam a locomoção de bicicleta até o *campus* (PP2 e PP3);
- G5: Barreiras que impedem ou dificultam a locomoção usando o transporte público coletivo até o *campus* (PP2 e PP3);
- G6: Percepção de segurança e Escolha modal (PP4, PP5).

*O grupo G4 não compareceu durante o desenvolvimento da atividade de extensão.

As atividades de extensão foram desenvolvidas durante duas semanas, identificadas como Semana 1 e 2 na Tabela 2. Na Semana 1, foram realizadas aulas expositivo-dialogadas, atividade prática para o entendimento do processo de elaboração de questionários e exercícios práticos para formulação de questionários na plataforma *Tally*. O período entre as Semana 1 e 2 (de 23 a 30 de maio de 2025), foi reservado para a coleta de dados pelos discentes, estipulando-se uma meta de 20 respondentes por grupo. Na Semana 2, com os dados coletados realizou-se a análise exploratória dos dados utilizando o *software livre Jasp*, que foi conduzida em um laboratório de informática em conjunto com os discentes e integrantes do GET, sob a supervisão e orientação dos docentes responsáveis. Adicionalmente, foi reservado uma parte da aula para início da confecção dos *banners* e relatório técnico. Na segunda semana, também foi realizada uma visita técnica à Urbanização de Curitiba S/A (URBS), empresa responsável pelos equipamentos e espaços públicos e pelo sistema de transporte da cidade de Curitiba.

Tabela 2: Cronograma das atividades extensionistas

Semana	Descrição da Atividade
Semana 1	Aula expositivo-dialogada contendo os seguintes tópicos: a) Principais barreiras aos deslocamentos ativos e por transporte público coletivo; b) Segurança pública e como ela pode afetar a escolha do modo de transporte; c) Métodos utilizados para a caracterização do usuário; das dificuldades nos trajetos a pé, de bicicleta e por transporte público coletivo; e, das percepções e escolha do modo de transporte; d) Comitê de Ética em Pesquisa e Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE); e) Amostragem; f) Elaboração de questionários; g) Levantamento de questões relevantes para cumprir com o objetivo; h) Elaboração de questionários em uma plataforma online .
	Exercício prático: Aplicação do questionário entre os alunos da atividade extensionista e pré-análise dos resultados.
	Aplicação do questionário ao restante da turma (resultando na amostra final analisada na atividade).
Semana 2	Análise e interpretação dos resultados a partir da amostra final.
	Início da elaboração dos *banners* e dos relatórios.
	Visita de campo na Urbanização de Curitiba S/A (URBS).
Semana 3	Elaboração dos *banners* e dos relatórios.
Semana 4	Feira da disciplina: V Feira de Introdução à Engenharia e Inovação.

Na semana posterior, a turma voltou a ser unificada (com os 94 alunos) e todos os alunos foram instigados a

desenvolver os *banners* e os relatórios, o que permitiu ter-se contribuições dos docentes vinculados a outros departamentos (DCC e DHS), garantindo a interdisciplinaridade da atividade. Na Semana 4, ocorreu a *V Feira de Introdução à Engenharia e Inovação*, quando todos os trabalhos desenvolvidos foram expostos, em formato de *banner*, e apresentados oralmente durante o período matutino para a comunidade acadêmica do *campus* Centro Politécnico, moradores locais e estudantes de ensino médio. Foi recomendado que as apresentações ao público durassem cerca de 10 min. Os alunos ficaram livres para fazer a gestão e organização das apresentações dos grupos, com a única restrição que todos os integrantes deveriam participar das apresentações orais. Durante o evento, foi realizada uma avaliação da apresentação oral, *layout* do *banner*, conteúdo e conclusões por meio de questionário *online* (*Google Forms*), em que os próprios alunos e o público puderam dar as suas opiniões. Esse questionário foi utilizado para atribuir parte da nota da atividade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE A ATIVIDADE DE EXTENSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados e os desfechos da atividade extensionista realizada junto ao Departamento de Transportes durante as Semanas 1 a 4 (Tabela 2). Na Semana 1, durante as aulas expositivo-dialogadas, os alunos demonstraram interesse pelos temas apresentados, fazendo questionamentos e participando ativamente da aula. Quanto ao exercício, os alunos responderam ao questionário *online* formulado pelos docentes, sendo enfatizado que o papel deles ao responderem ao questionário seria o de levantar possíveis falhas nas questões, ambiguidades, identificação de perguntas que poderiam ser incluídas e perguntas que poderiam ser suprimidas. O retorno dessa tarefa foi satisfatório, uma vez que eles demonstraram ter compreendido, a necessidade da validação do questionário por meio de uma amostra piloto. Além disso, houve diversas contribuições para o aprimoramento do questionário que seria aplicado na Semana 2.

Na Semana 2, os grupos deveriam ter aplicado o questionário *online* em, pelo menos, 20 pessoas. Contudo, nenhum dos grupos realizou essa coleta, sendo que apenas os próprios integrantes dos grupos e os membros do GET responderam ao questionário. Dessa forma, o tamanho da amostra limitou-se a 38 respondentes. Quanto ao exercício prático para análise exploratória dos dados, os alunos apresentaram algumas dificuldades para entender os procedimentos de cálculo e interpretação dos resultados, dado que são alunos calouros e não possuíam base teórica apropriada. A dificuldade foi superada por meio de atendimentos e explicações individuais, realizados com o auxílio de integrantes do GET. Em relação à visita técnica à URBS, foi realizada uma palestra sobre a empresa, processo de urbanização, Plano Diretor e Plano de Mobilidade da cidade de Curitiba e, na sequência, apresentação do Centro de Controle Operacional. Os alunos apresentaram entusiasmo e interesse durante as atividades da visita técnica, realizando diversos questionamentos. Na Semana 3, os alunos apresentaram o *banner* e o relatório técnico parcialmente concluídos para discussão em aula, sendo que apenas um dos grupos não havia iniciado a confecção dos mesmos. Embora os alunos tenham demonstrado entendimento e compreensão aos comentários e sugestões realizados pelos docentes, nem todos os pontos discutidos em aula foram corrigidos, indicando uma dificuldade ou falha de comunicação nesse processo. Nesta semana, os docentes do DTT ficaram disponíveis para atendimento extraclasse aos grupos, sendo realizadas correções dos arquivos digitais antes da entrega final. Esse retorno nos arquivos digitais via e-mail, demonstrou-se mais eficiente em relação à compreensão e ao entendimento das correções e sugestões feitas tanto para o aprimoramento do *banner* (para apresentação na feira), quanto para o relatório (para avaliação).

Na Semana 4, a *V Feira de Introdução à Engenharia e Inovação*, contou com um público expressivo, sendo coletadas 286 respostas ao formulário referente a pesquisa de opinião do público. No geral, os grupos exibiram um *banner* bem estruturado, contendo Introdução, Problema, Objetivos, Método, Resultados e Conclusões. A exposição oral foi adequada e dentro do tempo recomendado (10 min). A comunicação no grupo e entre grupos foi benéfica, caracterizada pelo compartilhamento de ideias, métodos e conclusões relacionadas aos produtos da atividade de extensão. A interação e as dinâmicas de aprendizado podem ser refletidas bidirecionalmente, tanto entre os discentes quanto entre os discentes e docentes. Além disso, a comunicação com a comunidade externa à academia também se demonstrou valiosa, uma vez que os grupos tiveram a oportunidade de interagir e apresentar os resultados alcançados, incentivando a disseminação da ciência com uma linguagem acessível a grupos sociais distintos. Quanto ao relatório técnico, no geral, os grupos indicaram não ter compreendido a formulação de problemas e objetivos, mesmo que os tenham apresentado corretamente na ocasião da feira. Houve problemas de formatação, coloquialismos e falta de citação e referenciamento das fontes utilizadas, indicando que se torna necessário incorporar nos próximos semestres da disciplina diretrizes para elaboração de relatórios técnicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atividade extensionista desenvolvida na disciplina *Introdução à Engenharia e Inovação* do curso de Engenharia Civil da UFPR, sob a responsabilidade do Departamento de Transportes demonstrou a importância da extensão universitária para a formação tanto pessoal quanto profissional dos discentes e docentes envolvidos. O estudo indicou que a extensão universitária vai além da difusão do conhecimento acadêmico-científico, pois promove o entrosamento entre a universidade e a sociedade, fortalecendo o desenvolvimento social, cultural, econômico e tecnológico. Os resultados obtidos estão alinhados com Pinheiro e Narciso (2022), que evidenciaram a extensão universitária como uma importante ferramenta ao estímulo da pesquisa, à intensificação ao acesso à educação, à democratização do conhecimento, à criação de novos espaços para a difusão e o fortalecimento da relação entre universidade e comunidade.

Adicionalmente, conclui-se que a escrita dos relatórios e a realização da feira para exposição dos *banners* contendo os resultados obtidos, e que marca o fechamento das atividades de extensão, são estratégias adequadas e condizentes com os princípios extensionistas. De um lado, porque o registro textual pode auxiliar na futura elaboração de documentos que sustentem medidas práticas que ajudem a reduzir as barreiras ao uso de modos ativos e de transporte público coletivo nos deslocamentos ao *campus* Centro Politécnico, por outro lado observou-se uma efetiva participação, colaboração e interação dos discentes com os docentes (e vice-versa) e discentes com o público (e vice-versa) durante a apresentação dos trabalhos na feira. Dessa forma, o estudo de caso como estratégia de ensinagem demonstrou ser apropriado ao contexto da atividade extensionista desenvolvida ao longo da disciplina, podendo ser replicado em diferentes ambientes acadêmicos e cursos de graduação. Para as edições futuras, recomenda-se incentivar a participação discente na fase de coleta de dados por meio de técnicas de reforço positivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anastaiou, L. G. C. e L. P. Alves (2015) *Processos de ensinagem na universidade: pressupostos para as estratégias de trabalho em aula*. Univille, Joinville.

Biondi, D. (2011) A extensão universitária na formação de estudantes do curso de engenharia ambiental - UFPR. *Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, *26* (janeiro a junho de 2011), 1–17.

Floriano, M. D. P.; I. B. da Matta; F. L. Monteblanco e A. L. B. Zuliani (2017) Extensão universitária: A percepção de acadêmicos de uma universidade federal do estado do Rio Grande do Sul. *Extensão*, *16*(1), 9–35.

FORPROEX (2007) *Extensão Universitária: Organização e Sistematização*. (E. J. Corrêa, Ed). Coopmed, Belo Horizonte: Fórum de Pró-Reitores de Extensão das Universidades Públicas Brasileiras.

MEC (2019) Resolução n. 2, de 24 de abril de 2019. Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Brasília: Ministério da Educação.

MEC (2018) Resolução nº 7 de 18 de dezembro de 2018. Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira e regimenta o disposto na Meta 12.7 da Lei nº 13.005/2014, que aprova o Plano Nacional de Educação - PNE 2014 - 2024 e dá outras providências. Brasília: Ministério da Educação.

Pinheiro, J. V. e C. S. Narciso (2022) A importância da inserção de atividades de extensão universitária para o desenvolvimento profissional. *Revista Extensão & Sociedade*, *14*(2).

Santos, D. C. dos; A. P. B. Capraro; D. H. M. Detzel; C. T. Santos; M. L. Nogueira e D. V. R. Lara (2025) Reflexões sobre a docência compartilhada na disciplina Introdução à Engenharia e Inovação do Curso de Engenharia Civil da UFPR. In Anais do II SimCoDoC - Simpósio sobre Codocência e Docência Compartilhada. Petrópolis: SimCoDoc.

Scholes, S.; S. Boniface; J. Stockton e J. Mindell (2016) *Developing a questionnaire to assess community severance, walkability, and wellbeing: results from the Street Mobility Project in London* (No. 5). London, United Kingdom. Obtido de: <http://discovery.ucl.ac.uk/1474883/> Acesso em: 15/09/2025

UFPR (2023) *Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

Vieira, J. de A.; M. M. M. Vieira e R. Pasqualli (2017) Estudo de caso como estratégia de ensino para a Educação Profissional e Tecnológica. *Série-Estudos - Periódico do Programa de Pós-Graduação em Educação da UCDB*, 143–159. doi:10.20435/serie-estudos.v22i44.1012

Daniela Vanessa Rodriguez Lara (dvanessa.lara@usp.br), *Matheus Lemos Nogueira* (nogueiramatheus@ufpr.br), *Caroline Tomazoni Santos* (caroline.tomazoni@ufpr.br)
Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100, Prédio de Administração, 2º andar, Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Parque Arnold Schimidt, São Carlos, SP, Brasil

POR QUE ELAS FICAM? INVESTIGANDO O INTERESSE SUSTENTADO DE MENINAS NAS ENGENHARIAS

Ana Júlia de Oliveira Tertuliano[1], **Andreza Dornelas de Souza Roma**[1], **Luiza Ferreira Nastri**[1]
Cira Souza Pitombo[1]
[1]Universidade de São Paulo / Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO
Este estudo, relacionado a uma atividade de extensão, investigou os fatores que influenciam a manutenção ou mudança do interesse de meninas do ensino médio por carreiras nas áreas de exatas e engenharias desde a infância. A pesquisa foi realizada com 409 alunas de uma escola pública de São Carlos (SP), utilizando uma Roda de Conversa e aplicação de um formulário. Os dados foram analisados utilizando o algoritmo *Classification And Regression Tree,* testes de associação qui-quadrado e análises gráficas. Os resultados indicam que fatores como apoio escolar, presença de modelos femininos, curiosidade científica, participação em atividades extracurriculares e percepção de autodesempenho influenciam positivamente a permanência do interesse. Por outro lado, o desencorajamento familiar e o nível de escolaridade do pai também se mostraram relevantes, reforçando o impacto do fenômeno conhecido como *dream gap*. O estudo contribui para o desenvolvimento de estratégias de promoção da equidade de gênero nas ciências e engenharias.

1. INTRODUÇÃO

Apesar dos avanços nas últimas décadas para aumentar a representação feminina nas áreas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática, as mulheres continuam sub-representadas nos cursos e profissões ligados às ciências exatas e às engenharias (National Science Board, 2022; UNESCO, 2017). Essa disparidade não representa apenas uma questão de igualdade e justiça social, mas também uma limitação para o desenvolvimento sustentável e para a inovação, uma vez que equipes diversificadas tendem a produzir soluções mais abrangentes e eficazes para diferentes desafios (Page, 2007; Hill et al., 2010).

Pesquisas destacam a importância de fatores como o suporte familiar, a presença de modelos femininos nas áreas exatas e a oferta de programas de incentivo para aumentar a motivação e a permanência das meninas nas áreas de exatas e engenharia (Leaper et al., 2012; Robnett e Leaper, 2013). Essas estratégias têm mostrado impacto não só no desenvolvimento de competências específicas, mas também no senso de pertencimento e identidade das meninas nas áreas de exatas e tecnologia, contribuindo para sua escolha e manutenção de trajetória profissional no longo prazo (Cecchin et al., 2021).

Diferentes instituições têm promovido estratégias com a finalidade de inspirar meninas a perseguirem carreiras nas áreas de exatas e engenharias. Um exemplo é a campanha global "Feche a Lacuna dos Sonhos" (*Dream Gap*), que visa conscientizar famílias e comunidades para o impacto negativo dos estereótipos de gênero nas escolhas das meninas, especialmente a partir dos cinco anos de idade (Barbie Dream Gap Project, 2018). A ação busca encorajar meninas a não abandonarem suas aspirações e a continuarem acreditando em suas capacidades para trilhar caminhos nas áreas de exatas, engenharias e tecnologia, contribuindo para a formação de uma nova geração mais diversa e inclusiva (Bandura, 1997).

A literatura evidencia que uma combinação de fatores contribui para esse cenário desigual, como estereótipos de gênero, baixa visibilidade de mulheres nas áreas de ciências exatas, dificuldades no ambiente escolar e ausência de estímulos para que meninas mantenham seu entusiasmo e confiança ao longo de sua trajetória escolar (Cheryan et al., 2017; Dasgupta e Stout, 2014). No entanto, enquanto muitos estudos destacam as dificuldades enfrentadas por meninas para acessar as exatas e as engenharias, são escassas as pesquisas que abordam aquelas que desde a infância continuam interessadas nessas áreas até o ensino médio, assim como aquelas que, apesar de terem mostrado entusiasmo inicialmente, acabam migrando para outras áreas, a partir da adolescência (Blickenstaff, 2005).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é investigar fatores que influenciam a manutenção ou mudança no interesse por exatas e engenharias desde a infância de meninas do ensino médio de uma escola pública em São Carlos (SP). Trata-se de uma atividade de extensão, evolvendo alunos de graduação, pós-graduação da área de Engenharia de Transportes e meninas do ensino médio.

2. ATIVIDADE DE EXTENSÃO

A atividade de extensão, proposta neste trabalho, buscou promover a equidade de gênero e ampliar o acesso de meninas às áreas de Ciências Exatas e Engenharia, alinhando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 4 e 5. O ODS 4, que tem como meta assegurar educação inclusiva,

equitativa e de qualidade, promovendo oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todas e todos. Já o ODS 5 visa alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas (ONU, 2023). A proposta atua nesse contexto ao investigar as causas da sub-representação feminina nas ciências exatas e engenharias desde o ensino médio, com o intuito de propor ações que favoreçam a inclusão e o protagonismo feminino nessas áreas.

A Escola Estadual Dr. Álvaro Guião, localizada em São Carlos (SP), é uma instituição de ensino fundamental e médio com reconhecida relevância histórica e cultural. Para a realização deste trabalho, a parceria entre a universidade e a escola foi essencial, especialmente na aplicação de um formulário direcionado às alunas do ensino médio dos turnos da manhã e da noite. Nesses dois períodos, a escola conta com 846 alunos matriculados no ensino médio, dos quais 528 se identificam com o gênero feminino. Além disso, houve um levantamento de atividades extracurriculares diversas, realizadas na escola, bem como participação em programas externos, de incentivo feminino para ingresso em áreas científicas de exatas. A atividade de extensão visa não somente investigar o interesse feminino desde à infância em tais carreiras, como, em uma segunda etapa, propor atividades extracurriculares para a escola, acompanhadas por alunos de pós-graduação em engenharia de transportes, no intuito de aumentar ou despertar o interesse na área.

3. PROCEDIMENTOS

Em um primeiro momento foi realizada uma Roda de Conversa com as alunas da escola, na qual foi abordado sobre as Engenharias e a atuação feminina. Nesta atividade, discentes da pós-graduação e graduação falaram de seus trabalhos de pesquisa na Engenharia de Transportes e Engenharia Civil e de suas experiências no mercado de trabalho. Em um segundo momento foi desenvolvido e revisado um formulário com trinta perguntas e oito seções: 1) Termo de consentimento, 2) Informações pessoais, 3) Família, 4) Habilidades percebidas, 5) Interesse e motivação, 6) Percepção de gênero e influência externa, 7) Expectativas futuras e carreira e 8) Participação em programas externos. Este formulário foi aplicado de forma presencial nas dependências da escola, onde as alunas eram recebidas pelo grupo discente da pós-graduação e graduação, que explicavam o objetivo do formulário, como preenchê-lo e a importância da participação delas. As alunas então acessavam os formulários usando *tablets* e computadores, fornecidos pela escola nos Laboratórios com acesso à *internet*. Foram coletadas 409 respostas, o que equivale a 77% do total de alunas com matrículas ativas. As coletas foram realizadas no período de 12 a 14 de maio de 2025. A variável dependente foi "*Qual o seu grau de interesse pela área de ciências exatas e engenharias na infância*", caracterizada por uma escala de três pontos.

Após o tratamento dos dados, com o objetivo de identificar os fatores mais relevantes associados ao grau de interesse na infância, foi gerado o algoritmo CART (*Classification and Regression Trees*), proposto por Breiman et al. (1984). O algoritmo funciona segmentando a amostra sucessivamente, de forma binária, considerando subamostras homogêneas (com menor grau de impureza) segundo a variável dependente. Para a construção da árvore, considerou-se como critério de parada o mínimo de 30 observações no nó terminal ou profundidade 5 níveis. Neste trabalho, o algoritmo CART foi utilizado com o objetivo de identificar as variáveis independentes mais importantes para o grau de interesse na infância. A importância normalizada de cada variável é calculada com base na sua contribuição para a redução da impureza nos nós da árvore. Recomenda-se consulta aos trabalhos (Breiman et al., 1984; Pitombo et al., 2017) para maior compreensão do cálculo de importância normalizada.

Após a construção da árvore e identificação das variáveis independentes mais importantes, foi aplicado o teste qui-quadrado para verificar a associação estatística entre cada variável independente, selecionada pelo algoritmo CART, e a variável dependente. Foram consideradas estatisticamente significativas as associações com *p-value* inferior a 0,05. Em seguida, as associações significativas foram exploradas graficamente para visualizar a distribuição das respostas de acordo com os níveis do grau de interesse na infância (variável dependente).

4. RESULTADOS E DISCUSÕES

A seleção das variáveis independentes mais importantes pelo algoritmo CART e os resultados do teste de associação qui-quadrado, considerando a variável dependente "*Qual era o seu grau de interesse quando criança em cursar faculdades voltadas a ciência exatas e engenharias*?" encontram-se na Tabela 1. Em seguida, foi possível analisar o sentido do efeito de cada uma das variáveis independentes. Para isso, foram elaborados gráficos apenas das variáveis que apresentaram associação estatisticamente significativa (*p value*

< 0,05), conforme resultado do teste qui-quadrado. Assim, além de verificar a significância estatística da influência dessas variáveis no fenômeno *dream gap*, os gráficos apresentados também permitem compreender a direção dessa influência.

Tabela 1. Importância de variáveis independentes e teste de associação qui-quadrado.

Variável	Importância normalizada	p-valor (qui-quadrado)	Variável	Importância normalizada	p-valor (qui-quadrado)
Gostaria de fazer faculdade em uma área como engenharia, física, matemática ou ciência da computação?	100%	0,00	Sinto que tenho bom desempenho nas aulas de ciências e matemáticas.	26,8%	0,00
O seu interesse mudou?	86,3%	0,00	O que mais influência sua escolha profissional?	20,9%	0,028
Por que você não possui mais o interesse em cursar faculdades voltadas a ciências exatas e engenharia?	63,4	0,124	Escolaridade do pai.	12,0%	0,013
Me sinto apoiada por colegas e professores quando demonstro interesse por áreas de exatas.	51,8%	0,00	Já ouvi de alguém que "ciência ou engenharia não é para meninas".	7,3%	0,006
Participaria de um curso ou oficina extracurricular de robótica, programação ou engenharia.	43,2	0,00	Turno que estuda.	4,3%	0,057
Me interesso por descobrir como as coisas funcionam (máquinas, eletrônicos, fenômenos naturais).	36,0%	0,00	Tem algum familiar que atua no ramo de exatas?	4,1%	0,489
Tenho professoras ou modelos femininas que me inspiram a seguir na área de exatas.	29,8%	0,00			

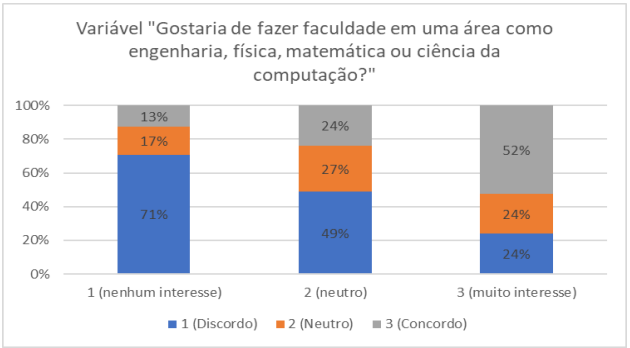


Figura 1: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"Gostaria de fazer faculdade em uma área como engenharia, física, matemática ou ciência da computação"*.

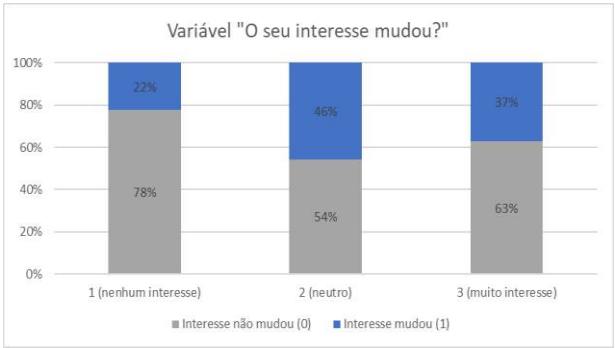


Figura 2: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"O seu interesse mudou"*.

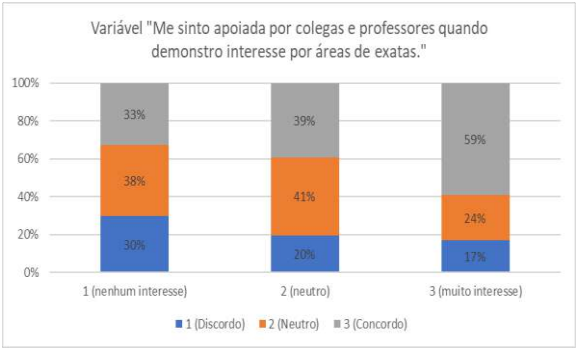


Figura 3: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação "*Me sinto apoiada por colegas e professores quando demonstro interesse por áreas de exatas.*"

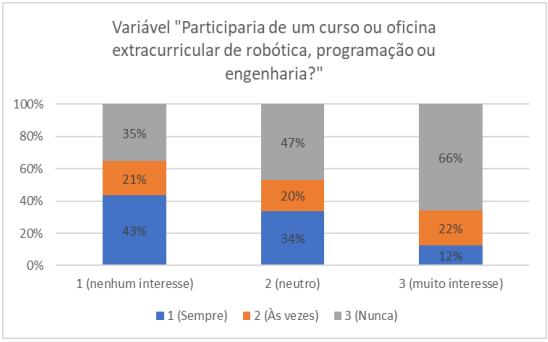


Figura 4: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação "*Participaria de um curso ou oficina extracurricular de robótica, programação ou engenharia?*"

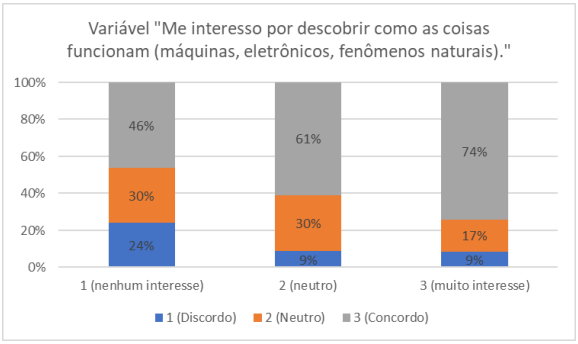


Figura 5: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"Me interesso por descobrir como as coisas funcionam (máquinas, eletrônicos, fenômenos naturais)."*

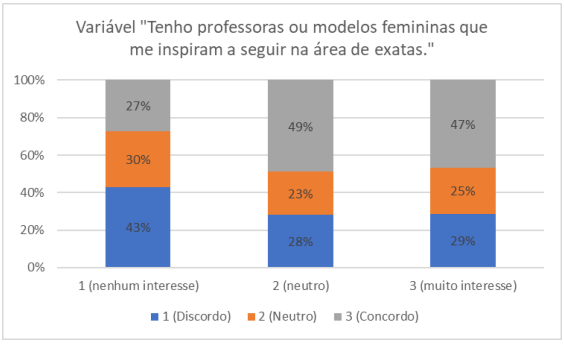


Figura 6: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"Tenho professoras ou modelos femininas que me inspiram a seguir na área de exatas."*

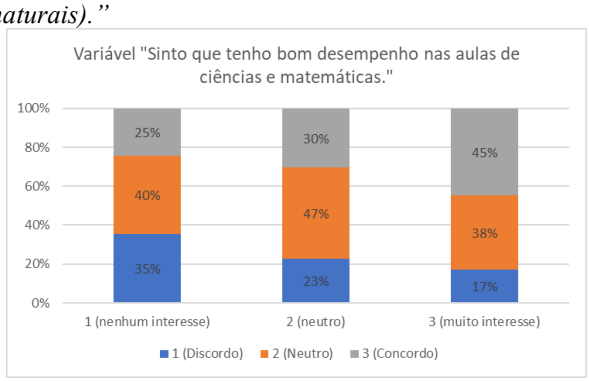


Figura 7: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"Sinto que tenho bom desempenho nas aulas de ciências e matemáticas."*

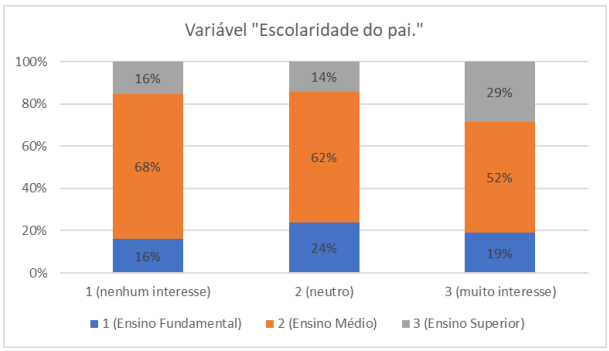


Figura 8: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"Escolaridade do pai."*

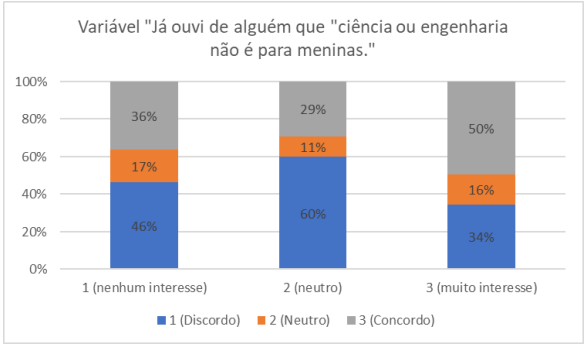


Figura 9: Distribuição do grau de interesse na infância segundo a afirmação *"Já ouvi de alguém que "ciência ou engenharia não é para meninas."*

A variável "Gostaria de fazer faculdade em uma área como engenharia, física, matemática ou ciência da

computação?" apresentou associação direta entre o interesse manifestado na infância e o interesse atual (Figura 1). Observa-se que 52% das meninas que tinham alto interesse na infância ainda mantêm esse interesse. No entanto, 24% desse grupo perderam o interesse ao longo do tempo, caracterizando o *dream gap*. Por outro lado, entre as meninas que tinham baixo interesse na infância, 71% continuam sem interesse atualmente, enquanto 13% demonstram interesse, apesar da baixa motivação inicial.

Analisando a variável "O seu interesse mudou?", constatou-se que 37% das meninas com interesse na infância tiveram seu interesse modificado (*dream gap*). Já entre as meninas com baixo interesse inicial, apenas 22% apresentaram modificação no interesse (Figura 2). Esses resultados indicam que há maior perda de interesse pela área a partir da infância do que acréscimo de interesse.

A variável "Me sinto apoiada por colegas e professores quando demonstro interesse por áreas de exatas" evidenciou que 59% das meninas com alto interesse na infância se sentem apoiadas por figuras femininas em seu ambiente escolar, fator possivelmente relacionado à manutenção do interesse pela área (Figura 3). Além disso, 66% das meninas com alto interesse na infância demonstram maior motivação para realizar cursos extracurriculares na área (Figura 4), 74% maior curiosidade para descobrir como as coisas funcionam (Figura 5) e 47% têm modelos femininos que as inspiram (Figura 6). Também apresentam autopercepção positiva quanto às suas habilidades, com 45% sentindo que têm bom desempenho em matemática/ciências (Figura 7).

A escolaridade do pai, utilizada como *proxy* para a renda familiar, mostra-se uma variável importante (Figura 8). No grupo de meninas com alto interesse em áreas de exatas e engenharia, 29% dos pais possuem ensino superior completo, percentual superior ao observado nos grupos com interesse neutro (14%) e baixo interesse (16%). Por fim, considerando o possível efeito do desencorajamento, verifica-se que 50% das meninas com alto interesse na infância relataram ter sido desencorajadas a trabalhar na área (Figura 9). Esses dados sugerem que tanto a renda familiar quanto o desencorajamento familiar contribuem para o fenômeno *dream gap*.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo, provenientes de uma atividade de extensão em engenharia de transportes, com participação de alunos da graduação, pós-graduação e ensino médio, evidenciam que o interesse de meninas por carreiras em ciências exatas e engenharias é fortemente influenciado por fatores sociais, educacionais e familiares. A manutenção do interesse desde a infância está associada ao apoio de professores e colegas, à presença de modelos femininos inspiradores, à curiosidade científica e à autopercepção positiva de desempenho nas disciplinas de exatas. Por outro lado, o desencorajamento baseado em estereótipos de gênero e o menor nível de escolaridade dos pais, especialmente do pai, contribuem para a perda de interesse ao longo da trajetória escolar, caracterizando o *dream gap*. Os resultados apresentados reforçam a necessidade de políticas e ações educativas que promovam ambientes mais inclusivos e que valorizem o protagonismo feminino nas áreas de exatas e engenharia. Conclui-se que intervenções desde os primeiros anos escolares são fundamentais para combater desigualdades de gênero e ampliar a diversidade nas carreiras científicas e tecnológicas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq Códigos de financiamento: 305973/2023-1 e 152414/2024-0, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES n° 88887.949397/2024-00 e do pesquisador Sérgio Santos de Jesus em parceria com a Escola Estadual Dr Álvaro Guião nas pessoas da diretora Rita de Cássia Baffa Gonçalves e das coordenadoras Ana Silvia Soares Bassani e Eliane Cristina Hernandez Jacyntho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bandura, A. Self-efficacy: The Exercise of Control. New York: W. H. Freeman, 1997.

Barbie Dream Gap Project. 2018. Disponível em: https://shop.mattel.com/pages/barbie-dream-gap. Acesso em: 25 jun. 2025.

Blickenstaff, J. C. Women and Science Careers: Leaky Pipeline or Gender Filter? *Gender and Education*, v. 17, n. 4, p. 369–386, 2005.

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J., 1984. Classification and Regression Trees. Wadsworth International Group, Belmont, CA.

Cecchin, A. C. et al. A importância do suporte familiar e escolar para a escolha de carreiras em STEM por meninas. *Cadernos de Educação*, v. 25, n. 3, p. 564–580, 2021.

Cheryan, S. et al. Why Are Some STEM Fields More Gender Balanced Than Others? *Psychological Bulletin*, v. 143, n. 1, p. 1–35, 2017.

Dasgupta, N.; Stout, J. G. Girls and Women in STEM: Possible Interventions. *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*, v. 1, n. 1, p. 21–29, 2014.

Hill, C.; Corbett, C.; Rose, A. Why So Few? Women in Science, Technology, Engineering, and Mathematics

Leaper, C.; Farkas, T.; Brown, C. S. Adolescent Girls' Experiences and Gender-Related Beliefs in Relation to Their Motivation in Math and Science. *Journal of Research on Adolescence*, v. 22, n. 3, p. 503–517, 2012.

National Science Board. Science and Engineering Indicators 2022. Alexandria, VA: National Science Foundation, 2022.

Organização das Nações Unidas (ONU). Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2023. Nova York: ONU, 2023. Disponível em: https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/ . Acesso em: 3 jul. 2025.

Page, S. E. The Difference: How the Power of Diversity Creates Better Groups, Firms, Schools, and Societies. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2007.

Pitombo, C. S.; SOUZA, A. D.; LINDNER, A. Comparing Decision Tree Algorithms to Estimate Intercity Trip Distribution. Transportation Research. Part C, Emerging Technologies, v. 77, p. 16-32, 2017.

Robnett, R. D.; Leaper, C. Friendship Support for Math and Science Identity in Adolescent Girls and Boys. *Sex Roles*, v. 69, n. 7–8, p. 404–418, 2013.

UNESCO. Cracking the Code: Girls' and Women's Education in STEM. Paris: Unesco, 2017.Washington, DC: American Association of University Women, 2010.

Ana Júlia de Oliveira Tertuliano (ajtertuliano@usp.br); *Andreza Dornelas de Souza Roma* (andrezadornelas@usp.br); *Luiza Ferreira Nastri* (luiza.nastri@usp.br); *Cira Souza Pitombo* (cirapitombo@usp.br).
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 – São Carlos, SP, Brasil

Extensão no ensino em transportes

Comunicações técnicas



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

EDUCAÇÃO E PREVENÇÃO: AÇÕES EXTENSIONISTAS DE DIVULGAÇÃO SOBRE IMPORTÂNCIA DAS FERROVIAS E OS RISCOS DAS OCUPAÇÕES PRÓXIMAS

Louise Ester de Campos, Cleber Dal Bem, Clara Gabriela Miranda Miotti, Paula Sandri Rhoden, Alejandro Ruiz-Padillo
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

RESUMO
A extensão universitária proporciona o desenvolvimento de trocas de experiências e partilha de conhecimentos com impacto na população. Este trabalho relata as experiências para proporcionar a tomada de consciência de moradores próximos às ferrovias mediante ações educativas no âmbito do ensino formal (estudantes em escolas) como não-formal (associação de moradores e população em geral), sobre os riscos relacionados às ocupações adjacentes aos trilhos, além da disseminação de conceitos sobre o modo ferroviário. As atividades realizadas na cidade de Santa Maria-RS contemplaram a criação de mídias digitais, encontros de divulgação e atividades lúdicas com crianças, tornando a linguagem técnica acessível ao público alvo. A experiência mostrou a importância de ações educativas na formação cidadã e ressalta o diálogo com o público alvo, com o intuito de incentivar a adoção de comportamentos mais seguros perto das ferrovias, assim como a tomada de consciência sobre os riscos relacionados às ocupações em suas proximidades.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Ferroviário Brasileiro iniciou seu desenvolvimento em 1854 já com grandes expectativas de impulsionar a economia nacional (Alves *et al*., 2020). Ao longo dos anos, consolidou-se como um modo estratégico, sendo considerado responsável por uma das principais parcelas do PIB brasileiro. Desde a década de 1980, seu valor para a atividade comercial se intensificou, especialmente pelo destaque na exportação e na capacidade de movimentar mais de 1.600 milhões de toneladas de carga por ano. Com isso, as ferrovias se mostraram uma alternativa mais eficiente para o transporte de cargas e apresentam importantes oportunidades de desenvolvimento para a economia do país.

O transporte ferroviário destaca-se por sua alta capacidade de carga, viabilidade econômica e menor impacto ambiental em relação ao modo rodoviário (Keretch, 2017; Rosa e Ribeiro, 2020). No entanto, atualmente enfrenta desafios como a deterioração da infraestrutura e o crescimento de ocupações irregulares nas proximidades dos trilhos (CNI, 2018). Essas ocupações representam riscos para as operações ferroviárias, mas também para os moradores, que normalmente pertencem a estratos sociais de baixa renda e muitas vezes em situação de vulnerabilidade. Esta situação reflete em graves desigualdades estruturais (Wolfe, 1995) e exclusão territorial, o que demanda políticas públicas voltadas à moradia e atenção social (Koga, 2001).

Dessa forma, a relação entre esses moradores e a ferrovia assume uma dinâmica dicotômica, pois muitos deles enxergam o modo ferroviário como uma ameaça para suas residências, em virtude da existência de processos judiciais de reintegração de posse. Por outro lado, essa população desconhece as características e potencialidades do modo ferroviário e, especificamente, os riscos aos que estão expostos e as consequências que as ocupações representam para a operação e a infraestrutura. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e aplicação de estratégias de comunicação e de tomada de consciência mediante a divulgação dos riscos associados às ocupações irregulares no entorno das ferrovias, articulando conhecimentos técnicos com ações educativas realizadas no âmbito de um projeto de extensão universitária.

2. METODOLOGIA

A iniciativa foi desenvolvida no município de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, caracterizada historicamente pela íntima relação com o modo ferroviário e onde se constata a presença significativa de moradias irregulares nas proximidades da malha ferroviária que atravessa o município. O público alvo foi o conjunto de moradores próximos às ferrovias, tanto adultos como crianças, assim como a população em geral, junto com a comunidade acadêmica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), promotora das ações extensionistas. Os temas prioritários deste trabalho foram definidos com base na bibliografia e em visitas técnicas a trechos de ferrovias, realizadas em parceria com a empresa concessionária (RUMO Logística) e a Associação de Moradores Próximos à Ferrovia de Santa Maria e região (AMPF). Estas visitas permitiram uma melhor compreensão sobre a operação ferroviária, a realidade local e a identificação direta das situações de risco enfrentadas pelos moradores. A partir dessa etapa inicial, o projeto adotou quatro abordagens principais: publicações digitais, vídeos educativos, eventos presenciais de divulgação e atividades interativas com a

comunidade.

A produção de publicações digitais constituiu uma das principais estratégias de comunicação do projeto. Esses materiais foram desenvolvidos para apresentar, de forma visual e didática, os diversos aspectos técnicos e sociais do contexto ferroviário. Cada publicação seguiu um padrão gráfico definido, com cores, fontes, imagens e elementos visuais específicos. Para a criação foi utilizada uma plataforma de design gráfico, que permite aos usuários criar gráficos de mídia social, apresentações e outros recursos visuais. O conteúdo foi baseado tanto nas referências bibliográficas quanto em informações obtidas nas visitas em campo. As publicações digitais foram amplamente divulgadas nas redes sociais oficiais da universidade, buscando ampliar o alcance das ações e promover o engajamento da comunidade com os temas propostos. De forma complementar, foram elaborados vídeos educativos que abordaram os mesmos eixos temáticos. O processo de produção incluiu a definição dos temas, a elaboração de roteiros, a escolha dos locais de gravação e a captação das imagens com equipamentos simples, como celulares e microfones, assegurando a praticidade e a acessibilidade. Para os vídeos, também foi criada uma identidade visual, com capas padronizadas, trilha sonora, legendas e transições. Assim como os recursos anteriores, os vídeos foram publicados nas redes sociais, atuando como ferramentas de educação para diferentes públicos.

Para intensificar o diálogo com a comunidade, foram organizados eventos com foco na disseminação do conhecimento técnico e na troca de experiências. Esses eventos envolveram palestrantes convidados, moradores do entorno das ferrovias, a comunidade acadêmica e o público em geral. Os encontros contaram com a exposição dos conteúdos técnicos sobre o modo ferroviário e os riscos relacionados às ocupações por parte de estudantes e professores do projeto. Foi feito o uso de apresentações, com fotos, textos e imagens, adaptando a linguagem para o público alvo para melhor compreensão. O projeto contou ainda com bolsas de extensão financiadas pelo Fundo de Incentivo à Extensão (FIEX) da UFSM, possibilitando maior engajamento e dedicação dos estudantes nas atividades. Por fim, foram realizadas ações educativas na Escola Municipal de Ensino Fundamental Aracy Barreto Sacchis, situada dentro da faixa de domínio público da ferrovia, em um bairro central da cidade de Santa Maria. A atividade foi composta por dois momentos: uma apresentação interativa sobre o modo ferroviário, incluindo vantagens, desvantagens, histórico e segurança nas passagens em nível, adaptada ao nível de compreensão das crianças; e um jogo baseado em um *quiz* em formato de tabuleiro gigante, confeccionado pelos próprios alunos do projeto de extensão com lona plástica e materiais simples como folhas, palitos, canetas e tintas. As perguntas do *quiz* foram baseadas na apresentação anterior, e os alunos participaram em grupos se deslocando pelo tabuleiro respondendo as questões, que contavam com alternativas de resposta.

3. RESULTADOS

A divulgação dos posts informativos nas redes sociais institucionais do Laboratório de Mobilidade e Logística (Instagram, Facebook e Youtube) (Figura 1a), geraram um alcance significativo, promovendo maior visibilidade ao tema e incentivando o compartilhamento de informações entre diferentes públicos. A padronização visual dos materiais contribuiu para a identidade do projeto, facilitando o reconhecimento e entendimento das mensagens transmitidas. Ao todo foram 14 postagens, abordando temas como definição do modo ferroviário e seus elementos, vantagens e desvantagens das ferrovias, a história e o futuro das ferrovias no Brasil, conceitos da faixa de domínio e faixa não edificável das ferrovias, e os riscos específicos: poluição sonora no entorno das ferrovias, deslocamento de pessoas nos trilhos, traçado geométrico da ferrovia em planta e em perfil, drenagem nas ferrovias, descarte de resíduos sólidos e de esgoto no entorno, velocidade e frequência de passagem dos trens, segurança geotécnica, estabilidade das edificações e obras de infraestrutura urbanas no entorno das ferrovias.

Os vídeos educativos (Figura 1b), também demonstraram um impacto positivo, tanto pelo conteúdo didático quanto pela acessibilidade dos recursos utilizados. A combinação de linguagem simples, elementos visuais e recursos sonoros tornou os vídeos mais atrativos entre diversos públicos, especialmente entre jovens e estudantes. Em total, foram publicados 9 vídeos, resumindo as principais informações sobre o modo ferroviário e os riscos envolvidos, com ênfase na segurança dos moradores do entorno.



Figura 1: Exemplos de publicações digitais desenvolvidas. (a) Postagens. (b) Vídeos educativos.

A realização dos eventos (Figura 2), proporcionou momentos importantes de interação direta entre os membros do projeto, a comunidade em geral e representantes de órgãos presentes, com destaque a representantes do Tribunal Regional Federal da 4ª Região (TRF4) e da Secretaria Municipal de Habitação e Regularização Fundiária da Prefeitura de Santa Maria. Os eventos também contaram com espaços de perguntas e respostas, fomentando o envolvimento direto dos participantes com os conteúdos abordados e debatendo com os apresentadores. Dessa forma, os encontros promoveram o diálogo e a troca de experiências, fortalecendo a rede de cooperação entre universidade, sociedade e órgão público.



Figura 2: Eventos de divulgação do projeto. (a) e (b) Em Auditório da Universidade. (c) Na própria comunidade.

Cabe destacar igualmente que alguns dos eventos foram realizados nas próprias instalações da Universidade durante horário letivo (Figuras 2a e 2b), facilitando assim o contato direto da comunidade externa com o ambiente acadêmico, mas outros foram organizados em parceria com a AMPF em locais da comunidade em horário noturno (Figura 2c), propiciando uma maior participação dos moradores. Nos encontros organizados na Universidade participaram estudantes de vários cursos, como os de Direito, Engenharia Sanitária e Ambiental ou Geografia, além do Curso de Engenharia Civil vinculado ao projeto, e de programas de pós-graduação em engenharia. Além disso, o projeto passou a ser reconhecido dentro da própria universidade, resultando em convites para participar de eventos promovidos por outros cursos, assim como fora da universidade, em entrevistas na mídia e participação em reportagens, nos quais os membros do projeto puderam apresentar as ações desenvolvidas, ampliando a visibilidade no projeto.

A ação educativa na escola (Figura 3) destacou-se como um dos momentos de maior aprendizado para os próprios executores do projeto. A proposta buscou promover a divulgação de forma participativa, fortalecendo o vínculo entre a universidade, crianças e comunidade em geral, ao mesmo tempo em que contribuiu para a transmissão de conhecimentos básicos sobre o modo ferroviário e a conscientização sobre os riscos das ocupações em áreas próximas. A dinâmica lúdica e participativa do *quiz* (Figura 3b), aliada à apresentação interativa (Figura 3a), resultou em grande envolvimento dos alunos e reforçou a importância da educação como ferramenta de transformação social. A atividade demonstrou o potencial de projetos de extensão universitária na formação cidadã e na divulgação de comportamentos mais seguros para quem vive próximo às ferrovias,

pois é bem conhecido que as crianças se configuram como transmissores excepcionais de conhecimento para os demais membros da família e da comunidade. Além disso, a atividade foi especialmente reconhecida como produtiva pelos professores da escola, pois facilitou a vinculação de conceitos abordados com matérias como geografia, história e ciências, tanto que solicitaram novas oportunidades para repetição da ação com outras turmas e níveis educativos.



Figura 3: Ação educativa na escola. (a) Apresentação interativa em sala de aula. (b) Jogo educativo no pátio da escola.

Como pode ser percebido, a metodologia adotada teve como foco a construção coletiva do conhecimento, o fortalecimento do vínculo entre universidade e sociedade, bem como a promoção da segurança nas áreas de segurança ferroviária. A participação ativa da comunidade em todas as ações organizadas foi significativa, especialmente de moradores que vivem no entorno das ferrovias, alinhando as ações às demandas reais do território. Além disso, o apoio das instituições parceiras, como a RUMO e o TRF4, foi fundamental.

De modo geral, o projeto ajudou a construir um processo educativo contínuo unindo diferentes áreas do conhecimento e aproximando as informações técnicas da realidade das pessoas. O impacto positivo das ações desenvolvidas foi amplamente percebido, sendo o projeto muito bem aceito pela comunidade e tornando-se tema de debate entre diferentes públicos de forma construtiva e engajada. As publicações digitais, por exemplo, alcançaram mais de 3.473 contas que acessaram os conteúdos nas redes sociais institucionais, enquanto os vídeos somaram um total de 5.432 visualizações, mostrando o interesse gerado pelo conteúdo. As redes sociais oficiais da AMPF e do TRF4 também compartilharam e divulgaram as publicações e encontros, ampliando mais ainda o alcance das ações. Ainda, ao alertar a população e estimular o debate sobre o uso seguro e consciente do espaço, o projeto contribuiu para a prevenção de acidentes e a valorização da informação como ferramenta de transformação. O trabalho conjunto entre universidade, comunidade, órgãos públicos e instituições parceiras reforçou o compromisso social da extensão universitária, mostrando seu papel essencial na divulgação de conhecimento, na formação cidadã e na tomada de consciência em relação ao uso dos espaços urbanos e ferroviários.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou um tema de grande importância: os riscos das ocupações em áreas próximas à ferrovia. A escolha desse assunto está diretamente ligada ao objetivo principal da iniciativa, que foi desenvolver estratégias de comunicação e educação capazes de traduzir conteúdos técnicos em uma linguagem acessível, aproximando a informação da realidade das pessoas. Toda a metodologia aplicada, como a produção de materiais visuais, vídeos educativos, eventos e ações educativas na escola, teve como foco principal ampliar o alcance do conhecimento e estimular a tomada de consciência coletiva. Ao longo do desenvolvimento das atividades, ficou evidente como a troca entre a universidade, a comunidade e instituições parceiras enriqueceu o processo e possibilitou um aprendizado mútuo. O projeto não apenas cumpriu seu papel educativo, mas também despertou o interesse por aprofundar o debate sobre as potencialidades das ferrovias e seus impactos sociais nas cidades. A experiência vivida neste projeto abre o espaço para novas ações, pesquisas e parcerias que possam dar continuidade a essa discussão, alcançando ainda mais pessoas e contribuindo para a construção

de uma sociedade mais informada e participativa.

Agradecimentos
Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq (Processo 305384/2025-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, E. G. C.; R. B. Da S. Ramos e C. R. Silva (2020) Transporte ferroviário no Brasil – desafios e oportunidades. *Revista Conecta*, v. 3, p. 15–27.

Confederação Nacional da Indústria – CNI (2018) *Transporte ferroviário: colocando a competitividade nos trilhos*. Brasília: CNI.

Keretch, M. E. (2017*) Acidentes ferroviários motivados por desgaste na ponta de agulha do aparelho de mudança de via.* Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo.

Koga, D. (2001) *Cidades territorializadas entre enclaves e potências*. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), São Paulo.

Rosa, R.A; Ribeiro, R.C.H. (2020) *Estradas de ferro | Projeto, Especificação e Construção* (2ª edição). Vitória (ES): EDUFES. Disponível em < https://edufes.ufes.br/items/show/562>

Wolfe, M. (1995) Globalizationand social exclusion – some paradoxes. In Rogers, G.; C. Gore e J. Figueiredo (eds.) *Social exclusion: rhetoric, reality, responses*. EUA: InternationalInstitute for Labor Studies.

Louise Ester de Campos (louise.campos@acad.ufsm.br)
Cleber Dal Bem (dalbemcleber5@gmail.com)
Clara Gabriela Miranda Miotti (clara.miotti@acad.ufsm.br)
Paula Sandri Rhoden (paulasandrirhoden@gmail.com)
Alejandro Ruiz-Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Laboratório de Mobilidade e Logística (LAMOT), Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria,
Av. Roraima, n° 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria – RS. CEP 97105-900, Brasil

UM JOGO COMO ESTRATÉGIA PEDAGÓGICA PARA ABORDAR PROBLEMAS COMPLEXOS: UMA POSSIBILIDADE PARA A CURRICULARIZAÇÃO DA EXTENSÃO

Camila Andrade Gortaire, Antônio Nélson Rodrigues da Silva
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO
Nos últimos anos, a curricularização da extensão tornou-se um requisito obrigatório para todas as instituições de ensino superior do Brasil. Além disso, essas instituições têm se reorganizado para incluir formas de ensino diversificadas em seus currículos de graduação. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma estratégia pedagógica para a curricularização da extensão a partir de um jogo concebido para abordar problemas complexos. O jogo apresentado neste trabalho é dividido em duas fases e desafia os participantes a relacionar variáveis e identificar impactos de tecnologias no sistema de mobilidade urbana. Como resultado de uma aplicação, o jogo obteve *feedback* majoritariamente positivo, sendo o trabalho em equipe um dos pontos enaltecidos. Apesar das sugestões de melhorias pontuais, conclui-se que o jogo pode ser uma ferramenta de ensino e aprendizagem alternativa ao modelo tradicional, podendo ser replicado em diferentes contextos e utilizado em atividades destinadas à curricularização da extensão.

1. INTRODUÇÃO

A extensão universitária pode ser definida como "o processo educativo, cultural e científico que articula o ensino e a pesquisa de forma indissociável e viabiliza a relação transformadora entre a universidade e a sociedade" (FORPROEX, 1987). A curricularização da extensão reconhece que ações extensionistas durante o processo formativo dos estudantes são parte integrante do currículo e da carga horária total do curso (PRCEU USP, 2024).

Aprovado pela Lei nº 13.005 de 25 de junho de 2014 (BRASIL, 2014), o Plano Nacional de Educação (PNE) prevê, no item 12.7 de seu Anexo, como estratégia "assegurar, no mínimo, 10% do total de créditos curriculares exigidos para a graduação em programas e projetos de extensão universitária, orientando sua ação, prioritariamente, para áreas de grande pertinência social". Além disso, a Resolução nº 7 de 18 de dezembro de 2018 (BRASIL, 2018), da Câmara de Educação Superior do Conselho Nacional de Educação do Ministério da Educação, no artigo 4º, determina que "as atividades de extensão devem compor, no mínimo, 10% do total da carga horária curricular estudantil dos cursos de graduação, as quais deverão fazer parte da matriz curricular dos cursos". Diante dessas diretrizes, a curricularização da extensão tornou-se um requisito obrigatório para todas as instituições de ensino superior do Brasil.

Além disso, as instituições de ensino superior têm se reorganizado para incluir formas de ensino diversificadas em seus currículos de graduação. Diante dessa transformação, muitos estudos concentram-se na comparação entre novas formas de ensino e o modelo de ensino tradicional (Berbel, 2011; Evangelista e Rodrigues da Silva, 2023; Kuri e Rodrigues da Silva, 2010; Silva Jr. *et al.*, 2013, 2017). Uma dessas novas metodologias destaca a utilização de atividades práticas em sala de aula, incluindo, por exemplo, a aplicação de jogos pedagógicos (Cardoso e Lima, 2012).

À luz do exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma estratégia pedagógica para a curricularização da extensão a partir de um jogo concebido para abordar problemas complexos. Especificamente, o jogo proposto visa facilitar a compreensão de sistemas que envolvem relações de causa e efeito nem sempre evidentes entre variáveis qualitativas e/ou quantitativas.

2. MÉTODO

Esta seção descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento do jogo pedagógico. Inicialmente, apresentam-se os conceitos principais da Dinâmica de Sistemas, metodologia que serve como base para a construção do jogo. Em seguida, a formulação da parte gráfica do jogo é explicada. Nas duas últimas subseções, respectivamente, as fases 1 e 2 do jogo são detalhadas.

2.1. Dinâmica de Sistemas

Dinâmica de Sistemas é uma metodologia de simulação desenvolvida para facilitar a análise de comportamentos dinâmicos em sistemas complexos (Hjorth e Bagheri, 2006; Mirchi *et al.*, 2012). Sua aplicabilidade em contextos com dados numéricos limitados ou incompletos a torna vantajosa para a

formulação de políticas públicas (Pirouzrahi *et al.*, 2025). Devido à eficácia dessa metodologia em abordar desafios complexos de transporte e em auxiliar na análise da implementação de políticas de transporte sustentável, muitos estudos têm adotado esse modelo (Fontoura e Ribeiro, 2021; Pirouzrahi *et al.*, 2025).

Essa metodologia é baseada em Diagramas de Loops Causais (CLDs, do inglês *Causal Loop Diagrams*), ferramentas gráficas úteis para esclarecer as conexões entre os componentes de um sistema. Um CLD é composto por variáveis interligadas por setas com sinais que denotam as influências causais entre as variáveis. Quando o aumento de uma variável aumenta outra variável - ou seja, quando são diretamente proporcionais, a relação causal entre elas recebe um sinal positivo. Por outro lado, quando as variáveis são inversamente proporcionais, a relação causal recebe um sinal negativo (Lara e Rodrigues da Silva, 2021).

2.2. Formulação de diagramas

Foi elaborado inicialmente um CLD representando o sistema de mobilidade urbana em seu estado original, refletindo seu funcionamento típico no dia a dia. Para embasar este modelo, uma revisão bibliográfica permitiu identificar e selecionar variáveis relevantes para caracterizar o sistema de mobilidade urbana. Em seguida, o CLD original foi ampliado para incorporar as transformações sistêmicas decorrentes da introdução de três tecnologias: veículos automatizados (AVs), veículos elétricos (EVs) e micromobilidade compartilhada, que envolve o compartilhamento de bicicletas e patinetes. Para isso, foram identificadas na literatura variáveis que surgiram (variáveis externas) e os impactos diretos e indiretos dessas variáveis no diagrama original.

É importante salientar que o jogo pedagógico desenvolvido neste trabalho foca especificamente no sistema de mobilidade urbana e na implementação de AVs, EVs e micromobilidade compartilhada. No entanto, a estrutura metodológica proposta possui caráter genérico, permitindo sua adaptação para a análise de outros sistemas e diferentes tecnologias ou inovações. Além disso, o jogo pode ser transformado em versão analógica.

2.3. Fase 1 do jogo

Na primeira fase do jogo, utiliza-se apenas o diagrama original do sistema de mobilidade urbana, composto por 19 variáveis (Figura 1). A dinâmica inicia com a divisão dos participantes em grupos, cuja quantidade e tamanho são determinados pelo número total de jogadores. No entanto, sugere-se que cada grupo seja limitado a cinco pessoas, para que os grupos tenham mais agilidade para chegar a um consenso dentro do tempo estipulado. Definidos os grupos, a ordem de jogadas é estabelecida através de sorteio.

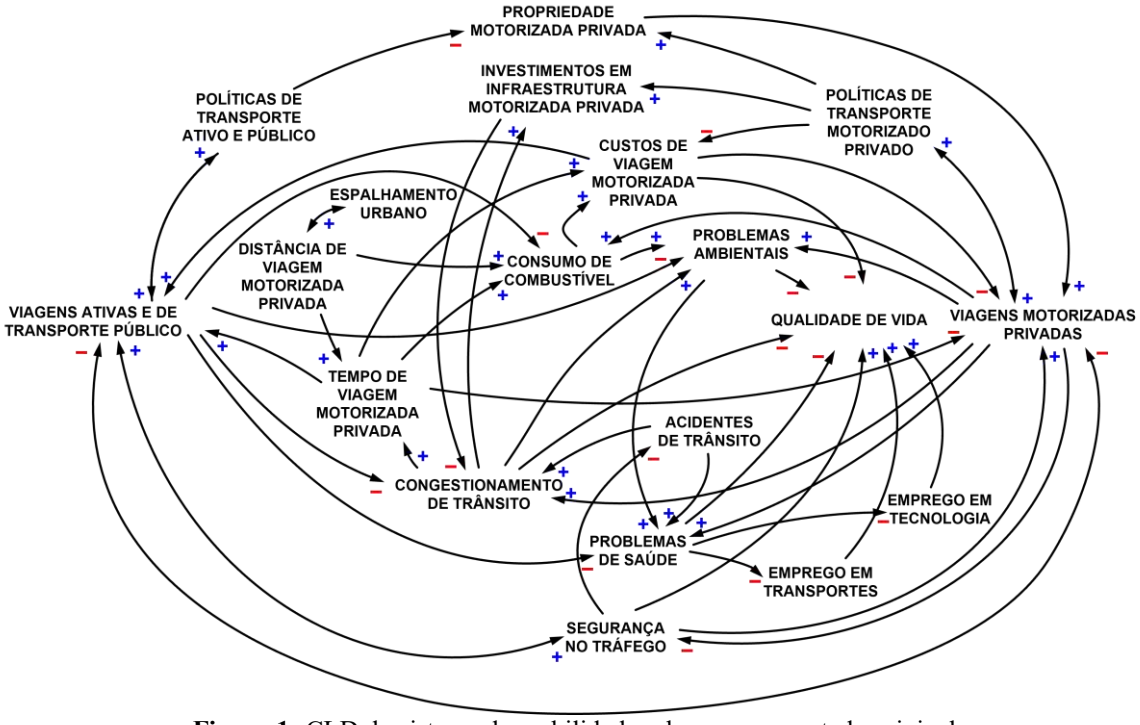


Figura 1: CLD do sistema de mobilidade urbana no seu estado original

Nesta fase, apresenta-se aos participantes uma versão parcial do diagrama original, contendo apenas duas (*VIAGENS ATIVAS E DE TRANSPORTE PÚBLICO* e *VIAGENS MOTORIZADAS PRIVADAS*) das 19 variáveis visíveis. As demais 17 variáveis são dispostas em uma lista adjacente. Em sua vez da rodada, o grupo deve escolher uma variável da lista e indicar a qual variável já presente no diagrama ela está relacionada. Não é necessário dizer se a relação é direta ou inversa e o tempo de resposta deve ser limitado (aconselha-se um tempo máximo de 30 segundos por grupo, para que o jogo não fique muito longo). Caso a resposta esteja correta, o grupo ganha cinco pontos, caso esteja errada, perde cinco pontos e o jogo segue para o próximo grupo. Quando todas as 17 variáveis forem selecionadas, mostra-se o diagrama completo (Figura 1) e as relações entre as variáveis são explicadas. Concluída essa fase, os pontos de cada grupo são somados.

2.4. Fase 2 do jogo

A segunda fase do jogo é focada nos diagramas que consideram a implementação das tecnologias em questão: veículos automatizados, veículos elétricos e micromobilidade compartilhada. Em cada um desses diagramas há variáveis externas, ou seja, variáveis que surgiram após a implementação das tecnologias. Cada grupo visualiza sequencialmente uma das variáveis externas. Então, o grupo deve tentar descobrir a qual tecnologia, ou seja, a qual diagrama, a variável está associada. Caso a resposta esteja correta, o grupo ganha cinco pontos, caso esteja errada, perde cinco pontos. Nesse último caso, o próximo grupo recebe a mesma variável do grupo que errou anteriormente. Ao terminarem as variáveis externas, mostra-se os três diagramas completos e as relações entre as variáveis são explicadas. Ao final da segunda fase, os pontos da primeira e da segunda fase são somados. Vence o grupo que tiver acumulado mais pontos no total.

3. RESULTADOS DE UMA APLICAÇÃO

O jogo desenvolvido neste trabalho foi inicialmente aplicado durante a 1ª Semana Pedagógica da Universidade de São Paulo, evento que fez parte do Programa de Desenvolvimento Profissional Docente da USP. A atividade visava capacitar docentes para desenvolver uma estratégia de ensino-aprendizagem no formato de um jogo, além de explorar seu potencial como ferramenta para a curricularização da extensão. Posteriormente, o jogo foi aplicado em uma turma de pós-graduação na disciplina *SMM5784 - Preparação Pedagógica: Estratégias de Ensino em Engenharia*, como parte de uma aula sobre metodologias ativas de ensino-aprendizagem.

Em ambas as aplicações, a dinâmica iniciou com uma breve contextualização teórica sobre a metodologia Dinâmica de Sistemas e as tecnologias AVs, EVs e micromobilidade compartilhada. Em seguida, as regras do jogo foram apresentadas e foi feita a divisão e a definição da ordem dos grupos. Por fim, houve a execução das fases 1 e 2 do jogo. Para conseguir avaliar os efeitos da aplicação do jogo, um formulário online foi enviado por e-mail para os participantes da aula da disciplina *SMM5784*, visando obter seu *feedback* sobre a experiência. O formulário continha oito perguntas, sendo seis de múltipla escolha e duas abertas. Dos 17 participantes, 15 responderam o formulário.

Dos 15 respondentes, 14 acharam que as regras do jogo foram claras e que o trabalho em equipe proposto pelo jogo foi positivo. Além disso, todos os 15 se sentiram motivados a participar mais ativamente do que em uma aula tradicional e acham que o jogo poderia ser usado para ensinar outros conteúdos. No entanto, quatro dos 15 respondentes acham que o jogo ajudou a entender melhor apenas parcialmente as três tecnologias apresentadas (AVs, EVs e micromobilidade compartilhada). Isso pode ser um indício de que a contextualização teórica sobre as tecnologias pré-jogo pode ser um pouco mais longa ou detalhada. Dos 15 respondentes,11 julgaram como “Excelente” a sua experiência com o jogo, enquanto quatro julgaram como “Bom”.

As perguntas abertas trazem mais informações, pois contêm a opinião de cada participante sobre o que mais gostou e o que pode ser melhorado no jogo. Nesse sentido, os respondentes citaram como aspectos positivos a interação com os colegas, o trabalho em equipe e a troca de ideias, a dinamicidade da atividade e a organização e o modelo do jogo. Além disso, alguns citaram que o jogo foi capaz de prender a atenção e aumentar a participação. Em relação ao que pode ser melhorado, alguns reafirmaram que seria interessante fazer uma contextualização teórica mais robusta antes do início da atividade. Um participante sugeriu a mesma coisa, mas citou que outra opção seria reformular as descrições de variáveis para adequá-las ao nível de conhecimento dos participantes. Outro sugeriu que o jogo deveria ocupar uma aula inteira, pois a atividade é extensa. Houve a proposta, também, de fazer algumas rodadas de treino antes do jogo começar, para os participantes se familiarizarem com as regras. Por último, um participante sugeriu que, ao invés de concentrar todas as explicações no final, seria mais eficaz discutir cada resposta imediatamente após sua ocorrência.

4. CONCLUSÕES

A experiência demonstrou que o jogo não apenas envolveu os estudantes de maneira eficaz, mas também incentivou a dinamicidade e a reflexão crítica, tornando-o uma alternativa valiosa para o ensino e aprendizagem. Apesar das sugestões de melhorias, que serão utilizadas para o aprimoramento do jogo, a aplicação atingiu seu objetivo de facilitar a compreensão de sistemas que envolvem relações de causa e efeito nem sempre evidentes entre variáveis. Além disso, a replicabilidade do jogo em diferentes contextos e disciplinas mostra seu potencial para enriquecer o ensino em diversas áreas acadêmicas. Dessa forma, o jogo pode gerar impacto positivo não apenas na formação de alunos de graduação e pós-graduação, mas também ser utilizado em atividades destinadas à curricularização da extensão, principal motivação para a sua criação. Nesse contexto, os alunos de graduação serão capazes de realizar uma dinâmica com a participação ativa do público externo à instituição. O impacto dessa interação se estende não apenas aos envolvidos diretamente, mas também à sociedade em geral.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Berbel, N. A. N. (2012) As metodologias ativas e a promoção da autonomia de estudantes. *Semina: Ciências Sociais e Humanas*, v. 32, n. 1, p. 25-40. DOI: 10.5433/1679-0383.2011v32n1p25

BRASIL (2014) Lei nº 13.005, de 25 de junho de 2014. Aprova o Plano Nacional de Educação (PNE) e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/lei/l13005.htm (acesso em 16/06/2025)

BRASIL (2018) Resolução nº 7, de 18 de dezembro de 2018. Atualiza as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Fundamental. Brasília: Diário Oficial da União. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/55877808 (acesso em 16/06/2025)

Cardoso, I. de M. e R. da S. Lima (2012) Métodos ativos de aprendizagem: O uso do aprendizado baseado em problemas no ensino de Logística e Transportes. *Transportes*, v. 20, n. 3, p. 79-88. DOI: 10.4237/transportes.v20i3.561

Evangelista, B. F. e A. N. Rodrigues da Silva (2023) O desafio de mobilidade como tema de um jogo de tabuleiro com fins didáticos. In Anais do XXXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (Santos, SP). ANPET, v. 2, p. 162416.

Fontoura, W. B. e G. M. Ribeiro (2021) System dynamics for sustainable transportation policies: A systematic literature review. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13. DOI: 10.1590/2175-3369.013.e20200259

FORPROEX - Fórum de Pró-reitores de Extensão das Instituições Públicas de Educação Superior Brasileiras (1987) Documento Final. In I Encontro de Pró-reitores de Extensão das Universidades Públicas Brasileiras (Brasília). Disponível em: 1987-I-Encontro-Nacional-do-FORPROEX.pdf (acesso em 05/06/2025)

Hjorth, P. e A. Bagheri (2006) Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach. *Futures*, v. 38, n. 1, p. 74-92. DOI: 10.1016/j.futures.2005.04.005

Kuri, N. P. e A. N. Rodrigues da Silva (2010) Uma estratégia de ensino em transportes apoiada nos perfis de personalidade dos estudantes. *Transportes*, v. 18, n. 3, p. 72-79. DOI: 10.14295/transportes.v18i3.453

Lara, D. V. R. e A. N. Rodrigues da Silva (2021) Resilience of urban mobility systems: Combining urban subsystems and threats with a system dynamics approach. In Gervasi, O., *et al.* (eds) Computational Science and Its Applications - ICCSA 2021. New York City: Springer, Cham, p. 93-108.

Mirchi, A.; K. Madani; D. Watkins Jr e S. Ahmad (2012) Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resources Management*, v. 26, n. 9, p. 2421-2442. DOI: 10.1007/s11269-012-0024-2

Pirouzrahi, Z.; T. Vanelslander e A. N. Aghdam (2025) Applying system dynamics modelling to modal shift: A systematic review. *Sustainable Futures*, v. 9, p. 100526. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100526

PRCEU USP (2024) Guia de curricularização da extensão universitária dos cursos de graduação. São Carlos: Pró-Reitoria de Cultura e Extensão Universitária, Universidade de São Paulo. Disponível em: https://graduacaonasociedade.eesc.usp.br/wp-content/uploads/2025/05/ebook_Guia_revisado_3ed_2024_11_07.pdf (acesso em 16/06/2025)

Silva Jr., C. A. P. da; H. B. Fontenele e A. N. Rodrigues da Silva (2013) Estilos de ensino vs. estilos de aprendizagem no processo de ensino-aprendizagem: uma aplicação em Transportes. *Transportes*, v. 21, n. 2, p. 30-37. DOI: 10.4237/transportes.v21i2.686

Silva Jr., C. A. P. da; H. B. Fontenele e A. N. Rodrigues da Silva (2017) Mapas conceituais para avaliação do ensino-aprendizagem em uma disciplina de engenharia de transportes. *Revista de Graduação USP*, v. 2, n. 2, p. 23-30. DOI: 10.11606/issn.2525-376X.v2i2p23-30

Camila Andrade Gortaire (camila1gortaire@gmail.com)
Antônio Nélson Rodrigues da Silva (anelson@sc.usp.br)
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Av. Trabalhador São-carlense, 400 - São Carlos, SP, Brasil

Formação, capacitação e avaliação docente

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

PROJETO PONTO DE PARTIDA: CONSTRUÇÃO DE OBJETO DE APRENDIZAGEM SOBRE ANÁLISE MULTICRITÉRIO EM SIG, PARA ESCOLHA DO MELHOR TRAÇADO

Rodrigo Heitor Viana dos Santos[1], **Amanda da Silva Goulart**[1], **Thales Mezzacasa Brum**[1], **Raul Júlio Campelo Motta**[1], **Adamo Costa Dutra**[1], **Carlos Augusto Martini Karpss**[1], **Scheila Dias Quintana**[1], **Daniel Sergio Presta García**[1], **Alejandro Ruiz-Padillo**[2]
[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [2]Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO
Atrair e manter alunos é um desafio premente para as instituições de ensino superior, fazendo com que a criação de Objetos de Aprendizagem (OAs) modernos e atrativos seja imprescindível. OAs são recursos educacionais que apresentam ótimo desempenho na capacitação de alunos e profissionais. O presente artigo trata sobre a confecção de um destes OAs, para a estratégica didática intitulada Projeto Ponto de Partida – PPP. O OA foi elaborado como um vídeo passo a passo com o objetivo de formar/capacitar alunos de graduação em uma técnica de análise multicritério em SIG, para avaliar o desempenho de traçados geométricos rodoviários segundo fatores condicionantes (relevo, hidrografia, ocupação e uso do solo, etc.). O artigo aborda as etapas de desenvolvimento do OA e os cuidados para não apresentar a solução proposta como absoluta e definitiva, indicando possíveis abordagens distintas, visando motivar os alunos a desenvolverem seus estudos de forma personalizada, gerando debates entre si e, consequentemente, um aprendizado profundo.

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, o Brasil tinha 358 mil estudantes de Engenharia Civil. Dados mais recentes indicam apenas 172 mil, uma diminuição de 51% no período (Estado de São Paulo, 2025). São diversos e complexos os fatores que fazem com que os jovens brasileiros percam interesse pela formação nas engenharias. Atrair e manter alunos nas diversas engenharias é um desafio premente para as instituições de ensino superior (Hernandez-de-Menendez et al., 2020). É fundamental que os programas pedagógicos dos cursos de engenharia sejam revisados regularmente, levando em consideração as competências exigidas pelo mercado de trabalho (Chou *et al.*, 2020). O ensino centrado na formação do aluno já não é suficiente, visto que o mercado demanda um profissional com capacitações específicas. A questão a ser considerada é: como oferecer formação e capacitação a alunos de engenharia?

A aprendizagem ativa é uma abordagem pedagógica que coloca o aluno como protagonista do processo de seu aprendizado, por meio de práticas que estimulam a participação ativa dos estudantes (Prince, 2004). Objetos de Aprendizagem (OAs) são recursos educacionais que apresentam ótimo desempenho na capacitação de alunos e profissionais, oferecendo uma curva de aprendizagem elevada, replicabilidade e personalização. Entre os OAs destacam-se os vídeos do tipo "passo a passo", para capacitação no uso de *softwares* e ferramentas.

O Projeto Ponto de Partida (PPP) é uma estratégia didática de aprendizagem ativa, orientada para alunos de graduação do curso de Engenharia Civil (García *et al.*, 2016). O PPP visa oferecer formação nos conteúdos didáticos da disciplina de Rodovias (estudo de traçado, projeto geométrico e projeto de terraplenagem), bem como instrumentalizar (capacitar) os alunos nos *softwares* de QGIS (Sistema de Informações Geográficas – SIG), SAEPRO e CIVIL 3D (*softwares* de projeto de obras de infraestrutura viária). Para tanto, foi desenvolvido um conjunto de vídeos passo a passo, agrupados em *playlist*, como OAs. É possível acessar as *playlist* do PPP por meio do *link*: https://projetopontodepartida.notion.site/capacitacao.

O presente artigo trata sobre a confecção de um destes OAs. Em projetos de rodovias, o estudo de traçado é uma das etapas mais relevantes, visto que uma vez implantada a geometria da via, dificilmente esta será alterada. Para identificar o(s) melhor(es) local(is) para implantação do traçado devem ser considerados múltiplos fatores (relevo, hidrografia, ocupação e uso do solo, etc.) em um cenário georreferenciado. A abordagem a ser utilizada é de análise multicritério em SIG. O OA foi elaborado como um vídeo passo a passo com o objetivo de **formar** alunos de graduação em uma técnica de análise multicritério (AHP – *Analytic Hierarchy Process*) e **capacitar** estes nos comandos do *software* QGIS, para avaliar desempenho de traçados segundo fatores condicionantes. Pretende-se instigar o debate entre alunos sobre pesos e notas a serem considerados para os distintos fatores, bem como instruir sobre comandos nos *softwares* utilizados para a obtenção dos resultados.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada pode ser dividida em seis etapas distintas:

- **Etapa 1 – seleção dos fatores:** com o objetivo de reduzir o grau de subjetividade e evitar resultados tendenciosos, foi utilizada a técnica do painel de especialistas para definição dos fatores (critérios) a serem considerado no estudo (Egilmez *et al*., 2015; Sun *et al*., 2015).
- **Etapa 2 – atribuição de pesos aos fatores:** foi utilizado o Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) para a obtenção dos pesos de cada fator, confrontando-se estes de forma pareada, utilizando uma escala predefinida, chamada escala fundamental de Saaty, que assume valores entre 1 e 9 (e sua recíproca, entre 1 e 1/9) (Saaty, 1980; Kablan, 2004). O método AHP conta com uma estimativa da consistência do processo e das avaliações denominada Razão de Consistência (RC).
- **Etapa 3 – elaboração do mapa de calor das penalizações em SIG:** foram elaborados mapas de calor (arquivos de imagem *rasters*) para cada um dos fatores com o respectivo nível de penalização. Como exemplo é possível observar as penalizações sugeridas para o Fator Uso e Ocupação do Solo. Neste pode-se atribuir penalização igual a zero para o uso da faixa de domínio de vias existentes, visto que estas já foram desapropriadas. É possível atribuir penalizações crescentes para terrenos baldios, área cultivada e edificada, respectivamente. Também pode ser atribuída uma penalização de restrição para que, por exemplo, terras indígenas, quilombolas etc. não ingressem na análise. Uma vez elaborados os mapas de calor de cada fator, procede-se a normalização destes. Na sequência, utilizando-se os pesos da etapa anterior, é elaborada a ponderação que irá gerar o mapa de calor do Fator Nota.
- **Etapa 4 – obtenção da pontuação e ordenamento dos traçados:** com o mapa de calor do Fator de Penalização e traçados elaborados pelos alunos procede-se a obtenção da penalização para cada *pixel*. Conforme a posição do traçado no mapa de calor será atribuída a penalização do *pixel* no mapa de calor sobre a posição respectiva do traçado, gerando um perfil longitudinal de penalizações. Os dados que formam o perfil podem ser exportados para uma planilha eletrônica, permitindo determinar os indicadores de desempenho dos traçados: Extensão, Penalização Total e Penalização/km.
- **Etapa 5 – obtenção do traçado "Ideal" segundo mapa de calor estabelecido:** a partir das camadas contendo o ponto de partida e final e o mapa de calor do Fator de Penalização, é gerado um traçado "Ideal" que minimiza o somatório das penalizações ao longo de seu percurso. O traçado resultante corresponde à rota com menor custo acumulado, considerando os valores de penalização atribuídos a cada *pixel* por onde passa o traçado. Além disso, a penalização total correspondente ao traçado "Ideal" pode ser exportada e utilizada como referência para comparação com os traçados propostos pelos alunos, promovendo uma análise crítica e quantitativa dos resultados obtidos.
- **Etapa 6 – roteiro e elaboração do OA:** para fins de elaboração do OA foi desenvolvido um roteiro, de forma a melhor ordenar os conteúdos a serem abordados. É importante destacar que ao longo da elaboração do OA foram considerados aspectos para que este seja consistente e didático, no conteúdo e na forma. Um dos objetivos principais é de não apresentar a solução proposta como absoluta e definitiva, indicando possíveis abordagens distintas, visando motivar os alunos a desenvolverem seus estudos de forma personalizada, gerando debates entre si e, consequentemente, um aprendizado profundo.

A cada semestre é proposta no PPP uma nova edição para desenvolvimento de estudos e projetos únicos. O presente estudo de caso utilizou as bases de dados georreferenciadas indicadas no Termo de Referência da edição PPP-UFRGS-2023/1 (https://projetopontodepartida.notion.site/pppufrgs20231). O cenário proposto divide-se em dois lotes, dos quais o Termo indicava as coordenadas dos Pontos de Partida (PPs) para cada um, como:

- **Lote 1:** início na interseção da rua Doná Guilhermina com via local, no município de Muliterno/RS (coordenadas Lat/Long 28°19'44.30"S 51°45'38.02"W, e coordenadas UTM-z22 425.446,6982 m E, 6.866.120,0317 m N).
- **Lote 2:** início na interseção da Linha 12 de Outubro com via local, no município de Ibiraiaras/RS (coordenadas Lat/Long 28°22'06.47"S 51°39'04.28"W e coordenadas UTM-z22 436.191,9424 m E, 6.861.807,7326 m N).

3. RESULTADOS E ANÁLISES

O Painel de Especialistas (Etapa 1) foi formado por bolsistas, monitor e professor que atuam no projeto. Estes selecionaram entre as bases de dados georreferenciadas disponibilizadas quatro fatores (critérios) consistentes e didáticos. Também atribuíram, em consenso, as faixas e os valores das penalizações por fator, conforme:

- **DEC – fator declividade:** considera-se que regiões com declividades mais significativas penalizam mais o traçado. O mapa de calor com os valores de declividade em escala contínua foi transformado em um mapa com escala discreta dividida nas faixas: [0%, 5%) – penalização nula, [5%, 20%) - penalização 0,5 e [20%, ...) – penalização 1,0;
- **HID – fator hidrografia:** considera-se penalizar a ocorrência de corpos d'água, em áreas com *buffer* de 30 metros para cada lado das margens (córregos e rios) e de 50 metros para as nascentes, divididos entre as seguintes faixas de penalização: açudes – penalização 0,5; córregos e rios – penalização 0,35; e nascentes – restrição (1.000);
- **USO – fator uso e ocupação do solo:** considera penalização do traçado segundo ocupação e uso do solo. As faixas de penalização atribuídas foram: faixa de domínio de vias existentes (*buffer* de 20 metros) – penalização nula; terrenos baldios – penalização 0,15; mata nativa – penalização 0,225; terrenos preparados para lavoura – penalização 0,375; terrenos em produção – penalização 0,6; edificações – penalização 1,0; e terras indígenas, quilombolas, etc. – restrição (1.000);
- **DIR – fator diretriz:** penaliza traçados que se afastam da diretriz (menor distância possível entre o PP e um ponto de encontro arbitrário entre os dois lotes). Apresenta escala contínua, normalizada, variando entre 0 e 1 entre pontos sobre a diretriz e pontos afastados desta na metade da distância.

A Etapa 2 – atribuição de pesos aos fatores, utilizou o método AHP em planilha elaborada previamente por um dos alunos de mestrado. O Painel de Especialistas atribuiu os valores da escala fundamental de Saaty (Tabela 1), obtendo os pesos, para cada fator, constantes na Tabela 2 e RC em conformidade (abaixo de 10%).

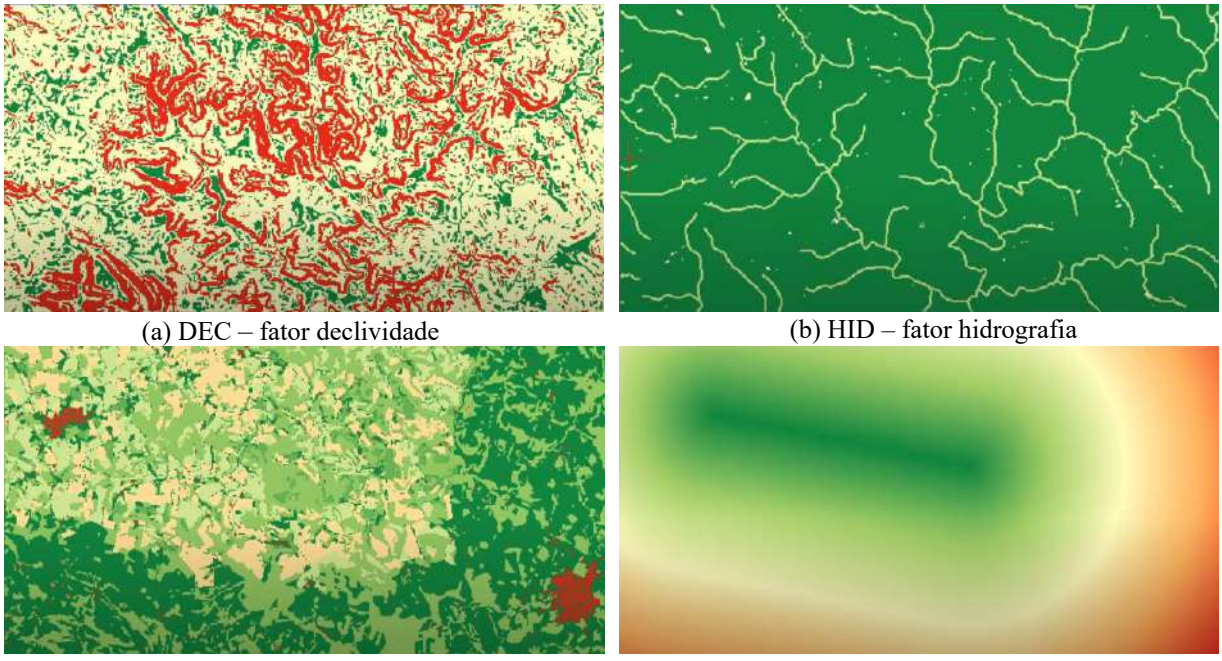
Tabela 1: Confronto dos fatores

Fator x Fator	Prioridade	Quanto mais?
DEC x HID	DEC	8
DEC x USO	DEC	2
DEC x DIR	DEC	5
HID x USO	USO	6
HID x DIR	DIR	3
USO x DIR	USO	6

Tabela 2: Pesos dos fatores

Fator	Peso
DEC	49,94 %
HID	5,03 %
USO	34,84 %
DIR	10,18 %
Total	100,00 %
Razão de Consistência (RC)	6,11 %

Foram processadas no *software* QGIS camadas *rasters* para cada um dos fatores (Etapa 3), com *pixel* arbitrado em 30 x 30 metros. É importante ressaltar que para realizar a composição dos fatores em uma camada única de penalização (Fator Nota), cada uma das camadas teve que ser normalizada. Na Figura 1 é possível observar o mapa de calor das camas. A cor verde equivale a penalização mínima (0) e a cor vermelha equivale a penalização máxima (1). As demais cores equivalem a penalizações intermediárias.



(a) DEC – fator declividade (b) HID – fator hidrografia

(c) USO – fator uso e ocupação do solo (d) DIR – fator diretriz

Figura 1: Mapa de calor dos fatores considerados na análise

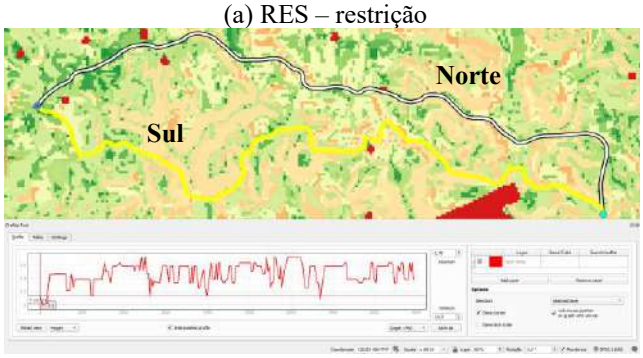
Uma quinta camada (RES – restrição) foi criada para agrupar os elementos de restrição (nascentes, terras indígenas, quilombolas etc.). Nesta camada, não normalizada, o *pixel* assumiu valores discretos: 0 para *pixels* sem restrição e 1000 para aqueles com restrição (Figura 2a). A camada NOTA – fator nota (Figura 2b) resulta da soma ponderada das camadas dos fatores, somando-se também a camada de restrição.



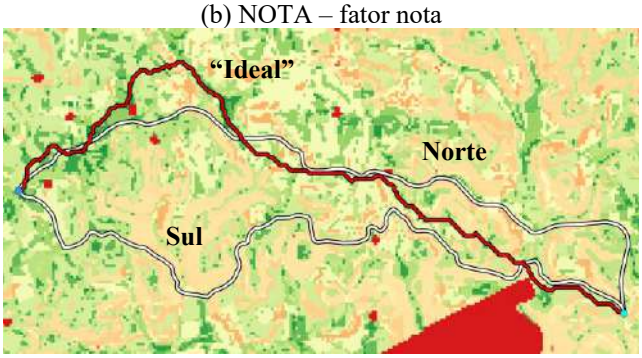
(a) RES – restrição



(b) NOTA – fator nota



(c) Perfil do fator nota de um dos traçados



(d) Traçados avaliados e traçado "Ideal" sobre fator nota

Figura 2: Avaliação dos traçados – etapas 4 e 5

Dois dos traçados desenvolvidos pelos alunos da edição PPP-UFRGS-2023/1 foram utilizados como exemplo para a análise do melhor traçado. Para obter o perfil longitudinal de cada um dos traçados foi utilizado o complemento do QGIS denominado *Profile Tool* (Figura 2c). A Figura 2d mostra os dois traçados e o traçado indicado como o de menor penalização no Fator Nota (traçado "Ideal"), utilizando o complemento do QGIS denominado *Least-Cost Path*. O traçado "Ideal" é aquele que apresenta um perfil de Fator Nota com valores de penalização menor. É importante ressaltar que este suposto traçado "Ideal" não considera vários parâmetros importantes do projeto de uma rodovia, como o raio mínimo das curvas e a largura da faixa de domínio, servindo apenas como referência para um estudo mais apurado.

Os perfis longitudinais dos dois traçados e do traçado "Ideal" podem ser exportados para uma planilha eletrônica. O eixo horizontal indica o desenvolvimento (extensão) do traçado e o eixo vertical apresenta as penalizações. Cada um dos traçados apresenta os indicadores de desempenho Extensão, Penalização Total e Penalização/km, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Indicadores de desempenho dos traçados

Traçado	Extensão (m)	Penalização Total	Penalização/km
Sul	8.928,68	115,8267	12,9724
Norte	8.352,77	86,7771	10,3890
"Ideal"	8.976,81	55,1941	6,1485

A análise da tabela indica o traçado Norte com indicadores de desempenho mais próximos do traçado "Ideal", concluindo as etapas 4 e 5. A Etapa 6 – roteiro e elaboração do OA, teve por propósito a demonstração do método em um vídeo passo a passo, sem o aprofundamento necessário do método AHP, a ser apresentado pelo professor em sala de aula. O vídeo produzido, juntamente com os arquivos utilizados (formato ZIP) foram disponibilizados, de forma a possibilitar que os alunos desenvolvam a atividade sobre a mesma base de dados. O vídeo produzido pode ser acessado pelo *link*: https://youtu.be/Hrbvay6QsNM.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo apresenta os critérios adotados para a elaboração de um OA em formato de vídeo passo a passo, com o objetivo de formar alunos de graduação em uma técnica de análise multicritério (AHP) e capacitar estes nos comandos do *software* QGIS, para avaliar desempenho de traçados geométricos rodoviários segundo fatores condicionantes. A metodologia empregada foi dividida em seis etapas, sendo as cinco primeiras sobre a utilização de técnica de análise multicritério em SIG, e a última sobre a confecção de roteiro para a produção do OA.

Pretende-se aplicar o OA desenvolvido pela primeira vez na edição do Projeto Ponto de Partida PPP-UFRGS-2025/2, no mês de setembro de 2025. Acredita-se que a ponderação dos pesos dos diferentes fatores pelos alunos irá promover debates e, consequentemente, um aprendizado profundo. Estão sendo elaboradas métricas para avaliar o nível de engajamento e de personalização da técnica, como fatores associados ao interesse e comprometimento dos alunos. Em futuras publicações, pretende-se trazer tais resultados.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio dos Recursos de Desenvolvimento Tecnológico - RDT, da Concessionária das Rodovias Integradas do Sul S.A. - VIA SUL, sob regulação da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chou, C., Chang, S., Hwang, G., e Huang, C. (2020). Enabling Students to Learn Engineering Innovation Skills through an Open Innovation Platform: A Design-Based Research Approach. *Journal of Science Education and Technology*, 29(3), 442-457.

Egilmez, G.; S. Gumus e M. Kucukvar (2015) Environmental sustainability benchmarking of the U.S. and Canada metropoles: An expert judgment-based multi-criteria decision making approach. *Cities*, v. 42. Estado de São Paulo, 2025.

García, D. S. P. et al. (2016) Projeto Ponto de Partida: o ensino de projeto de rodovias através de uma abordagem lúdico-real-didática. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET (30.: 2016: Rio de Janeiro, RJ). Anais [recurso eletrônico], Rio de Janeiro: ANPET, 2016. [12] f.

García, D. S. P. et al. (2017) Projeto Ponto de Partida: uso de indicadores de desempenho para o método de avaliação da "nota de proposta técnica" de projetos de rodovias. In: Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET (31.: 2017: Recife, PE). Anais [recurso eletrônico], Rio de Janeiro: ANPET, 2017.

Hernandez-de-Menendez, M., Escobar Díaz, C. A., e Morales-Menendez, R. (2020) Educational experiences with Generation Z. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14(3), 847–859. doi:10.1007/s12008-020-00674-9

Kablan M. M. (2004) Decision support for energy conservation promotion: analytic hierarchy process approach. *Energy Policy*, v. 32, n. 10, p. 1151-1158.

Prince, M. (2004) *Does active learning work? A review of the research. Journal of Engineering Education*. Wiley-Blackwell Publishing Ltd. doi:10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x

Saaty, T. L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

Sun, H.; Y. Zhang; Y. Wang; L. Li e Y. Sheng (2015) A social stakeholder support assessment of low-carbon transport policy based on multi-actor multi-criteria analysis: The case of Tianjin. *Transport Policy*, v. 41.

Rodrigo Heitor Viana dos Santos (rodrigo.heitor@outlook.com)
Amanda da Silva Goulart (amanda.s.goulart@gmail.com)
Thales Mezzacasa Brum (thalesbrum@gmail.com)
Raul Júlio Campelo Motta (rauljmotta@gmail.com)
Adamo Costa Dutra (adamo.costa.dutra@gmail.com)
Carlos Augusto Martini Karpss (carloskarpss@gmail.com)
Scheila Dias Quintana (scheila.quintana@ufrgs.br)
Daniel Sergio Presta García (daniel.garcia@ufrgs.br)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Produção e Transportes – DEPROT, Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN, Av. Osvaldo Aranha, 99 - sala 515 E Cep: 90035-190 - Porto Alegre - RS, Brasil
Alejandro Ruiz-Padillo (alejandro.ruiz-padillo@ufsm.br)
Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Transportes, Av. Roraima, 1000, Cidade Universitária, Camobi, Santa Maria, RS, Brasil

Temáticas transversais aplicadas ao ensino em transportes

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

ARTEFATOS DE GESTÃO DO CONHECIMENTO PARA ORGANIZAÇÕES DE PESQUISA CIENTÍFICA

Wendy Anyelina Taveras de Bejaran [1], **Orlando Fontes Lima Júnior** [1], **Janaina Antonino Pinto** [1]
[1] Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

RESUMO
Organizações dedicadas à produção e disseminação do conhecimento são essenciais na formação de recursos humanos qualificados e na geração de conhecimento aplicado. No entanto, a falta de mecanismos eficazes de aprendizagem organizacional compromete a capacidade dessas instituições de preservar, compartilhar e expandir o conhecimento produzido. Nesse contexto, o objetivo do estudo foi avaliar se organizações de pesquisa obtêm ganhos ao utilizar ferramentas de GC (Gestão do Conhecimento) e GP (Gestão de Projetos) para operacionalizar a produção e a difusão do conhecimento. A metodologia adotada foi a *Design Science Research (DSR)* e a aplicação prática foi realizada no LALT (Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes), onde se utilizou o modelo SECI para gestão do conhecimento em conjunto com métodos ágeis de gestão de projetos (*framework Scrum*). Os resultados indicam que a adoção dessas ferramentas proporcionou maior controle e fluidez nas atividades, favorecendo a colaboração entre a equipe e a adaptação contínua ao longo do processo.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A pesquisa científica é realizada a partir de projetos, podendo ser desde um artigo, uma tese ou um experimento específico, sendo que ela possui características que a definem como tal: é única, temporária, além da necessidade de orçamento e recursos específicos para ser realizada. A pesquisa científica é, segundo Prodanov (2013), um processo que reúne etapas, procedimentos e ferramentas para responder dúvidas ou impasses acerca de um tema, a partir de uma realidade e suas necessidades. Diferente de outras formas de saberes como, o saber empírico que nasce da prática e da experiência cotidiana ou do saber filosófico que busca compreender a realidade pela reflexão crítica e lógica, sem depender da experimentação, a pesquisa, necessariamente, envolve método e teoria, implicando, assim, um arranjo entre condições de tempo, valores sociais, condições orçamentárias e/ou insumos, produzindo resultados ou respostas possíveis dentro de uma temporalidade, espaços, finalidades específicas e um rigor de procedimentos, registros e divulgações.

Projetos de pesquisa acadêmica enfrentam desafios semelhantes aos de projetos tradicionais, estando sujeitos às restrições de escopo, tempo e recursos. Frequentemente, esses projetos iniciam com escopos indefinidos e tarefas de duração incerta. Além disso, pesquisadores frequentemente participam de múltiplos projetos simultaneamente, necessitando gerenciar suas atividades de forma colaborativa e priorizar tarefas conforme os prazos estabelecidos. A natureza criativa e inovadora dos projetos acadêmicos exige flexibilidade e agilidade para lidar com incertezas, tornando essencial uma gestão eficaz que assegure o cumprimento de prazos, objetivos e a alocação adequada de recursos (Nicholls et al., 2015).

O objeto de estudo deste trabalho é o Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes - LALT, vinculado ao Departamento de Infraestrutura e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Inspirado no conceito de *Learning Labs*, proposto por Peter Senge, do *MIT Sloan School of Management* — idealizador das *Learning Organizations* —, o LALT tem como missão formar profissionais por meio da produção e do compartilhamento de conhecimento nas áreas de serviços, logística e transportes. Suas ações estão estruturadas nos seguintes pilares: pesquisa (saber), extensão (saber fazer), ensino (fazer saber), o Conviver (Formação) e o Ser (Cidadão).

Atualmente, o LALT conduz projetos de pesquisa voltados à logística urbana, Internet das Coisas (IoT), metodologias de ensino e aprendizagem em logística e sustentabilidade. Compreendendo que o conhecimento vai além dos muros da universidade, o laboratório mantém uma constante interface com empresas do setor, promovendo a troca de experiências e atuando na solução de desafios da realidade brasileira. Além disso, atende à crescente demanda por educação continuada entre profissionais da área.

Um dos problemas enfrentados pelo LALT, e por diversos outros laboratórios de pesquisa inseridos em ambientes acadêmicos, é o elevado nível de rotatividade, decorrente do término do projeto de pesquisa. Ao se

formarem, os pesquisadores deixam o laboratório, contribuindo para um processo de evasão do capital intelectual, o que prejudica o laboratório sob o aspecto da competitividade. Além disso, os pesquisadores sentem a necessidade de ter um guia ou procedimento dos passos a serem seguidos desde o surgimento do tema da pesquisa, assim como um espaço digital, onde as informações das pesquisas pudessem ser armazenadas e compartilhadas, tanto com os demais pesquisadores, como com os professores orientadores das pesquisas.

A partir deste panorama, identificou-se se as ferramentas de Gestão de Conhecimento (GC) e de Gerenciamento de Projetos (GP) usadas nas organizações em geral são adequadas para operacionalizar a produção e difusão do conhecimento em organizações de pesquisa científica. O objetivo é avaliar se organizações de pesquisa têm ganhos em utilizar ferramentas de GC e GP. Para isso, foi preciso desenhar, implementar e validar um artefato que otimizasse a produção e difusão do conhecimento em uma organização de pesquisa científica.

O referencial teórico deste artigo foi baseado no modelo SECI desenvolvido por Nonaka e Takeuchi (1997), que conceitua a criação do conhecimento pela interação constante e dinâmica entre os conhecimentos tácito e explícito, sendo estes a “Socialização”, “Externalização”, “Combinação” e “Internalização”. O conhecimento tácito é pessoal, subjetivo e difícil de formalizar ou transferir, enquanto o conhecimento explícito é sistematizado, facilmente comunicado e compartilhado, como em livros e documentos (Nonaka; Takeuchi, 1995). O modelo SECI descreve quatro modos de conversão do conhecimento: Socialização (tácito para tácito), por meio do compartilhamento de experiências; Externalização (tácito para explícito), com o uso de metáforas, analogias e modelos; Combinação (explícito para explícito), pela integração e sistematização de conhecimentos explícitos; e Internalização (explícito para tácito), por meio da incorporação do conhecimento formalizado à prática individual.

Uma outra fonte importante como referencial é o gerenciamento de projetos por meio de metodologias ágeis como o *Scrum*, fundamentado em um grupo de funções e eventos. Cada função, que corresponde a um membro da equipe, tem uma função específica e completa um propósito definido (Lopez-Gonzalez et al., 2020).

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi adotada a metodologia *Design Science Research (DSR)*, por fornecer *feedback* para melhorias contínuas e, quando aplicada corretamente, garantir o rigor científico do estudo (Venable; Pries-Heje; Baskerville, 2016). Essa abordagem também apresenta fundamentos que legitimam, do ponto de vista epistemológico, o desenvolvimento de artefatos como meio de produção de conhecimento científico (Pimentel; Filippo; Santoro, 2018).

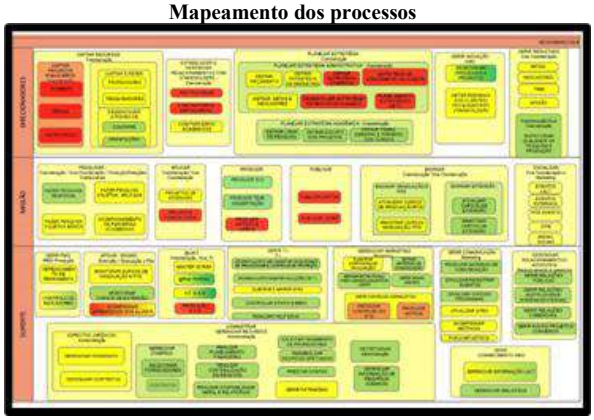
Artefato é entendido como a organização dos componentes do ambiente interno com o objetivo de alcançar resultados em um determinado ambiente externo. Ele não se restringe a objetos físicos, podendo ser qualquer elemento projetado, produzido ou modificado por intervenção humana (Simon, 1996; Peffers et al., 2007). Para esta pesquisa, foi considerado o termo método como um tipo de artefato composto por um conjunto de passos para executar uma tarefa. Os métodos são criações típicas das pesquisas em *Design Science* (March E Smith, 1995).

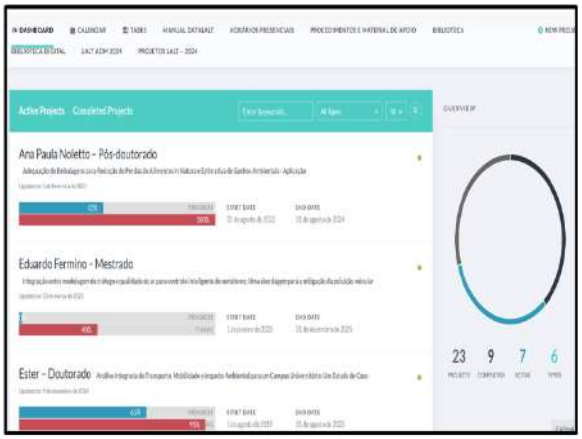
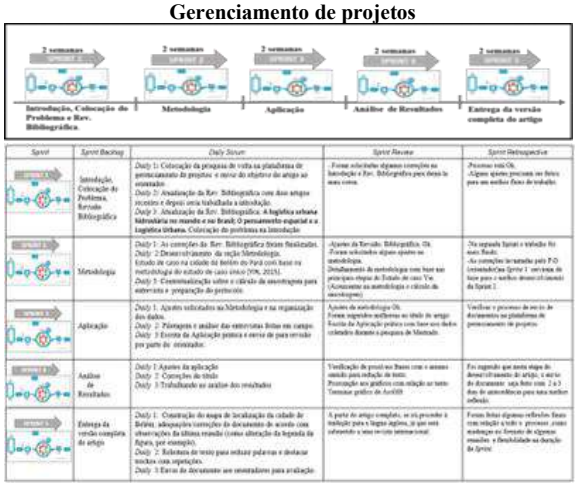
Este trabalho foi desenvolvido em quatro fases: na primeira consistiu na identificação do problema e a partir da conscientização do mesmo, utilizando a revisão narrativa de literatura (RNL) que consistiu no primeiro estudo teórico nos temas relacionados à gestão de conhecimento, gerenciamento de projetos para formalização das fases do problema e todos os requisitos do artefato da pesquisa. Na segunda fase de identificação do artefato, foram configuradas as classes de problemas e proposto um artefato para resolver o problema específico. A terceira fase envolveu o projeto, o desenvolvimento e a avaliação do artefato. Na fase final foram apresentadas as conclusões e divulgados os resultados.

3. RESULTADOS

Os resultados estão resumidos na tabela 1 e apresenta os principais componentes do artefato desenvolvido.

Tabela 1: Artefato Desenvolvido

Componente do Artefato	O que foi realizado	Resultado Obtido
Mapeamento dos processos 	Identificação e estruturação dos processos do LALT por meio da combinação das técnicas *Linkage of Process* (LoP) e SIPOC. O SIPOC representa os *Suppliers* (Fornecedores), *Inputs* (Entradas), *Process* (Processo), *Outputs* (Saídas) e *Customers* (Clientes). Esta é uma ferramenta usada para entender o escopo de um projeto, identificar problemas e oportunidades de melhoria, e comunicar o processo para as partes interessadas. A validação dos processos ocorreu por meio de sessões colaborativas com pesquisadores e equipe administrativa.	A aplicação conjunta dessas ferramentas permitiu mapear com clareza o ciclo de execução de projetos de pesquisa e sua conexão com áreas como gestão do conhecimento e administração documental. Visão mais realista e integrada das atividades do laboratório, promovendo maior padronização, eficiência e alinhamento entre os envolvidos.
Procedimentos 	Padronização de procedimentos no LALT por meio da elaboração de manuais, fluxogramas e roteiros, com o objetivo de transformar o conhecimento tácito dos pesquisadores em conhecimento explícito, acessível e compartilhável.	Formalização e retenção do patrimônio intelectual do laboratório, mitigando perdas decorrentes da rotatividade de pessoal e incentivando uma cultura de colaboração e aprendizado coletivo. Fluxos e procedimentos para cada nível de pesquisa — da Iniciação Científica ao Pós-Doutorado — proporcionando aos pesquisadores acesso estruturado a normas, formatos e diretrizes por meio de ambientes *online* e repositórios digitais, o que fortaleceu a condução e a qualidade das pesquisas desenvolvidas no laboratório.
Ferramentas de Gestão de Conhecimento Processo / Conversão do Conhecimento / Ferramenta do GC / Práticas de Gestão do Conhecimento no LALT Realizar Eventos / Socialização / *Mentoring* / Reuniões de planejamento e acompanhamento das pesquisas. Confraternização da equipe. Espaço *Co-working*. Realizar Eventos / Socialização / Educação / Palestras, workshops sobre os projetos em andamento. Gerir Conhecimento / Externalização / Gestão de documentos / DATALAT Ambiente online contendo todas as informações relacionadas aos projetos de pesquisa de cada pesquisador do Laboratório. Este ambiente é preenchido pelo próprio pesquisador. Realizar Relatórios de Prestação de Contas / Externalização / Memória organizacional / Relatório anual institucional apresentando plano do ano, resultados obtidos, evolução histórica e plano do próximo ano. Manter Memórias / Externalização / Memória organizacional / Organização do conhecimento organizacional produzido por ano. Manter Scriba / Combinação / Melhores práticas / Apoia na produção de Artigos nas Áreas de Logística e Transportes. Montar *Balanced Scored* / Combinação / *Benchmarking* / Levantamento de indicadores para medir o desempenho dos pesquisadores /produções. Elaborar Procedimentos e Roteiros de Pesquisa / Internalização / Mapeamento de Processos / Procedimentos e Roteiros padrões de Pesquisa. Gerenciar Biblioteca Física e Virtual / Internalização / Gestão de documentos / Acervo físico e virtual de livros, artigos, teses, dissertações.	Buscou-se identificar as interações entre os conhecimentos tácitos e explícitos que contribuem para apoiar os pesquisadores nas etapas de produção e posterior publicação de projetos de pesquisa nas áreas de Logística e Transporte.	Reuniões de planejamento e acompanhamento das pesquisas. Confraternização da equipe. Espaço *Co-working*. Palestras, workshops sobre os projetos em andamento. Relatório anual institucional apresentando plano do ano, resultados obtidos, evolução histórica e plano do próximo ano. Organização do conhecimento organizacional produzido por ano. Apoio na produção de artigos nas Áreas de Logística e Transportes. Levantamento de indicadores para medir o desempenho dos pesquisadores /produções. Acervo físico e virtual de livros, artigos, dissertações e teses.

DATA "X" 	Plataforma *online* desenvolvida para apoiar o gerenciamento de projetos de pesquisa no âmbito do laboratório. O próprio pesquisador é responsável por alimentar e atualizar seu espaço na plataforma, promovendo autonomia, visibilidade e sistematização das atividades de pesquisa.	Ambiente virtual personalizado, no qual cada pesquisador possui um *site* individual destinado ao registro e à organização de dados, informações e produções científicas relacionadas aos seus projetos. Visão geral do andamento da pesquisa com seus principais marcos de entrega tanto para o orientador do pesquisador(a) como dos demais colegas, trazendo transparência ao processo. Repositório de materiais de apoio.
Gerenciamento de projetos 	Para gerenciar as pesquisas no LALT adaptaram-se práticas de gerenciamento de projetos à realidade do laboratório. Como piloto, aplicou-se a metodologia ágil *Scrum* na elaboração de um artigo científico por uma doutoranda e dois professores da área de Transportes da Universidade W, com os eventos do *framework* ajustados à rotina acadêmica.	A aplicação do *Scrum* na elaboração de um artigo científico evidenciou resultados significativos a partir de seus três pilares: transparência, inspeção e adaptação. A transparência foi garantida pela visibilidade contínua do processo durante as *Sprints*, com o *Scrum Master* facilitando os eventos e o pesquisador destacando impedimentos nas reuniões diárias. A inspeção ocorreu nas *Sprint Reviews*, com avaliação dos orientadores sobre o conteúdo produzido, e nas Retrospectivas, que permitiram ajustes em práticas como prazos, ferramentas e formato das reuniões. Já a adaptação foi refletida na flexibilização da duração das *Sprints* conforme a complexidade das tarefas, na reorganização das avaliações e na adoção de novos formatos de entrega. Tais práticas demonstraram o potencial do *Scrum* para tornar o processo acadêmico mais ágil, colaborativo e eficiente.

4. CONCLUSÕES

A criação de artefatos fundamentados em ferramentas de gestão do conhecimento e de gerenciamento de projetos permitiu estruturar e tornar operacionais os processos de produção e disseminação do conhecimento no laboratório. Essa abordagem possibilitou organizar de forma sistemática as atividades desenvolvidas, facilitando o acesso à informação, o compartilhamento entre os pesquisadores e a preservação do conhecimento gerado.

A aplicação de ferramentas de gestão de conhecimento como a do modelo SECI (Nonaka E Takeuchi, 1995), assim como de gestão ágil de projetos apresenta-se como uma oportunidade relevante para o gerenciamento do conhecimento em distintas instituições de pesquisa e ensino.

A pesquisa científica, por sua natureza criativa e inovadora, muitas vezes entra em conflito com cronogramas rígidos e prazos previamente definidos para produção e divulgação do conhecimento. No entanto, cresce a necessidade de ferramentas que apoiem o processo de forma mais dinâmica e eficiente.

A metodologia ágil *Scrum* valoriza a auto-organização da equipe e tem como pilares fundamentais a transparência, inspeção e adaptação. Esses princípios ficaram evidentes no projeto, com destaque para a integração e a colaboração entre os membros da equipe ao longo de todo o processo. Ainda assim, é importante considerar que esse tipo de projeto possui características e demandas específicas, exigindo adaptações no gerenciamento, sobretudo nas fases em que o pensamento criativo é essencial para a geração de valor.

O LALT tem 26 anos de existência e nos últimos 8 anos foram implementadas as ferramentas de gestão de conhecimento e de gerenciamento de projetos que vem sendo sistematicamente utilizadas. As práticas do laboratório, construídas de forma colaborativa ao longo dos anos, foram adaptadas e aperfeiçoadas com base em situações reais vivenciadas no cotidiano dos participantes das pesquisas.

O caminho se faz caminhando e a boa gestão do conhecimento também. Foram os esforços diários dos pesquisadores do LALT que pouco a pouco incorporaram as ferramentas adequadas para uma gestão ágil e efetiva. O processo é de experimentação e de tentativa e erro. Os sucessos foram incorporados formalmente a rotina e os fracassos, estudados para não acontecerem de novo. O importante é destacar que isso só se faz com pessoas engajadas, amigas e que gostam de desafios. É assim que se materializa um sonho, sonhando juntos.

Agradecimentos
Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo 304538/2022-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

López-González, M. A., et al. (2020). Comparative analysis of the SCRUM and PMI methodologies in their application to construction project management. In Project management and engineering research (pp. 17–31). Springer.
March, S. T., & Smith, G. F. (1995). Design and natural science research in information technology. Decision Support Systems, 15, 251–266.
Nicholls, G. M., Lewis, N. A., & Eschenbach, T. (2015). Determining when simplified agile project management is right for small teams. Engineering Management Journal, 27(1), 3–10.
Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford University Press.
Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1997). Criação de conhecimento na empresa. Elsevier Brasil.
Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. Journal of management information systems, 24(3), 45-77.
Pimentel, M., Filippo, D., & Santoro, F. M. (2018). Design Science Research: Fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação. Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação: Concepção da Pesquisa: Porto Alegre: SBC, 5-29.
Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. de. (2013). Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico (2ª ed.). Feevale. [Recurso eletrônico]
Simon, H. A. (1996). The sciences of the artificial (3rd ed.). MIT Press.
Venable, J., Pries-Heje, J., & Baskerville, R. (2016). FEDS: A framework for evaluation in design science research. European Journal of Information Systems, 25(1), 77–89. https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36

Wendy Anyelina Taveras de Bejaran (w262047@dac.unicamp.br)
Orlando fontes Lima Junior (oflimaj@unicamp.br)
Janaina Antonino Pinto (janainaantonino@unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU), Departamento de Infraestrutura e Ambiente (InfrA), Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes (LALT). R. Albert Einstein, 951, 3º Piso, Sala 02. Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo – Campinas – SP CEP 13083-852, Brasil.

Outras áreas

Artigos científicos



39º ANPET
Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes
Goiânia - GO

10 a 14 de Novembro de 2025

DETERMINAÇÃO DE RISCOS ENVOLVIDOS NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL E COMO MINIMIZÁ-LOS

Victor Hugo Souza de Abreu, Tássia Faria de Assis, Mariane Gonzalez da Costa, Márcio de Almeida D'Agosto, Rejane Silva Rocha, Luís Otávio Días de Paula, Arsénio Massautso Simoco Laissone
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO
A crescente busca por fontes renováveis e a urgência climática impulsionaram o desenvolvimento dos biocombustíveis como alternativa aos combustíveis fósseis. Entre seus benefícios estão a origem renovável, o reaproveitamento de resíduos e a redução de emissões. No entanto, sua produção envolve riscos complexos que comprometem a sustentabilidade técnica, econômica, ambiental e social. Este artigo tem como objetivo identificar os principais riscos associados à produção de biodiesel e as estratégias de mitigação discutidas na literatura científica. Por meio de uma revisão sistemática, foram analisados estudos sobre viabilidade, impactos e gestão de riscos no setor. Os riscos foram classificados em categorias como suprimento de matéria-prima, tecnologia, meio ambiente, regulação, economia, logística, aspectos sociais e aceitação pública, com respectivas medidas de mitigação. A análise mostrou a importância de abordagens integradas e multicritério desde o planejamento inicial, a fim de promover uma produção de biocombustíveis mais sustentável e resiliente.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante da limitação dos recursos fósseis no planeta, cresce a necessidade de fontes renováveis de energia, o que explica o crescente interesse da comunidade científica, na última década, pelos impactos sociais, econômicos e ambientais associados (MIZIK & GYARMATI, 2021). Uma das principais tendências no desenvolvimento do mercado de combustíveis alternativos para o setor de transporte é a produção e o uso de biocombustíveis, devido à sua origem renovável e ao seu potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa (HALYTSKYI *et al.*, 2021), sobretudo de modos de transporte de difícil descarbonização . O biodiesel, um tipo de biocombustível, pode ser obtido a partir de diversas matérias-primas, incluindo óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais, permitindo uma maior diversificação da matriz energética e a valorização de resíduos (DE ABREU *et al.*, 2024; 2025). Além disso, seu uso contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação dos impactos ambientais associados ao setor de transportes, especialmente no que se refere à poluição atmosférica e ao efeito estufa (DE ABREU *et al.*, 2022).

O avanço das pesquisas e das políticas públicas voltadas à produção sustentável e ao aprimoramento das propriedades físico-químicas tem impulsionado sua competitividade e viabilidade técnica, tornando-o uma alternativa promissora para a transição energética global. A busca por caminhos de síntese sustentáveis para geração de biodiesel ainda está em andamento, embora um extenso trabalho de pesquisa e desenvolvimento sobre esse tópico já tenha levado a uma ampla variedade de alternativas de processo, utilizando diferentes matérias-primas, álcoois, catalisadores e parâmetros de processo. Assim, a escolha da opção mais sustentável pode-se tornar complexa, dependendo dos custos associados e dos impactos ambientais decorrentes dos processos a montante e a jusante, mas também das restrições de segurança (KRALISCH *et al.*, 2013). O desempenho de um sistema de biodiesel pode ser afetado por vários fatores de risco. O número desses fatores de risco é grande e suas interdependências são vagas e complexas (SAJID, KHAN & ZHANG, 2017). Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo investigar, por meio de revisão sistemática, os principais riscos atrelados à produção e viabilização do biodiesel, bem como elencar estratégias relevantes que podem ser adotadas para minimizá-los.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi conduzida com base em uma revisão sistemática de caráter exploratório, com o objetivo de identificar e sistematizar os principais riscos envolvidos na produção de biocombustíveis, bem como as estratégias de mitigação apontadas na literatura especializada. A abordagem metodológica adotada permitiu a construção de uma base teórica sólida sobre os desafios técnicos, econômicos, ambientais, sociais e regulatórios associados ao setor, com foco específico no biodiesel. A primeira etapa consistiu na seleção das fontes bibliográficas. Foram priorizados artigos científicos, capítulos de livros e relatórios técnicos publicados entre 2010 e 2025 (horizonte temporal de 15 anos), disponíveis em bases de dados acadêmicas de reconhecimento internacional, como *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* e *Google Scholar*. Utilizaram-se combinações dos descritores: "*biofuel*", "*biodiesel*", "*risk analysis*", "*sustainability*", "*economic risk*",

"*environmental impact*" e "*risk mitigation strategies*". Os critérios de inclusão contemplaram publicações que abordassem de forma explícita os riscos na cadeia produtiva do biodiesel, suas causas, consequências e possíveis soluções.

Na etapa seguinte, os documentos foram analisados de forma qualitativa, permitindo a classificação dos riscos em categorias temáticas, a saber: risco de suprimento de matéria-prima, risco tecnológico, risco ambiental, risco regulatório e político, risco econômico e de mercado, risco logístico, risco social e risco de aceitação pública. Esses dados foram organizados na Tabela 1, sintetizando as descrições dos riscos e as respectivas medidas de mitigação. Os resultados foram discutidos de forma crítica, à luz de uma perspectiva interdisciplinar, destacando a necessidade de integração entre dimensões técnicas, econômicas, ambientais e sociais para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais mais eficazes. A metodologia adotada, portanto, visa oferecer uma compreensão abrangente e orientada à ação sobre os riscos que permeiam a produção de biodiesel e suas possíveis soluções.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais riscos associados à produção de biodiesel, abordando dimensões que vão desde o suprimento de matéria-prima até a aceitação pública. A crescente demanda por fontes energéticas renováveis traz à tona uma série de desafios que, se não forem devidamente gerenciados, podem comprometer a sustentabilidade ambiental, econômica e social do setor. Cada risco é descrito em termos de suas causas e implicações, sendo acompanhadas de estratégias para sua mitigação, com base na literatura técnica especializada. Essa abordagem permite compreender a complexidade do setor de biocombustíveis e reforça a importância de uma gestão integrada e proativa para garantir a viabilidade e a resiliência dessa alternativa energética frente às incertezas globais.

Tabela 1. Riscos associados à produção de biodiesel.

Risco	**Descrição**	**Como minimizar**
Risco de suprimento de matéria-prima	A disponibilidade de biomassa pode ser afetada por variações climáticas, sazonalidade, uso competitivo da terra e mudanças na demanda agrícola (SAJID, KHAN & ZHANG, 2017).	A dependência de fontes agrícolas pode ser reduzida por meio da diversificação das matérias-primas, priorizando resíduos agrícolas, óleos residuais e culturas não comestíveis, além de investir em sistemas agroflorestais sustentáveis (ŽIVKOVIĆ *et al.*, 2017; DE ABREU *et al.*, 2025).
Risco tecnológico	Envolve desafios na eficiência dos processos de conversão, estabilidade operacional, degradação de catalisadores e incertezas associadas a novas tecnologias emergentes (SAJID, KHAN & ZHANG, 2017; AMBAYE *et al.*, 2021).	O desenvolvimento de catalisadores mais eficientes e estáveis, a adoção de reatores avançados e a transição para processos contínuos podem minimizar falhas operacionais e aumentar a eficiência da produção (ŽIVKOVIĆ *et al.*, 2017). O investimento em pesquisa e desenvolvimento também contribui para a mitigação desse risco (HALYTSKYI *et al.*, 2021; DE ABREU *et al.*, 2025).
Risco ambiental	Abrange impactos como desmatamento, perda de biodiversidade, uso excessivo de recursos hídricos, emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do biocombustível e contaminação do solo e da água por resíduos do processamento (SAJID, KHAN & ZHANG, 2017).	A produção de biodiesel ambientalmente sustentável exige que os padrões de sustentabilidade abranjam impactos diretos e indiretos no meio ambiente, ou seja, solo, água e ar (ŽIVKOVIĆ *et al.*, 2017). Dessa forma, a adoção de padrões de sustentabilidade rigorosos, a implementação de técnicas para reduzir o consumo de água e a reutilização de subprodutos minimizam os impactos ambientais (DE ABREU *et al.*, 2025). Além disso, sistemas de monitoramento e certificações ambientais garantem maior controle sobre as emissões e o uso de recursos naturais.
Risco regulatório e político	Mudanças em políticas públicas, subsídios e incentivos fiscais, além de requisitos ambientais cada vez mais rígidos, podem afetar a viabilidade econômica do setor (SAJID, KHAN & ZHANG, 2017; HALYTSKYI *et al.*, 2021).	As políticas governamentais serão a principal força motriz para novos aumentos na produção de biodiesel (ŽIVKOVIĆ *et al.*, 2017). A estabilidade regulatória pode ser promovida por meio do fortalecimento de políticas públicas que incentivem a produção sustentável de biocombustíveis, harmonizando legislações nacionais e internacionais e estabelecendo

Risco	Descrição	Como minimizar
		incentivos para produtores que atendam a padrões ambientais e sociais (HALYTSKYI *et al.*, 2021; DE ABREU *et al.*, 2025).
Risco econômico e de mercado	Inclui flutuações no preço do petróleo, variação cambial, competitividade com combustíveis fósseis, demanda por biocombustíveis e custos de produção. O custo superior do biodiesel frente ao diesel mineral, quando em mistura mandatária, implica no aumento dos custos logísticos e dos produtos.	A competitividade do biodiesel pode ser aprimorada com a criação de biorrefinarias integradas, a diversificação dos produtos derivados e o estabelecimento de parcerias estratégicas. Medidas como subsídios e incentivos fiscais também ajudam a reduzir as incertezas econômicas (DE ABREU *et al.*, 2025).
Risco logístico	Problemas na distribuição, transporte e armazenamento dos biocombustíveis, incluindo compatibilidade com a infraestrutura existente e possíveis dificuldades no escoamento da produção.	O fortalecimento da infraestrutura de transporte e armazenamento, bem como a adaptação da rede de distribuição para maior compatibilidade com biocombustíveis, pode minimizar desafios logísticos e reduzir perdas no escoamento da produção.
Risco social	Impactos sobre comunidades locais, conflitos de uso da terra, condições de trabalho na produção da biomassa e questões associadas à segurança alimentar quando há competição com culturas alimentares.	Para mitigar impactos sociais, é essencial promover cadeias produtivas sustentáveis, garantindo condições de trabalho dignas, evitando conflitos de uso da terra e assegurando que a produção de biocombustíveis não comprometa a segurança alimentar das comunidades locais. Para isso, faz-se necessária uma maior cooperação entre governos e diversas partes interessadas para desenvolver e aplicar critérios de sustentabilidade correspondentes de forma consistente em todo o mundo o mais rápido possível (ŽIVKOVIĆ *et al.*, 2017).
Risco de aceitação pública	Resistência da sociedade ao uso de determinadas matérias-primas ou processos produtivos, principalmente se houver impactos ambientais ou sociais negativos percebidos.	A transparência no processo produtivo, a certificação da sustentabilidade do biodiesel e campanhas educativas sobre seus benefícios podem aumentar a aceitação da sociedade e reduzir resistências ao seu uso.

Dando continuidade à análise dos riscos apresentados na Tabela 1, observa-se que a produção de biocombustível, especialmente o biodiesel, demanda soluções integradas que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica, impactos ambientais e aceitação social. A literatura técnica evidencia que esses elementos estão inter-relacionados e que sua abordagem isolada pode comprometer a sustentabilidade do setor. Por isso, diversos estudos vêm propondo metodologias que consideram simultaneamente múltiplos critérios de decisão, inclusive em estágios iniciais de projeto, como forma de orientar escolhas mais robustas e resilientes. Nesse contexto, Kralisch *et al.* (2013) desenvolveram um procedimento de suporte à decisão para seleção do *design* de processo mais apropriado à produção de biodiesel em escala piloto. A pesquisa destacou a importância da integração entre a Gestão do Ciclo de Vida (*Life Cycle Management* – LCM) e a Análise de Risco, duas abordagens complementares que permitem avaliar, desde as fases preliminares do projeto, os potenciais impactos ambientais, econômicos e operacionais. A alternativa considerada mais favorável foi a transesterificação de óleo residual utilizando processamento supercrítico em reatores de fluxo contínuo, com metanol como reagente. Essa rota tecnológica foi selecionada com base em uma combinação de testes experimentais, avaliação de desempenho energético e análise multicritério, indicando elevada eficiência, menores emissões e boas perspectivas de escalonamento. Tal escolha demonstra como a consideração simultânea de múltiplos riscos – tecnológicos, ambientais e econômicos – pode conduzir a soluções mais sustentáveis e tecnicamente viáveis.

Do ponto de vista econômico, Sajid, Zhang e Khan (2016) investigaram o desempenho financeiro de uma planta de biodiesel com capacidade anual de 45.000 toneladas, utilizando óleo de pinhão-manso (Jatropha curcas L.) como matéria-prima – uma cultura não comestível, frequentemente apontada como alternativa promissora por não competir diretamente com a produção de alimentos. A análise contemplou cinco categorias principais de custos: investimento total de capital, custos fixos e variáveis, custo operacional anual e custo

total do projeto. Um dos principais achados foi que o custo da matéria-prima representa o elemento de maior peso na composição dos custos totais, confirmando a relevância do risco de suprimento apontado anteriormente. A aplicação de técnicas de simulação probabilística revelou uma incerteza de aproximadamente 50% no risco total estimado, mesmo com dados amplamente reportados na literatura. Essa alta variabilidade reforça a necessidade de mecanismos de mitigação, como a diversificação de matérias-primas e o uso de coprodutos. Notavelmente, o estudo mostrou que, ao incorporar os benefícios ambientais da substituição de combustíveis fósseis pelo biodiesel (por exemplo, na redução de emissões de CO_2), a atratividade econômica do projeto aumentou, indicando que políticas de precificação de carbono ou incentivos ambientais poderiam desempenhar papel fundamental na viabilidade do setor.

A integração econômica de cadeias produtivas e a valorização de coprodutos também são centrais na proposta de Mansouri *et al.* (2019), que buscaram desenvolver uma estrutura sistemática para avaliação de risco econômico na produção de biodiesel e seus subprodutos. O estudo considerou a conversão do glicerol – principal subproduto da reação de transesterificação – em compostos de maior valor agregado, como 1,2-propanodiol e 1,3-propanodiol, ambos utilizados na indústria química e farmacêutica. A análise técnico-econômica baseou-se em indicadores como o Valor Presente Líquido (VPL) e o Preço Mínimo de Venda (PMS), e adotou o método de Monte Carlo com Amostragem de Hipercubo Latino (LHS) para incorporar incertezas de mercado e tecnológicas. Os resultados indicaram que a integração de coprodutos não apenas aumenta a eficiência econômica da planta, mas também reduz sua vulnerabilidade frente a oscilações de mercado, conferindo maior resiliência ao sistema produtivo. A estrutura desenvolvida, por ser genérica e adaptável, oferece subsídios metodológicos para avaliação de outras rotas tecnológicas, contribuindo para uma abordagem sistêmica e mais robusta da cadeia de valor do biodiesel.

Mizik e Gyarmati (2021) destacam um aspecto muitas vezes negligenciado nas análises econômicas: a compreensão integrada da sustentabilidade. Os autores observam que, em alguns contextos, a sustentabilidade ainda é tratada de forma limitada, reduzida à eficiência de custos. No entanto, cresce a adoção de uma abordagem mais abrangente (tripés do desenvolvimento sustentável), que reconhece a necessidade de considerar simultaneamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos. Esse entendimento é essencial para lidar com riscos como os de aceitação pública, impactos sociais e conflitos de uso da terra, conforme discutido anteriormente. Para que os biocombustíveis desempenhem um papel relevante na transição energética, é necessário que sua cadeia produtiva seja concebida com base em critérios de justiça ambiental, equidade social e estabilidade econômica, considerando um horizonte temporal de curto, médio e longo prazo. Os investimentos públicos na busca da produção de biodiesel avançado, proveniente de óleos residuais, gordura animal e óleo de algas podem aumentar a resiliência do sistema, sobretudo frente às ameaças climáticas que podem impactar na agricultura, acentuando a competitividade entre produção de ailmentos *versus* de biocombustíveis.

Com o intuito de enfrentar os obstáculos descritos na Tabela 1, o Centro de Pesquisa e Caracterização de Petróleo Bruto e Combustíveis (Coppecomb) e o Laboratório de Transporte de Cargas (LTC), ambos da COPPE/UFRJ, estão conduzindo um estudo voltado à análise preliminar da viabilidade técnica, econômico-,financeira e ambiental da ampliação da produção de biodiesel a partir do óleo residual gerado no processo de fabricação de etanol de milho, conhecido como *Distillers Corn Oil* (DCO), utilizando a rota enzimática. A iniciativa contempla quatro etapas centrais: a primeira consiste na implementação de uma planta experimental para o aperfeiçoamento da produção de biodiesel a partir do DCO; a segunda refere-se à avaliação da viabilidade de inserção competitiva do DCO no mercado nacional, a terceira envolve análise ambiental; e, por fim, a quarta etapa abrange a sistematização e a divulgação dos resultados junto aos públicos estratégicos e demais partes interessadas (DE ABREU *et al.*, 2024). Essa iniciativa é especialmente relevante diante da crescente demanda por fontes de energia mais limpas e sustentáveis, bem como da necessidade de agregar valor a subprodutos agroindustriais. O aproveitamento do óleo residual proveniente da produção de etanol de milho como matéria-prima para o biodiesel representa uma estratégia promissora de sinergia entre a indústria do etanol e do biodiesel, as maiores em produção de biocombustíveis no Brasil. Isso contribui para a diversificação da matriz energética brasileira, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis, aumento da segurança energética, bem como a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a adoção da rota enzimática pode oferecer vantagens ambientais e operacionais frente a processos convencionais, ao possibilitar reações mais seletivas, menor geração de resíduos e menores custos energéticos,

alinhando-se aos princípios da economia circular e da bioeconomia.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biodiesel representa uma alternativa estratégica frente à crise climática e à dependência de combustíveis fósseis, sobretudo para os modos de difícil descarbonização, mas está cercada por uma série de riscos que comprometem sua sustentabilidade. Os resultados deste estudo demonstram que os riscos são interdependentes e envolvem desde o suprimento de matéria-prima até a aceitação pública, passando por riscos de tecnologia, meio ambiente, regulação, economia, logística e de aspectos sociais , exigindo soluções integradas. A literatura técnica destaca que ferramentas como a Análise de Risco, a Gestão do Ciclo de Vida e modelos econômicos probabilísticos podem apoiar decisões mais robustas desde a concepção dos projetos. Dessa forma, indica-se que a adaptação eficaz desses riscos depende da articulação entre inovação tecnológica, planejamento estratégico e políticas públicas voltadas à sustentabilidade. A valorização de coprodutos, a diversificação de insumos, a estabilidade regulatória e o fortalecimento de mecanismos de governança são elementos centrais para consolidar cadeias produtivas mais resilientes. Além disso, é fundamental ampliar a visão de sustentabilidade para além da eficiência econômica, incorporando os aspectos sociais e ambientais que garantem justiça socioambiental e viabilidade de longo prazo para o biodiesel.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil) pelo apoio financeiro por meio do processo 405875/2022-3, no projeto intitulado "Estudo da pré-viabilidade econômico-financeira e ambiental do aumento da escala de produção de biodiesel a partir de óleo residual da produção de etanol de milho via rota enzimática, Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022".

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBAYE, Teklit Gebregiorgis et al. Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives. Journal of environmental management, v. 290, p. 112627, 2021.

DE ABREU, Victor Hugo Souza et al. The role of the circular economy in road transport to mitigate climate change and reduce resource depletion. Sustainability, v. 14, n. 14, p. 8951, 2022.

DE ABREU, Victor Hugo Souza et al. Perspectivas Críticas Sobre A Produção De Biodiesel A Partir De Distillers Corn Oil No Contexto Brasileiro. ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. At: Florianópolis, Santa Catarina, 2024.

DE ABREU, Victor Hugo Souza et al. Enzymatic Biodiesel Synthesis: Transforming Waste Oil into Renewable Energy. Recent Advances in Transportation Theory to Practice, 2025.

HALYTSKYI, O. et al. Mathematical risk assessment model for biodiesel production projects in Ukraine agriculture. 2021.

KRALISCH, Dana et al. Process design accompanying life cycle management and risk analysis as a decision support tool for sustainable biodiesel production. Green Chemistry, v. 15, n. 2, p. 463-477, 2013.

MANSOURI, Seyed Soheil et al. Economic risk analysis and critical comparison of biodiesel production systems. Biodiesel: From production to combustion, p. 127-148, 2019.

MIZIK, Tamás; GYARMATI, Gábor. Economic and sustainability of biodiesel production—a systematic literature review. Clean Technologies, v. 3, n. 1, p. 19-36, 2021.

SAJID, Zaman; ZHANG, Yan; KHAN, Faisal. Process design and probabilistic economic risk analysis of bio-diesel production. Sustainable Production and Consumption, v. 5, p. 1-15, 2016.

SAJID, Zaman; KHAN, Faisal; ZHANG, Yan. Integration of interpretive structural modelling with Bayesian network for biodiesel performance analysis. Renewable Energy, v. 107, p. 194-203, 2017.

ŽIVKOVIĆ, Snežana B. et al. Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 79, p. 222-247, 2017.

SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO PARA JARDIM/MS E GUIA LOPES DA LAGUNA/MS: ADAPTAÇÕES DO MODELO BRT PARA PEQUENAS CIDADES

Tiago Machado Faria de Souza, Thalita Beline Vareiro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul

RESUMO
A pesquisa propõe um protótipo de sistema de transporte público coletivo (BRT) para Jardim/MS e Guia Lopes da Laguna/MS, que carecem do serviço apesar da obrigação legal e conurbação urbana. O projeto, qualitativo-observacional e estudo de caso, adapta o BRT por seu baixo custo e aplicabilidade em cidades menores. Utiliza mapas de calor para definir rotas com um corredor troncal único. A proposta inclui uma identidade visual moderna e nomenclatura dos pontos inspirada na fauna/flora local, visando valorização cultural e facilidade de memorização. Os pontos de ônibus e o terminal são projetados para conforto térmico, durabilidade e acessibilidade. O financiamento pode ser viabilizado por IPVA, estacionamento rotativo e publicidade. O projeto alinha-se aos ODS da ONU, promovendo mobilidade equitativa e sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é reconhecida por distintas teorias urbanas como essencial para o desenvolvimento urbano sustentável e equitativo, potencializando o crescimento econômico, a inclusão social e a melhoria da qualidade de vida. No entanto, muitos municípios brasileiros, como Jardim/MS e Guia Lopes da Laguna/MS, ainda não possuem sistemas de transporte público coletivo, prejudicando a mobilidade de seus habitantes e negando o direito à cidade, conceito que defende o acesso universal a benefícios e serviços urbanos. Ademais, se compreende a problemática que envolve a falta de transporte digno, dentre sua desigualdade social e desvalorização, assim como o impacto que promover acesso ao transporte publico também equivale em sua conexão e inclusão com polos sociais. Negar o acesso, assim como ignorar sua importância revela um impacto negativo no contexto de inclusão social, conscientização e qualidade de vida.Este cenário contraria as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Brasil, 2012), que exige que cidades com mais de 20.000 habitantes, como Jardim, possuam um Plano de Mobilidade Urbana que inclua um sistema de transporte público coletivo planejado.

Diante dessa lacuna por transporte público de qualidade na conurbação entre Jardim e Guia Lopes da Laguna – cidades funcionalmente integradas onde Jardim atua como polo regional e Guia Lopes da Laguna como cidade-dormitório, gerando uma densidade flutuante de deslocamentos – esta pesquisa qualitativa-observacional adota o estudo de caso dessa região. O objetivo central é desenvolver um protótipo de sistema de transporte público coletivo urbano baseado na metodologia projetual BRT (*Bus Rapid Transit*). O modelo BRT justifica-se por seu custo de implementação e operação relativamente baixos em comparação com outros sistemas de transporte de massa (como VLT ou metrô), tornando-o acessível a cidades de pequeno e médio porte, inclusive em países em desenvolvimento.

O projeto é guiado pelas diretrizes do Caderno Técnico para Projetos de Mobilidade Urbana (Brasil, 2016) e do Manual BRT (Brasil, 2008), e se apoia em pesquisas anteriores desenvolvidas no IFMS campus Jardim. Essas pesquisas anteriores subsidiaram a criação de mapas de calor a partir de dados do Censo Demográfico 2010 do IBGE (IBGE, 2010) para identificar padrões de densidade populacional e auxiliar na definição de rotas, além de analisar o potencial de financiamento do transporte público por meio de estacionamento rotativo pago. A proposta está alinhada com as metas da Organização das Nações Unidas para 2030 (IPEA, 2018), contribuindo para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 1, 11 e 13, que visam a erradicação da pobreza (garantindo acesso a serviços básicos), cidades e comunidades sustentáveis (melhorando a segurança viária e o acesso com sistemas de mobilidade inclusivos), e o combate às alterações climáticas (integrando medidas climáticas em planejamentos nacionais). Em síntese, este protótipo busca não apenas suprir uma lacuna infraestrutural crítica, mas também promover um desenvolvimento urbano mais equitativo, inclusivo e sustentável para as cidades envolvidas.

2. METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa é de natureza qualitativa-observacional, adotando como método o estudo de caso da conurbação entre os municípios de Jardim/MS e Guia Lopes da Laguna/MS. O objetivo central é desenvolver um protótipo de sistema de transporte público coletivo urbano baseado na metodologia projetual

BRT (*Bus Rapid Transit*).

Na etapa de revisão bibliográfica, realizou-se uma análise detalhada das legislações urbanas federais e municipais e cadernos técnicos sobre o modelo BRT, complementada pelo estudo de viabilidade de projetos já implementados em cidades de pequeno e médio porte com desafios similares. A etapa de planejamento concentrou-se na definição de rotas e localização das estações com base em estudos de densidade populacional e fluxos, na criação de uma identidade visual única e coerente para o sistema, e no projeto de pontos de ônibus que priorizam conforto térmico, resistência e acessibilidade, utilizando materiais e técnicas sustentáveis.

3. RESULTADOS

Os resultados da pesquisa são a materialização do protótipo de sistema de transporte público coletivo BRT para Jardim/MS e Guia Lopes da Laguna/MS, elaborado a partir de uma metodologia projetual adaptada para cidades de pequeno e médio porte.

3.1. Definição de Rotas e Corredor Troncal Único

As rotas foram estabelecidas com base em mapas de calor criados a partir de dados secundários do Censo Demográfico 2010 do IBGE sobre população e densidade demográfica (IBGE, 2010). Ao analisar o mapa de calor resultante, tornou-se possível identificar áreas com alta densidade populacional ou com uma concentração significativa de habitantes, bem como observar as variações espaciais e identificar padrões demográficos, como áreas urbanas densamente povoadas ou regiões com baixa densidade populacional.

Conforme o mapa de calor desenvolvido na pesquisa anterior, foi traçada uma rota que interliga os principais pontos de maior concentração populacional da cidade. Uma possível implementação de corredor troncal único (Fig. 1), complementados por serviços alimentadores, representa uma abordagem estratégica que visa otimizar o desempenho e a eficiência do sistema de transporte público.

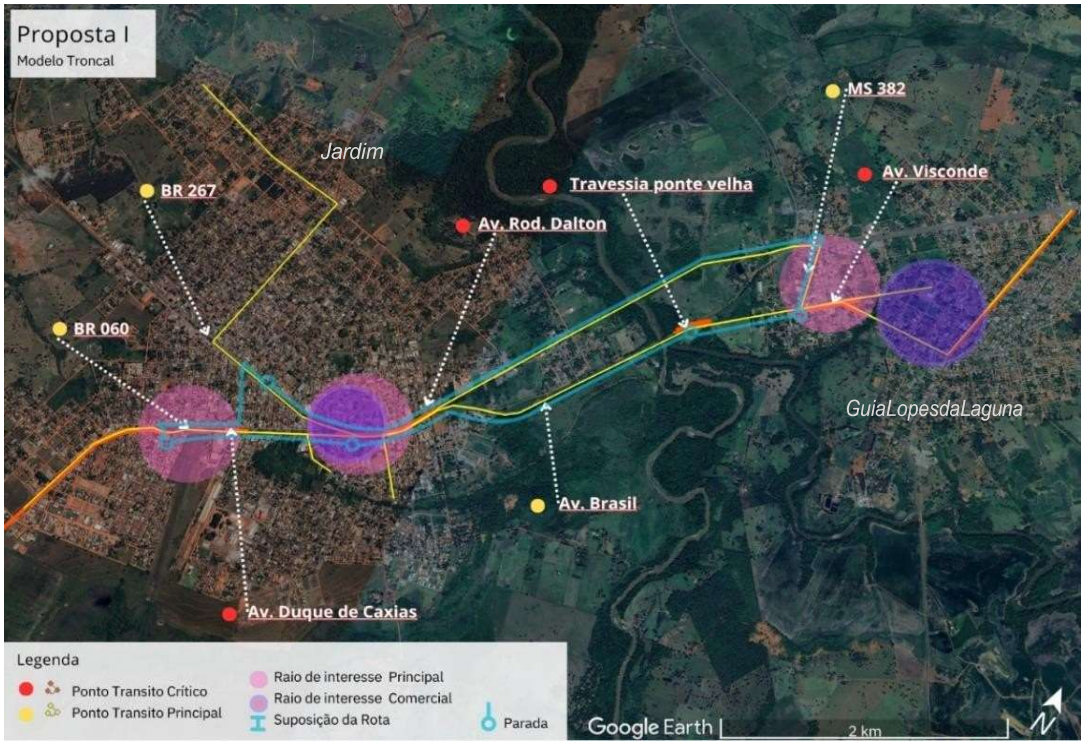


Figura 1: Modelo troncal único, a partir de mapa de calor

A concentração do fluxo de passageiros em um corredor troncal, de acordo com a proposição apresentada na Figura 1, permite uma operação mais eficiente, resultando na redução dos tempos de espera, no aumento da frequência dos ônibus e na diminuição do tempo de viagem para os usuários. Os serviços alimentadores, por sua vez, desempenham o papel de conectar as áreas periféricas ao corredor principal, garantindo uma cobertura

mais abrangente e integrada do sistema. Essa otimização também contribui para a redução dos custos operacionais, ao minimizar o número de linhas de ônibus e veículos necessários, o que, por sua vez, resulta em uma melhor alocação de recursos financeiros e possibilita investimentos em infraestrutura e melhorias contínuas nos serviços prestados.

3.2. Identidade Visual

A identidade visual do BRT Jardim (MS) foi desenvolvida com o propósito de refletir e comunicar os valores intrínsecos de mobilidade sustentável, inovação e acessibilidade. Integra elementos visuais que evocam a eficiência inerente ao transporte público, a fundamental integração urbana e a visibilidade de sua cultura e fauna regional, sob a importância de sua lembrança cultural.

Os conceitos fundamentais representados nesta identidade visual incluem a sustentabilidade, evidenciada pelo uso de elementos gráficos que remetem à ecologia e à eficiência energética; a modernidade, caracterizada por um design dinâmico e simplificado que confere uma identidade inovadora ao sistema; e a acessibilidade, garantida pela composição e tipografia selecionadas para assegurar clareza e fácil leitura a todos os usuários. A análise de identidades visuais de sistemas de BRT e metrôs já implementados em diversas localidades revela a presença de características recorrentes que servem como referências para o desenvolvimento de novas propostas. Observa-se uma prevalência de logotipos que empregam formas simples e geométricas, frequentemente abstratas, que sugerem movimento e mobilidade, como setas e linhas retas ou curvas que remetem a trilhos, vias e fluxo contínuo.

A escolha de cores vibrantes e com alto contraste é uma constante, sendo o vermelho comumente utilizado para indicar dinamismo, urgência e visibilidade, enquanto o azul e o verde são empregados para representar atributos como confiabilidade, segurança e sustentabilidade, respectivamente. A preferência recai sobre a fonte tipográfica *sans-serif*, reconhecida por sua clareza e facilidade de leitura, o que é crucial para uma identificação rápida e eficaz em ambientes de transporte público. Muitos logotipos utilizam elementos simbólicos minimalistas ou letras que remetem diretamente à função do sistema de transporte urbano, como a letra "M" em sistemas de metrô ou ícones abstratos que representam veículos ou infraestrutura.

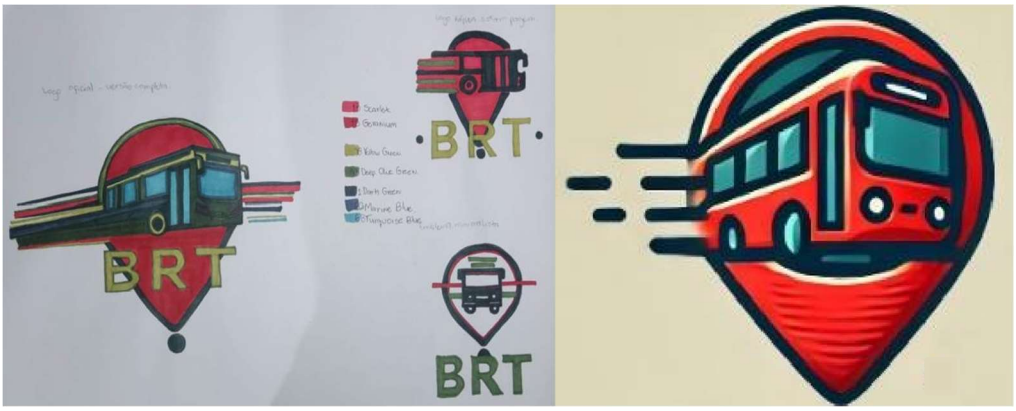


Figura 2: Croqui para criação logo BRT

O logotipo principal proposto para o BRT Jardim (MS), Figura 2, integra um ônibus estilizado dentro de um ícone de localização, reforçando a ideia de transporte urbano eficiente e acessível. A sigla "BRT" é apresentada em destaque, utiliza faixas horizontais nas cores vermelha, verde e amarela são incorporadas para criar um efeito de movimento, transmitindo dinamismo e velocidade.

3.3. Pontos de Ônibus

Uma hipótese para a nomeação dos pontos é a utilização de nomes inspirados na fauna ou flora regional de Mato Grosso do Sul (ex: "Ipê Roxo", "Onça Pintada"). Essa estratégia visa valorizar a cultura e identidade local, promover a educação ambiental, facilitar a memorização e navegação dos usuários, garantir a inclusão de diferentes públicos (com ícones visuais) e qualificar esteticamente a paisagem urbana, criando marcos visuais e turísticos.

De acordo com a Figura 3, os pontos de ônibus foram projetados para climas quentes, priorizando conforto térmico. A seleção de materiais inclui policarbonato leitoso para coberturas, chapas metálicas perfuradas para sombreamento e ventilação, e uso potencial de bambu tratado ou madeira reflorestada. Técnicas como coberturas inclinadas e estendidas, ventilação cruzada e paredes laterais vazadas são essenciais para dissipar o calor. Assentos com espaçamento e apoios laterais garantem acessibilidade, e o uso de cores claras e vegetação contribui para o resfriamento natural. O conceito de plataforma em nível com o ônibus é um pilar da acessibilidade, permitindo embarque e desembarque sem degraus.

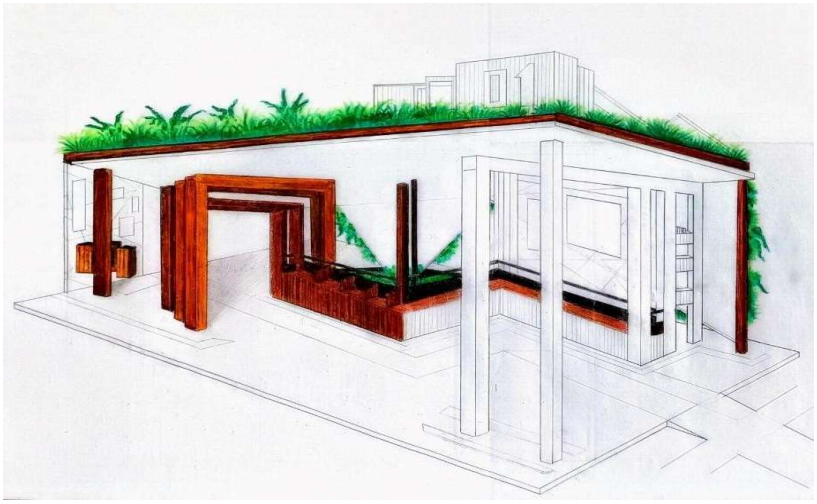


Figura 3: Croqui modelo de ponto de ônibus

Com a aplicação dessas estratégias, os pontos de ônibus do BRT serão significativamente mais confortáveis, resistentes e acessíveis, proporcionando sombra, ventilação e durabilidade com custos reduzidos.

3.4. Projeto do Terminal BRT

O conceito baseia-se em soluções flexíveis, adaptáveis a diferentes contextos urbanos, respeitando as diretrizes técnicas e normativas vigentes. A proposta considera a organização dos fluxos de embarque e desembarque, a hierarquização dos acessos, a integração com ciclovias e calçadas acessíveis, além da utilização de recursos sustentáveis como captação de água da chuva e energia solar. O projeto configura-se como um espaço de mobilidade, capaz de conectar o transporte público a outras funções urbanas, promovendo a qualidade do espaço público e contribuindo para a valorização do transporte coletivo como solução prioritária para os desafios da mobilidade contemporânea. O design busca refletir acessibilidade e acolhimento, com elementos de paisagismo e um bicicletário integrado.

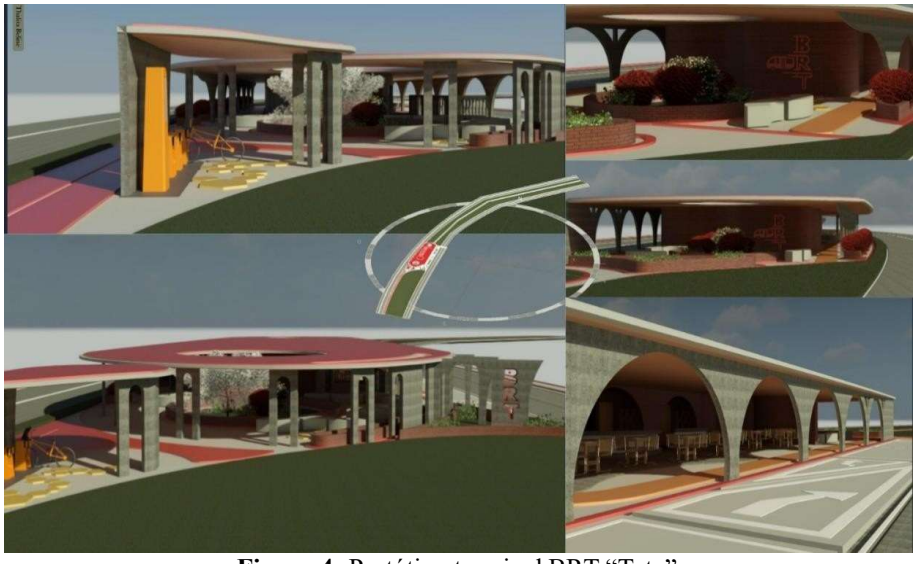


Figura 4: Protótipo terminal BRT “Tatu”

De acordo com a Figura 4, o protótipo apresenta volumes curvos e coberturas leves, com pilares arqueados em concreto aparente, o que cria uma estética marcante e fluida. As formas orgânicas e modulação simétrica oferecem uma linguagem contemporânea e convidativa, refletindo acessibilidade e acolhimento. Inclusive utilizando elementos que lembram os animais conforme seus pontos, o terminal em questão, chamado de Terminal Tatu, tem em seus pisos cores terrosas e um padrão amarelo de peças hexagonais que lembram o padrão da carapaça de um tatu.

A proposta foi organizada com base em uma lógica modular e funcional, com fluxos bem definidos. O uso de plataformas elevadas, rampas de acesso e piso tátil assegura acessibilidade universal. A forma arquitetónica curva, com pilares em arco e cobertura leve, conferem identidade visual ao projeto, remetendo à fluidez do movimento urbano. Atende-se também aos indicadores urbanos de Jardim/MS (Jardim, 2013). A linguagem arquitetónica escolhida mistura o concreto aparente com detalhes em vermelho e paisagismo, gerando uma estética que remete ao modernismo. O uso de cores vivas em elementos como o bicicletário reforça pontos de atenção e integração modal.

4. CONCLUSÃO

O protótipo de sistema de transporte público coletivo urbano baseado na metodologia projetual BRT é considerado fundamental para preencher a lacuna crítica de transporte público em Jardim/MS e Guia Lopes da Laguna/MS. Apesar de sua conurbação e população superior a 20.000 habitantes, o que legalmente exige um sistema de transporte público coletivo conforme a Política Nacional de Mobilidade Urbana (BRASIL, 2012), esses municípios não oferecem o serviço

A consideração de subsídios municipais é crucial para manter as tarifas acessíveis à população, visto que a experiência anterior de transporte coletivo na região, operada por iniciativa privada, foi descontinuada pela falta de investimento e apoio governamental, evidenciando a dependência do suporte público para sua sustentabilidade. Em suma, este protótipo visa não apenas suprir uma lacuna infraestrutural crítica, mas também promover um desenvolvimento urbano mais equitativo, inclusivo e sustentável para a conurbação, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 1, 11 e 13 da Agenda 2030 da ONU.

Agradecimentos

Expressamos nossa profunda gratidão ao IFMS Campus Jardim, que serviu de berço para esta pesquisa e promoveu a transferência de conhecimento técnico. Agradecemos também ao fomento à pesquisa do CNPQ e ao ambiente acadêmico do curso de Arquitetura e Urbanismo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL (2012) *Lei nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012: Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU)*. Brasília, DF: Presidência da República.

BRASIL. Ministério das Cidades (2008) *Manual de BRT: guia de planejamento*. Brasília, DF: Ministério das Cidades.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana – SeMob (2016) *Caderno Técnico para Projetos de Mobilidade Urbana: transporte ativo*. Brasília, DF: Ministério das Cidades.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2010) *Censo Demográfico 2010*. [S. l.]: IBGE.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (2018) *Agenda 2030: ODS – Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento*. Brasília, DF: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão.

JARDIM-MS (2013) *Lei Complementar nº 103, de 2013: Lei complementar do Plano Diretor do Município de Jardim-MS*. Jardim, MS: Prefeitura Municipal.

Tiago Machado Faria de Souza (tiago.souza@ifms.edu.br); *Thalita Beline Vareiro* (thalitabvareiro@gmail.com)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul, Campus Jardim, Arquitetura e Urbanismo, Rodovia BR-060, s/n, Jardim - MS

A REESTRUTURAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO DE GOIÂNIA E REGIÃO METROPOLITANA: UMA ANÁLISE TÉCNICO-CIENTÍFICA DO NOVO MODELO SIT-RMTC

Lucas Lourenço Moreira de Queiroz[1], **Domingos Sávio Afonso**[2], **Rômulo Dante Orrico Filho**[1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), [2]Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos (CMTC),

RESUMO
Este artigo analisa a proposta de reestruturação do Sistema Integrado de Transporte da Região Metropolitana de Goiânia (SIT-RMTC), com base nos estudos técnicos realizados no plano estratégico elaborado pela Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos, incorporados posteriormente na regulamentação do serviço por meio de Leis Complementares Estaduais. A análise se fundamenta na identificação dos pilares técnico-institucionais que estruturam o novo modelo e na avaliação de sua conformidade com a Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012), bem como de seu potencial para promoção de eficiência, acessibilidade e sustentabilidade financeira do serviço. Utiliza-se como metodologia a pesquisa documental, revisão bibliográfica e análise comparativa com experiências internacionais. Os resultados revelam avanços na articulação entre redes municipais, na implementação de subsídios tarifários e na reformulação do modelo institucional de governança do transporte coletivo. Conclui-se que a proposta de reestruturação representa um marco no desenvolvimento da governança metropolitana, contudo com desafios no longo prazo.

1. INTRODUÇÃO

O transporte público coletivo urbano constitui um dos eixos estruturantes da mobilidade urbana sustentável e figura como direito social garantido pela Constituição Federal de 1988. Este direito é operacionalizado no âmbito das diretrizes estabelecidas pela Lei nº 12.587/2012, que institui a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU). Apesar desse amparo normativo, o transporte público coletivo brasileiro enfrenta uma crise persistente, alimentada por desequilíbrios econômicos, ausência de planejamento integrado, falta de subsídios estruturados e crescente competição com modais individuais motorizados e plataformas digitais de transporte (apps). Dados da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2019) indicam uma retração de mais de 50% na demanda entre 1994 e 2019, situação agravada pelos protestos de 2013 e pelos impactos econômicos e sanitários da pandemia de Covid-19, que reduziram em até 80% o número de passageiros (NTU, 2021).

Neste contexto, a Região Metropolitana de Goiânia (RMG), composta por 21 municípios interdependentes, destaca-se por possuir uma estrutura institucional de governança relativamente robusta. A região é administrada por meio da Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos (CMTC), órgão gestor centralizado que regula os contratos de concessão até 2028 (antes da reestruturação). Apesar dessa estrutura, a partir da década de 2000, o sistema começou a apresentar sinais de esgotamento: envelhecimento da frota, redução da qualidade dos serviços, queda acentuada da demanda e falta de fontes de financiamento públicas contínuas.

A fim de enfrentar esse panorama, a CMTC propôs, em 2021, a partir de uma série de estudos técnicos realizados, um novo modelo para o Sistema Integrado de Transporte da Região Metropolitana de Goiânia (SIT-RMTC), fundamentado nos princípios da PNMU e inspirado em experiências internacionais consolidadas. O novo modelo prevê a criação de redes municipais, aprimoramento tarifário com subsídios, reestruturação da governança intermunicipal e incentivo à modernização tecnológica e ambiental da frota. Este conjunto de diretrizes foi posteriormente consolidado nas Leis Complementares Estaduais nº 169/2021 e nº 187/2023, que incorporaram formalmente os pilares técnicos propostos.

1.1 Estado da Arte

Nas últimas décadas, o debate em torno da mobilidade urbana tem se intensificado no campo acadêmico e nas políticas públicas, principalmente a partir da promulgação da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012). Esta legislação passou a enfatizar os princípios de acessibilidade universal, equidade no acesso aos serviços de transporte, eficiência na prestação dos serviços e sustentabilidade socioambiental. O estado da arte sobre governança do transporte público metropolitano no Brasil mostra um cenário predominantemente caracterizado pela fragmentação institucional, falta de financiamento estável e ausência de instrumentos integrados de planejamento e regulação. Diversos estudos, como os de Carvalho (2016), Fleury et al. (2015) e Rolnik (2011), apontam que os sistemas de transporte coletivo por ônibus sofrem com a perda de atratividade, a precariedade da infraestrutura e a forte concorrência com modos individuais, especialmente após o crescimento de serviços por aplicativos.

O modelo de governança metropolitana proposto por Elinor Ostrom (1990) tem ganhado espaço como alternativa teórica e prática para enfrentar esses desafios. A ideia de uma governança policêntrica, com participação articulada de diferentes níveis de governo e setores da sociedade, tem influenciado a formulação de consórcios intermunicipais e redes integradas de transporte. Contudo, poucos são os exemplos de implementação bem-sucedida e com respaldo legal robusto. A experiência da Região Metropolitana de Goiânia se destaca por buscar institucionalizar esse arranjo por meio de leis complementares específicas, redefinindo a titularidade do serviço, a estrutura de governança e os mecanismos de financiamento.

Adicionalmente, experiências internacionais de referência, como os modelos de Madrid e Paris, são marcadas por subsídios públicos expressivos e sistemas de bilhetagem integrados, que garantem a previsibilidade financeira e a qualidade do serviço. No Brasil, a resistência à adoção de subsídios tarifários é um obstáculo recorrente, refletido na dependência quase exclusiva da tarifa paga pelo usuário. O avanço da RMTC ao propor a separação entre tarifa pública e tarifa de remuneração, conforme prevê a Lei nº 187/2023, aproxima-se das boas práticas internacionais. Assim, este artigo se insere no estado da arte ao explorar uma experiência concreta de reestruturação institucional e financeira de um sistema metropolitano de transporte, contribuindo para o entendimento de caminhos possíveis para superar a crise crônica da mobilidade urbana brasileira.

1.2 Diagnóstico e Desafios

O diagnóstico apresentado pela CMTC (2021) evidencia que, entre 2009 e 2019, a RMTC "perdeu" 37,3% de sua demanda, resultado de uma série de problemas como: a degradação do serviço, competição com modos alternativos (como o transporte por aplicativos) e ausência de incentivos à demanda. A frota operante apresentava idade média superior a 11 anos, incompatível com padrões de conforto e eficiência desejáveis. Segue os números absolutos de passageiros transportados e os impactos de redução representados na figura 01 abaixo:

Ano	Passageiros Absolutos Transportados	Variação	
		% ano	% acum.
2009	226.585.425	-	-
2010	229.500.028	1,3%	1,3%
2011	235.530.517	2,6%	3,9%
2012	232.448.745	-1,3%	2,6%
2013	227.093.155	-2,3%	0,2%
2014	211.522.639	-6,9%	-6,6%
2015	196.366.924	-7,2%	-13,3%
2016	175.164.189	-10,8%	-22,7%
2017	157.225.092	-10,2%	-30,6%
2018	145.914.982	-7,2%	-35,6%
2019	142.085.722	-2,6%	-37,3%

Figura 1: Demanda absoluta transportada - anual

Todos estes problemas diretos e indiretos foram "intensificados" e/ou expostos também pela pandemia da covid-19, que resultou em um impacto ainda maior na demanda efetiva de passageiros pagantes, representados abaixo pela figura 02.



	nov/19	dez/19	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20	mai/20	jun/20	jul/20	ago/20	set/20	out/20	nov/20	dez/20	jan/21	fev/21	mar/21
Demanda	11.982.458	10.708.741	10.454.211	10.534.868	8.217.737	3.267.201	4.093.423	4.508.070	4.622.572	5.155.117	5.484.069	5.986.227	6.079.505	6.137.392	5.994.611	5.836.974	4.770.011
Variação % mês	0,0%	-10,6%	-2,4%	0,8%	-22,0%	-60,2%	25,3%	10,1%	2,5%	11,5%	6,4%	9,2%	1,6%	1,0%	-2,3%	-2,6%	-18,3%
Variação % acum.	0,0%	-10,6%	-12,8%	-12,1%	-31,4%	-72,7%	-65,8%	-62,4%	-61,4%	-57,0%	-54,2%	-50,0%	-49,3%	-48,8%	-50,0%	-51,3%	-60,2%

Figura 2: Demanda absoluta transportada - período crítico da pandemia da covid-19

A baixa utilização do transporte coletivo se relaciona também à má distribuição urbana e ao espraiamento territorial dos municípios da RMG, gerando trajetos longos, baixa cobertura e altos custos operacionais. A ausência de subsídios diretos, salvo o Passe Livre Estudantil, impunha ao passageiro pagante o ônus de financiar todo o sistema, inclusive gratuidades legalmente instituídas. Em 2019, as gratuidades representaram 14,6% do total de passageiros transportados, elevando em cerca de R$ 1,00 o valor da tarifa técnica.

O novo modelo propõe uma reconfiguração da rede em duas sub-redes: a Rede Metropolitana e a Rede Goiânia/Aparecida (RGA), que atenderá cerca de 80% dos passageiros com itinerários mais curtos e tarifa estimada em R$ 3,00. Essa diferenciação permite maior equidade e racionalização do serviço, além de promover a sustentabilidade tarifária ao alinhar o custo real à capacidade de pagamento da população.

2. METODOLOGIA

O presente estudo adota e fundamenta-se em pesquisa documental, revisão bibliográfica e estudo comparativo a partir da análise do modelo de governança. O documento central examinado é a proposta técnica da CMTC (2021), complementada por dados secundários provenientes de fontes como a ANTP, a NTU, a European Metropolitan Transport Authorities (EMTA) e o Consórcio Regional de Transportes de Madrid (CRTM). A análise está fundamentada em um referencial teórico que compreende os princípios da governança policêntrica (OSTROM, 1990), os conceitos de financiamento sustentável de serviços públicos (CARVALHO, 2016) e as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei Federal nº 12.587/2012). O objetivo foi articular os dados normativos e técnicos a uma interpretação crítica sobre os mecanismos de articulação institucional, distribuição de competências e modelos de remuneração no âmbito metropolitano. Complementarmente, realiza-se uma análise comparativa entre o modelo vigente e a proposta SIT-RMTC, com ênfase na identificação de inovações institucionais e operacionais. Também são avaliados os dispositivos legais contidos nas Leis Complementares nº 169/2021 e nº 187/2023, com o intuito de verificar a materialização normativa das propostas técnicas formuladas pela CMTC.

3. RESULTADOS

A proposta da CMTC estrutura o novo SIT-RMTC em duas redes: a Rede Metropolitana (RMTC) e a Rede Goiânia/Aparecida (RGA), em termo de arranjo institucional e governança. Todavia a RMTC mantém a lógica de integração por terminais, linhas diretas, e, agora (novo modelo), com integração temporal via bilhetagem eletrônica, variedade de produtos de validação, diferenciação de tarifa pública e de remuneração. A RGA deverá atender aproximadamente 80% dos usuários, otimizando a operação e permitindo trajetos mais rápidos (lindeiros) e menos custosos ao passageiro, enquanto as demais áreas atendem os trechos de maior deslocamento total. Sendo que este passou a ser o novo desenho para cada rede, representados na figura 03 abaixo:

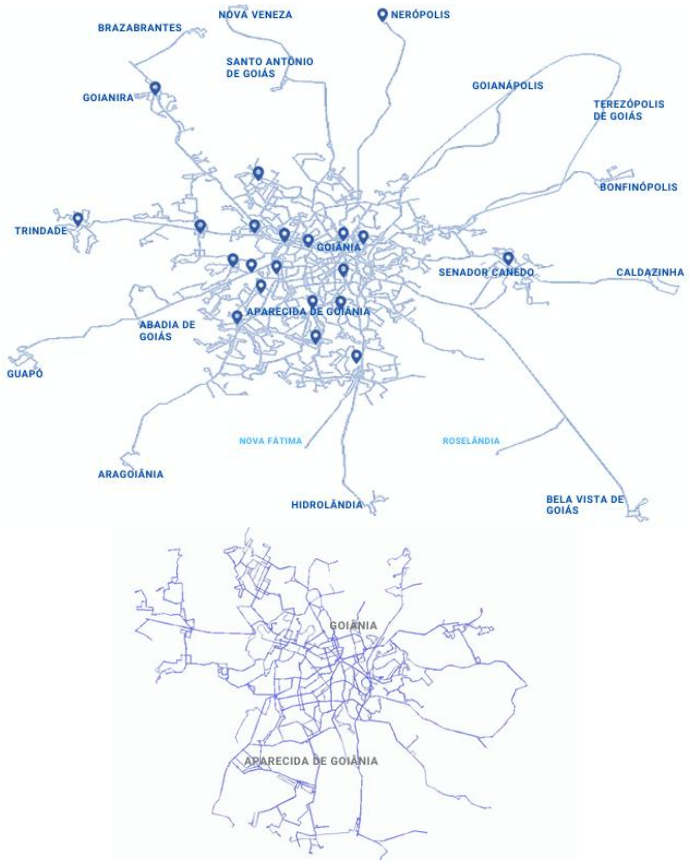


Figura 3: Rede Metropolitana de Transportes Coletivos (RMTC-acima) e Rede Goiânia/Aparecida (RGA-abaixo)

3.1 Integração legal e Institucional

A Lei Complementar nº 169/2021 foi um desdobramento direto da proposta técnica da CMTC. Ela institui a Rede Metropolitana de Transporte Coletivo da Grande Goiânia e regulamenta sua composição territorial, prevendo expressamente que a governança seja estruturada com a participação proporcional dos entes federativos. Além disso, reorganiza a Câmara Deliberativa de Transportes Coletivos (CDTC) e redefine o papel da CMTC, agora com poder de polícia e funções executivas fortalecidas. O modelo de governança multissetorial proposto em 2021, com financiamento compartilhado, também foi incorporado à legislação, conforme previsto no parágrafo único do art. 6º da LC nº 169/2021.

3.2 Modernização operacional e contratual

A Lei Complementar nº 187/2023 autorizou a reorganização da prestação dos serviços e a reestruturação dos contratos de concessão vigentes. A segregação entre operadoras (prestação direta do serviço) e provedoras (responsáveis pela frota e infraestrutura) reflete a lógica proposta pela CMTC, permitindo maior controle, investimentos direcionados e a implementação de frota elétrica. A criação de Sociedades de Propósito Específico (SPEs) e da Câmara de Liquidação e Custódia (CLC/RMTC) foi uma inovação institucional que assegura a gestão transparente dos fluxos financeiros e o uso eficiente dos recursos públicos, ampliando a sustentabilidade financeira do sistema, bem como gerindo o subsídio acordado.

3.3 Política tarifária e subsídios

Ambas as leis preveem, em consonância com a proposta original, a diferenciação entre tarifa pública e tarifa de remuneração, permitindo que o valor pago pelo usuário seja menor que o custo real do serviço. O equilíbrio financeiro é garantido pela compensação tarifária entre os entes participantes, assegurando modicidade tarifária e justiça distributiva. Esse mecanismo atende ao disposto no art. 9º da Lei Federal nº 12.587/2012, bem como ao princípio da equidade no acesso ao serviço público essencial.

4. CONCLUSÃO

A proposta da CMTC representa uma ruptura positiva com modelos ultrapassados de financiamento e operação do transporte público coletivo. Ao propor a gestão de subredes diferenciadas, subsídios públicos dirigidos, integração tecnológica e uma nova lógica de remuneração, o modelo aproxima-se das melhores práticas internacionais. As Leis Complementares nº 169/2021 e nº 187/2023 demonstram que a proposta saiu do campo técnico e se converteu em política pública institucionalizada, incorporando dispositivos essenciais da proposta original da CMTC e fortalecendo a governança metropolitana. Entretanto, sua implementação plena dependerá da articulação entre poderes públicos, operadores e sociedade civil. Será necessário acompanhar sua evolução com estudos contínuos de desempenho, transparência e avanço técnico, impacto social e aderência à realidade urbana regional. O sucesso da iniciativa poderá não apenas modernizar o transporte em Goiânia, mas contribuir com o debate nacional sobre os desafios presentes e futuros (de longo prazo) na mobilidade urbana e resiliência dos serviços públicos essenciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu Jr., A. e P. C. M. Silva (2007) Relação entre demanda e oferta de transporte público coletivo: uma análise estratégica utilizando SIG e Estatística Espacial. Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Transportes, Universidade de Brasília. Brasília, DF.

ALERJ (2017) Relatório final da Comissão Parlamentar de Inquérito. Resolução nº 503/2017. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 7 dez. 2017.

ANTP (2017) Custo dos serviços de transporte público por ônibus – Método de cálculo. São Paulo: ANTP.

ANTP; FNP; NTU e FNST (2019) Construindo hoje o amanhã. Brasília: ANTP, p. 8–31.

BRASIL (2012) Lei Federal nº 12.587/2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm (acesso em 15/07/2025).

Carvalho, C. H. (2016) Aspectos regulatórios e conceituais das políticas tarifárias dos sistemas de transporte público urbano no Brasil. Texto para Discussão nº 2192. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Brasília, DF.

CRTM (2019) Encuesta de movilidad de la Comunidad de Madrid – Documento síntesis. Madri: Consorcio Regional de Transportes de Madrid.

EMTA (2020) Barometer 2020 – Based on 2018 data. Paris: European Metropolitan Transport Authorities, p. 31.

Fleury, F. L.; J. R. B. Simon; R. E. D. Verrone e F. Feriancic (2015) Subsídio tarifário no transporte coletivo: aspectos técnicos, jurídicos e econômicos. In Anais do XX Congresso da ANTP. Santos: ANTP.

Fleury, F. L.; J. R. B. Simon e R. E. D. Verrone (2020) Como salvar o transporte público da crise? Diário do Transporte, São Paulo, 22 jun. 2020. Disponível em: https://diariodotransporte.com.br/2020/06/22/opiniao-como-salvar-o-transporte-publico-da-crise/ (acesso em 20/04/2020).

Gil, A. C. (2015) Subsídio tarifário no transporte coletivo: aspectos técnicos, jurídicos e econômicos. In Anais do XX Congresso da ANTP. Santos: ANTP.

GOIÁS (1999) Lei Complementar nº 27/1999. Cria a Região Metropolitana de Goiânia e dá outras providências. Disponível em: http://www.gabinetecivil.goias.gov.br/leis_complementares/1999/lei_complementar_n27.htm (acesso em 15/07/2025).

GOIÂNIA (2007) Edital de Concessão nº 01/2007. Concessão dos serviços de transporte público coletivo do SIT-RMTC. Disponível em: http://goiania.go.gov.br/sistemas/silic/dados/m011/2007/L011008200700010337.pdf (acesso em 15/07/2025).

NTU (2021) Boletim NTU – Impactos da Covid-19 no transporte público por ônibus – Mar/20 a Fev/21. Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Disponível em: www.ntu.org.br (acesso em 15/07/2025).

Ostrom, E. (1990) Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Cambridge University.

Rodrigues, A. e T. Amâncio (2020) Para evitar fuga de passageiro, transporte público pós-pandemia terá de rever modelo e lotação. Folha de S. Paulo, São Paulo, 10 jul. 2020, Ano 100, nº 33.336, p. 19.

Rolnik, R. e D. Klintowitz (2011) Mobilidade na cidade de São Paulo. Estudos Avançados, v. 25, n. 71, p. 89–108. DOI: 10.1590/S0103-40142011000100007.

Lucas Lourenço Moreira de Queiroz (lucasc.queiroz@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE/PET), Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ.
Domingos Sávio Afonso (savioafonso@gmail.com)
Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos (CMTC), 1ª Avenida, 486 - St. Leste Universitário, Goiânia - GO.
Rômulo Dante Orrico Filho (romulo@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE/PET), Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ.

AVALIAÇÃO DE FATORES DE RISCO EM ACIDENTES RODOVIÁRIOS: UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA MEDIANTE O MÉTODO AHP GAUSSIANO

Kamila Meneses da Silva[1], **Miguel Ângelo Lellis Moreira** [2], **Marcos dos Santos**[3]
[1]Ministério dos Portos e Aeroportos, [2]Universidade Federal Fluminense ,[3] Escola Naval

RESUMO
Segundo o IPEA (2020), os acidentes de transporte terrestre no Brasil causam cerca de 45 mil mortes anuais e geram altos custos, especialmente quando há vítimas fatais. Para reduzir esses impactos, é essencial implementar políticas públicas eficazes. Esta pesquisa realiza uma análise sob a ótica do método AHP Gaussiano para avaliar fatores de risco em acidentes rodoviários, priorizando intervenções em rodovias concedidas à iniciativa privada. Mediante uma abordagem quantitativa, são analisados critérios como volume de tráfego, atendimento médico e mecânico, índices de severidade e registros de ocorrências. Utilizando dados de 24 concessionárias monitoradas pela ANTT, empregam-se ferramentas computacionais para minimizar vieses na atribuição de pesos. O estudo identificou "Volume de Tráfego Total" e "Densidade de Tráfego Total" como os critérios mais relevantes no processo decisório. A metodologia busca apoiar gestores públicos na alocação eficiente de recursos e na formulação de políticas que reduzam acidentes, contribuindo para a segurança viária brasileira.

1. INTRODUÇÃO
Segundo relatório sobre estimativa dos custos dos acidentes de trânsito no Brasil, os acidentes de transporte terrestre matam cerca de 45 mil pessoas por ano, configurando-se uma das principais causas de mortes no país (IPEA, 2020).
Nas últimas duas décadas, o Brasil investiu na concessão de trechos rodoviários à iniciativa privada, totalizando cerca de 21.000 km concedidos até o final do período, o que representa 9% da malha rodoviária pavimentada (IPEA, 2023).
Segundo Silva *et al.* (2023) a tomada de decisão envolve escolher entre alternativas para definir soluções ou prioridades, e a Pesquisa Operacional contribui significativamente nesse processo, oferecendo métodos e ferramentas que auxiliam em diversas áreas.
A Análise Multicritério, pertencente à Pesquisa Operacional, auxilia na definição de prioridades ao considerar múltiplos aspectos simultaneamente, permitindo decisões fundamentadas com base em critérios relevantes para os decisores (Januzzi *et al*., 2009)
Desta forma, segundo Santos *et al.* (2023), o método Analytic Hierarchy Process (AHP) é o método multicritério mais utilizado no mundo. Esse método auxilia na seleção e na justificativa da escolha e foi desenvolvido na década de 1970 pelo Prof. Thomas Saaty. Em 2020 foi desenvolvido um novo método derivado do AHP. Segundo Soares *et al* (2021), o AHP Gaussiano é um método que define os pesos dos critérios com base na variabilidade dos dados, sem comparações paritárias.
Este trabalho aplica o método AHP Gaussiano para apoiar decisões na priorização de intervenções em rodovias concedidas, visando reduzir acidentes e auxiliar a gestão pública. São analisados fatores de risco, com avaliação quantitativa das rodovias, buscando otimizar recursos e propor políticas de segurança viária. Apesar do monitoramento da ANTT, persiste a lacuna de estudos que utilizem métodos multicritério automatizados, como o AHP-Gaussiano, aplicados a dados do Anuário SUROD, o que justifica esta pesquisa.

2. METODOLOGIA
Este trabalho, do ponto de vista da abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa com a análise exploratória dos dados. O estudo focou nos dados referentes ao ano de 2023 do documento Anuário SUROD (Estatísticas das Concessionárias e Anuário 2023), elaborado pela ANTT, disponível através do link: <https://static.poder360.com.br/2024/01/antt-anuario-concessionarias- 2023.pdf>.
O documento Anuário SUROD compila dados operacionais dos serviços rodoviários interestadual e internacional de passageiros referentes ao ano de 2023. Este anuário oferece uma visão abrangente do setor, incluindo informações sobre empresas habilitadas, frota de veículos, abrangência dos serviços e movimentação de passageiros. Este trabalho se caracteriza como exploratório e quantitativo e o mapa metodológico pode ser visualizado na Figura 1.

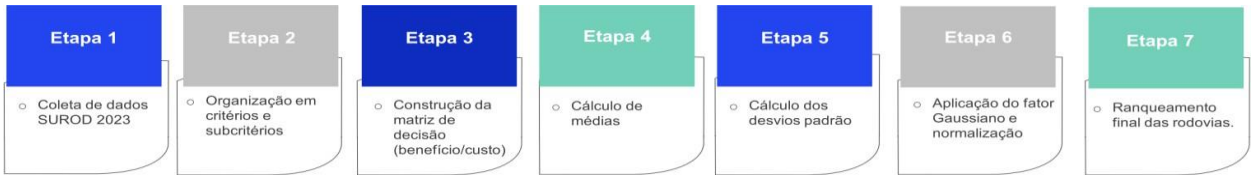


Figura 1: Mapa Metodológico com as etapas do AHP- Gaussiano.

A metodologia foi desenvolvida de forma estruturada, em sete etapas principais. Inicialmente, ocorre a coleta dos dados do Anuário SUROD 2023, seguida pela organização das informações em critérios e subcritérios. Em seguida, constrói-se a matriz de decisão, definindo os parâmetros de benefício ou custo. A partir dela, são calculadas as médias e os desvios padrão de cada critério, que permitem a aplicação do fator Gaussiano e sua normalização. Por fim, obtém-se o ranqueamento final das rodovias, resultante da ponderação dos critérios normalizados.
Ademais, o estudo limitou-se às rodovias concedidas e monitoradas pela ANTT. Dentre as concessionárias existentes, foram utilizadas informações de 24 rodovias: Ecoponte, Via Costeira, Autopista Litoral Sul, Autopista Fernão Dias, RIOSP, Autopista Regis Bittencourt,Via Sul, Concer, Autopista Fluminense, Eco 101, ViaBahia, Eco504, Via 040, Rodovia do Aço, Concebra, Autopista Planalto Sul, Transbrasiliana,CRO, Ecovias do Cerrado, Ecoriominas,Msvia, Ecovias do Araguaia, Ecosul, Via Brasil BR-163.

2.1. Método AHP- Gaussiano

O método AHP-Gaussiano é uma ferramenta matemática de apoio à decisão que evita vieses ao eliminar a influência da opinião do decisor na definição dos pesos dos critérios, utilizando a análise da sensibilidade do fator gaussiano e podendo ser aplicado em diversas áreas (Moratelli, 2024).
O modelo gaussiano é utilizado por considerar a variabilidade das alternativas em cada critério, reduzindo a subjetividade na tomada de decisão. Ele representa os pesos e julgamentos por meio de uma distribuição normal, em vez de valores fixos, permitindo lidar melhor com variações e incertezas, comuns em avaliações humanas (Barroso,2021).
Para Santos *et al.* (2021) O AHP-Gaussiano possui as seguintes etapas:
1. Determinar a matriz de decisão (definir se os critérios são: monotônico de benefício ou de custo);
2. Calcular a média das alternativas em cada critério;

$$\bar{x}j = \frac{\sum_{i=1}^{n} xij}{n} \quad (1)$$

3. Calcular o desvio padrão dos critérios, com base nas amostras das alternativas;

$$\sigma j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(xij - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

4. Calcular o fator gaussiano para cada critério (em seguida normalizar a matriz); , onde σ representa o desvio padrão, e μ a média do critério:

$$gj = \frac{\sigma j}{\bar{x}} \quad (3)$$

5. Ponderação da matriz de decisão (o produto entre cada critério e o fator normalizado);

$$wj = \frac{gj}{\sum_{j=1}^{m} gj} \quad (4)$$

6. Normalização dos resultados;
7. Obtenção do ranking.

Na etapa final da tomada de decisão, aplica-se o fator gaussiano normalizado à matriz de decisão, ponderando os valores de cada alternativa. Em seguida, soma-se esses valores para cada alternativa e ordena-se os resultados de forma decrescente. A alternativa com a maior pontuação é considerada a melhor opção segundo o modelo (Morita, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base em dados das 24 concessionárias, as alternativas foram analisadas considerando cinco critérios e 12 subcritérios, abrangendo aspectos técnicos e quantitativos relacionados ao desempenho de cada opção avaliada. Os critérios adotados neste estudo são os mesmos apresentados no Anuário Rodoviário da ANTT. Os critérios considerados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Descrições de cada critério

Volume de Tráfego Total (VT)	**Atendimento Médico (AM)**	**Atendimento Mecânico (AT)**	**Sinistros de Trânsito (ST)**	**Termo de Registro de Ocorrência (TRO)**
Soma de todos os veículos que passam por um ponto específico de uma via ou rodovia durante um determinado período.	Refere-se aos serviços de assistência médica prestados a vítimas de incidentes ou emergências ocorridas em rodovias.	Serviço de assistência técnica prestado a veículos que apresentam problemas mecânicos ou elétricos enquanto transitam por rodovias.	Serviço de assistência técnica prestado a veículos que apresentam problemas mecânicos ou elétricos enquanto transitam por rodovias.	Documento formal utilizado para registrar detalhes sobre um evento, incidente, ocorrência no trânsito ou acidentes. Registro oficial elaborado por autoridades competentes.
1. Volume de Tráfego Total (VT) 1.1 Densidade de Tráfego Total 1.2 Volume de Tráfego Categoria – Passeio e Motos (VT1) 1.3 Volume de Tráfego Categoria – Comercial (VT2) 1.4 Densidade de Tráfego (VT3): (Volume / Extensão)	2. Atendimento Médico (AM) 2.1 Tempo Médio de Atendimento Médico (AM1) 2.2 Densidade de Atendimento Médico (AM2): (Quantidade de Atendimento Médico / Densidade de Tráfego)	3. Atendimento Mecânico (AT) 3.1 Tempo Médio de Atendimento Mecânico (AT1) 3.2 Densidade de Atendimento Mecânico (AT2): (Quantidade de Atendimento Mecânico / Densidade de Tráfego)	4. Sinistros de Trânsito (ST) 4.1 Índice de Severidade (ST1): (Número de acidentes sem vítimas + 5 * Número de acidentes com feridos + 13 * Número de acidentes com óbitos) / (Volume * Extensão) 4.2 Índice de Segurança Viária (ST2): Número de óbitos / ((Extensão / 1000) * (Volume / 1.000.000))	5. Termo de Registro de Ocorrência (TRO) 2023 5.1 TRO Pavimento 5.2 TRO Sinalização

Neste estudo, os critérios de tráfego (VT, VT1 e VT2) foram tratados como monotônicos de lucro e os demais como de custo. As alternativas foram organizadas em matriz de decisão, processada na ferramenta online do IME para aplicação do AHP-Gaussiano, que automatiza cálculos de médias, desvios padrão, fatores gaussianos e pesos. Essa ferramenta, acessível online em https://decisionmaking.shinyapps.io/gaussian_ahp/, foi projetada especificamente para a aplicação do método AHP-Gaussiano. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2: Matriz de Decisão Normalizada e o Resultado do AHP Gaussiano

Local	**Média**	**Desvio Padrão**	**Fator Gaussiano**	**Pesos**
Volume de Tráfego Total	0,041666667	0,030085190	0,722044558	0,040864646
Densidade de Trafego Total	0,041666667	0,071489319	1,715743645	0,09710378
Volume de Tráfego Categoria – Passeio e Motos (VT1)	0,041666667	0,031510423	0,756250149	0,042800536
Volume de Tráfego Categoria – Comercial (VT2)	0,041666667	0,031601371	0,758432895	0,04292407
Densidade de Tráfego (VT3) comercial	0,041666667	0,033324186	0,799780457	0,045264166
Atendimento Médico	0,041666667	0,038990934	0,935782425	0,052961298
Tempo Médio de Atendimento Médico (AM1)	0,041666667	0,019591278	0,470190665	0,026610788
Densidade de Atendimento Médico (AM2)	0,041666667	0,140537591	3,372902173	0,190891892
Atendimento Mecânico	0,041666667	0,027191122	0,65258693	0,03693364
Tempo Médio de Atendimento Mecânico (AT1)	0,041666667	0,036891054	0,885385299	0,050109036
Densidade de Atendimento Mecânico (AT2)	0,041666667	0,081398751	1,953570022	0,11056374
Índice de Segurança Viária (ST2)	0,041666667	0,020971349	0,503312381	0,028485336

Índice de Severidade (ST1)	0,041666667	0,025029432	0,600706366	0,033997421
TRO	0,041666667	0,041723409	1,00136181	0,056672812
TRO Pavimento	0,041666667	0,052440622	1,258574934	0,071229979
TRO Sinalização	0,041666667	0,053439580	1,282549923	0,072586861

Entre os critérios analisados, a Densidade de Atendimento Médico (AM2), com peso de 0,1909, destacou-se como o fator mais crítico. A Densidade de Atendimento Mecânico (AT2) também teve forte impacto, enquanto TRO Pavimento e Sinalização apresentaram influência intermediária. Já o Tempo Médio de Atendimento Médico (AM1) e o Índice de Segurança Viária (ST2) foram os menos significativos. Entre os destaques, ECOPONTE, VIA BRASIL BR-163 e RODOVIA DO AÇO mostraram bons resultados; já ECORIOMINAS e CRO tiveram desempenho baixo, enquanto FERNÃO DIAS e RÉGIS BITTENCOURT ficaram em posição mediana. A Tabela 3 apresenta o ranking final.

Tabela 3: Pontuação Global e Ranqueamento

Concessionárias	Pontuação Global	Posição	Concessionárias	Pontuação Global	Posição
ECOPONTE	0,260131858	1º	AUTOPISTA REGIS BITTENCOURT	0,030534911	13º
VIA COSTEIRA	0,069747328	2º	ECOVIAS DO ARAGUAIA	0,028136021	14º
VIA BRASIL BR163	0,051745426	3º	ECO0504	0,027017855	15º
RODOVIA DO AÇO	0,043081752	4º	VIABAHIA	0,025787907	16º
AUTOPISTA FERNÃO DIAS	0,040408417	5º	ECOSUL	0,025369394	17º
AUTOPISTA LITORAL SUL	0,037608097	6º	AUTOPISTA FLUMINENSE	0,025179489	18º
RIOSP	0,036742626	7º	ECO 101	0,024820569	19º
VIA SUL	0,033918776	8º	AUTOPISTA PLANALTO SUL	0,024423714	20º
CRO	0,03161537	9º	VIA 040	0,023059151	21º
TRANSBRASILIANA	0,031417876	10º	ECORIOMINAS	0,022598407	22º
ECOVIAS DO CERRADO	0,031366206	11º	MSVIA	0,022332772	23º
CONCER	0,030850493	12º	CONCEBRA	0,022105586	24º

Na etapa final, as ponderações resultaram no ranking apresentado na Tabela 2. A ECOPONTE foi a melhor avaliada, com desempenho 3,7 vezes superior à VIA COSTEIRA (2ª colocada) e destacando-se das demais. VIA COSTEIRA e VIA BRASIL BR-163 formam, com outras até a 10ª posição, um grupo intermediário de desempenho semelhante. Já as últimas posições, próximas entre si, incluem AUTOPISTA PLANALTO SUL e CONCEBRA. ECOPONTE, VIA COSTEIRA e VIA BRASIL BR-163 podem servir de referência, enquanto ECORIOMINAS, MSVIA e CONCEBRA necessitam de maiores investimentos.

O método AHP-Gaussiano demonstrou-se eficaz na identificação dos principais indicadores operacionais, contribuindo para uma tomada de decisão mais precisa.

Entre as rodovias analisadas, a ECOPONTE apresentou o melhor desempenho no conjunto monitorado pela ANTT. Esses achados reforçam a utilidade do método como instrumento de apoio à decisão, ao mesmo tempo em que reduzem a subjetividade e destacam a importância do fluxo de tráfego na segurança viária.

4. CONCLUSÕES

A classificação das rodovias com base em múltiplos fatores de risco permite alocar recursos de forma mais precisa, avaliar políticas de segurança e incentivar melhorias contínuas pelas concessionárias.

Entre as principais contribuições do estudo destacam-se: (i) o uso de dados oficiais da ANTT, que assegura consistência e credibilidade; (ii) a relevância prática dos resultados, ao evidenciar critérios diretamente

acionáveis; e (iii) a reprodutibilidade, garantida pelo emprego de uma ferramenta pública online que reduz vieses individuais.

Os rankings obtidos podem orientar gestores na formulação de políticas específicas, como a priorização de investimentos em atendimentos médico e mecânico, a revisão de parâmetros contratuais ou a definição de metas regulatórias alinhadas aos critérios mais críticos. Também permitem identificar boas práticas de concessionárias de destaque que podem ser replicadas em outras rodovias.

Os resultados demonstram que o AHP-Gaussiano constitui um suporte consistente à tomada de decisão, ao oferecer uma avaliação objetiva dos riscos e contribuir para a diminuição de acidentes e de seus impactos sociais. Sua principal inovação reside na automatização do processo de análise, reduzindo a influência de vieses subjetivos.

Por outro lado, o modelo limita-se aos critérios do Anuário SUROD, não contemplando variáveis contextuais igualmente relevantes, como clima, comportamento dos motoristas e intensidade da fiscalização. Pesquisas futuras poderão integrar esses fatores, ampliando a abrangência e realismo das avaliações de risco em rodovias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT (2023) Boletim anual de sinistros de trânsito em rodovias. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/informacoes-gerais/boletim-anual-de-sinistros-de-transito-em-rodovias-2023.pdf.(acesso em: 02 /06/ 2025).

ANTT(2024) Informações gerais das rodovias. Disponível em:https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/informacoes-gerais (acesso em: 02 /06/ 2025).

Santos, M. dos; C. F. S Gomes; M. Â. Moreira ; I. P. A Costa (2023). *Ferramentas computacionais de apoio à tomada de decisão.* Rio de Janeiro: Ed. dos Autores.

IPEA(2020). Custos dos acidentes de trânsito no Brasil: Estimativa simplificada com base na atualização das pesquisas do Ipea sobre custos de acidentes nos aglomerados urbanos e rodovias. Brasília. Disponível em: https://www.econstor.eu/bitstream/10419/240760/1/td-2565.pdf. (acesso em: 02 /06/2025).

IPEA (2023). Balanço da 1ª década de ação pela segurança no trânsito no Brasil e perspectivas para a 2ª década (Publicação Preliminar).Disponível em:https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12250/1/NT-Balanco_Primeira_Publicacao_Preliminar.pdf (acesso em: 02 /06/ 2025).

Jannuzzi, P. de M.;W.L. Miranda e D.S.G. Silva (2009). Análise multicritério e tomada de decisão em políticas públicas: aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações. *Informática Pública*, v. 11, n. 1, p. 69-87.
Disponível em:https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Jannuzzi/publication/228421871_Analise_Multicriterio_e_Tomada_de_Decisao_em_Politicas_Publicas_Aspectos_Metodologicos_Aplicativo_Operacional_e_Aplicacoes/links/5d9af7b992851c2f70f255dd/Analise-Multicriterio-e-Tomada-de-Decisao-em-Politicas-Publicas-Aspectos-Metodologicos-Aplicativo-Operacional-e-Aplicacoes.pdf (acesso em 02/06/2025).

Moratelli, A. C. A. B. Aplicação do método AHP-gaussiano para seleção de alternativas. 2024. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/aplica%C3%A7%C3%A3o-do-m%C3%A9todo-ahpgaussiano-para-sele%C3%A7%C3%A3o-de-anna-caroline-nchlf/.(acesso em: 12/05/2025).

Kamila Meneses da Silva (kamila.meneses@mpor.gov.br)
Ministério dos Portos e Aeroportos. Esplanada dos Ministérios - Brasília, DF, 70050-000
Miguel Ângelo Lellis Moreira (miguellellis@id.uff.br)
Universidade Federal Fluminense - UFF Niterói, RJ 24210-346, Brasil
Marcos dos Santos (marcosdossantos@ime.eb.br)
Escola Naval - EN Rio de Janeiro, RJ 20021-010, Brasil

.

COMPORTAMENTO DE VIAGEM: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA COM FOCO NAS TEORIAS DO COMPORTAMENTO PLANEJADO E DA MOTIVAÇÃO HUMANA

Christiane Aguiar de Andrade[1,2], **Matheus Henrique de Souza Oliveira**[1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2]Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

RESUMO
As transformações recentes na mobilidade urbana intensificaram a necessidade de compreender os determinantes do comportamento de viagem. Este artigo mapeia a produção científica sobre o tema, com foco na Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior – TPB*) e na Teoria da Motivação Humana. A análise bibliométrica, baseada em 5.987 publicações indexadas na *Scopus* e *Web of Science*, foi conduzida com o apoio do *Bibliometrix/Biblioshiny*. Os resultados indicam a predominância da *TPB* como referencial central e revelam a subexploração da Teoria da Motivação Humana. Temas como mobilidade sustentável, cidades inteligentes e impactos da pandemia emergem como frentes em expansão. Conclui-se que existem oportunidades para aprofundamentos conceituais e metodológicos que incorporem dimensões psicossociais mais amplas. O estudo contribui para o avanço do campo ao delinear uma agenda crítica e interdisciplinar para investigações futuras em mobilidade urbana.

1. INTRODUÇÃO

As transformações recentes na mobilidade urbana intensificaram o interesse por abordagens voltadas à explicação dos determinantes do comportamento de viagem. Trata-se de um campo multidisciplinar que articula engenharia de transportes, psicologia social, planejamento urbano e políticas públicas, investigando decisões modais, percepções de risco, motivações subjacentes e barreiras contextuais que moldam os deslocamentos cotidianos (Novaco, 2015; Bastam et al., 2022; Herlan et al., 2024).

Nesse cenário, a Teoria do Comportamento Planejado, formulada por Ajzen (1991), consolidou-se como o principal arcabouço teórico aplicado aos estudos sobre comportamento de viagem. A *TPB* pressupõe que as intenções — influenciadas por atitudes individuais, normas subjetivas e percepção de controle — constituem os determinantes imediatos das ações. Estudos recentes confirmam sua eficácia em decisões sobre transporte coletivo (Zhang e Quoquab, 2022), turismo (Han, 2015) e mudanças de mobilidade durante a pandemia de COVID-19 (De Vos, 2020). Pesquisas anteriores já evidenciavam sua aplicabilidade em modos ativos (Steg, 2005; Anable, 2005) e na escolha por veículos sustentáveis (Quintal et al., 2010), reforçando a versatilidade da *TPB* frente a diferentes contextos de decisão.

Em contrapartida, a Teoria da Motivação Humana, formulada por Maslow (1943), permanece pouco explorada na mobilidade, embora amplamente aplicada em outros campos das ciências sociais. Fundamentada em uma hierarquia de necessidades — fisiológicas, de segurança, pertencimento, estima e autorrealização —, oferece um arcabouço robusto para interpretar escolhas de transporte como expressões de motivações psicológicas e sociais (Scarano et al., 2023). Estudos como os de Klarin (2024) e Bao et al. (2023) destacam a relevância de incorporar dimensões motivacionais a modelos explicativos, sobretudo em face das crescentes demandas por sistemas mais inclusivos, saudáveis e sustentáveis.

A análise bibliométrica reúne técnicas estatísticas aplicadas ao exame de artigos, livros e publicações científicas. Constitui um recurso eficaz para sintetizar o conhecimento acumulado, identificar lacunas e delinear direções promissoras de pesquisa, contribuindo para o aprimoramento teórico e metodológico (Scarano et al., 2023; Wang et al., 2023; Klarin, 2024). Apesar de seu potencial, o mapeamento de fluxos de conhecimento ainda é subexplorado, sobretudo em contextos difusos e fragmentados. Isso impõe desafios como eliminar dados irrelevantes e garantir precisão das informações. A ausência de controle rigoroso pode comprometer a confiabilidade das análises e favorecer atenção assimétrica a determinados temas, com impactos negativos sobre o desenvolvimento de áreas correlatas (Aman e Gläser, 2024; Gautret et al., 2017).

A ausência de articulações sistemáticas entre a *TPB* e a Teoria da Motivação Humana, somada à relevância da bibliometria como instrumento de direcionamento científico, fundamenta a justificativa deste estudo. O objetivo central é mapear a produção científica sobre comportamento de viagem, com foco na aplicação dessas duas abordagens teóricas. Foram analisadas publicações indexadas em bases internacionais, de modo a identificar autores de destaque, núcleos temáticos, redes de colaboração, evolução temporal e lacunas conceituais ainda não exploradas. O estudo busca oferecer uma visão estruturada do estado da arte e subsidiar

a aplicação futura dessas teorias em investigações voltadas à mobilidade urbana.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Trata-se de um estudo de natureza exploratória e quantitativa, fundamentado em técnicas de análise bibliométrica, com o objetivo de mapear a produção científica sobre comportamento de viagem à luz da Teoria do Comportamento Planejado e da Teoria da Motivação Humana. Foram utilizadas as bases *Scopus* e *Web of Science (WoS)*, acessadas em abril de 2025. A estratégia de busca combinou termos relativos ao comportamento de viagem e às duas teorias, com operadores booleanos para ampliar e refinar os resultados.

A busca inicial resultou em 8.951 documentos (5.526 na *Scopus* e 3.425 na *WoS*). Após a remoção de 2.352 duplicidades no *RStudio*, obteve-se um corpus de 5.987 registros, filtrados no *Biblioshiny* para os tipos *Article, Review, Book, Book Chapter* e *Proceedings Paper*. Foram considerados indicadores de evolução temporal da produção, periódicos mais produtivos e citados, distribuição por país e afiliação institucional, coautoria, coocorrência de palavras-chave e análise temática (mapa de centralidade × densidade).

As análises foram conduzidas no *RStudio* (pacote *Bibliometrix*) e no *Microsoft Excel*. O mapa temático foi construído a partir de clusters semânticos avaliados por centralidade e densidade, classificando temas em centrais, emergentes, básicos e de nicho. Essa categorização foi interpretada à luz da literatura revisada, com ênfase na presença das duas teorias. Os resultados quantitativos principais foram organizados em uma tabela síntese (Tabela 1), e os núcleos conceituais identificados são apresentados no mapa temático (Figura 1).

3. RESULTADOS

O corpus final analisado, composto por 5.987 documentos publicados entre 1975 e 2025, revela crescimento contínuo da produção científica, com taxa média anual de 12,44%. Entre 2019 e 2024 concentrou-se o maior volume de publicações, refletindo o fortalecimento do tema na agenda científica. As publicações distribuíram-se em 1.050 periódicos, destacando-se *Transportation Research Part A, Journal of Transport Geography* e *Travel Behaviour and Society*. As dez fontes mais produtivas concentram aproximadamente 40% dos documentos. A Tabela 1 resume os principais indicadores bibliométricos.

Tabela 1: Indicadores bibliométricos da produção científica (1975–2025)

Indicador	Valor
Número de documentos	5.987
Taxa média anual de crescimento	12,44%
Periódicos mais produtivos	10 (≈40% da produção)
Países com maior colaboração	Espanha (22,5%), Austrália (21,1%), Reino Unido
Instituições líderes	Beijing Jiaotong (260), Peking (141), Delft (135)
Palavras-chave mais frequentes	*public transport* (734), *modal choice* (625), *TPB* (207)

Foram identificados 9.968 autores vinculados a 4.499 instituições, com média de três a quatro autores por artigo, o que evidencia o caráter colaborativo da produção. Em termos geográficos, observou-se um padrão centralizado, com baixos índices de colaboração internacional. Entre os dez países mais produtivos, a Espanha registrou o maior percentual de trabalhos em parceria (22,5%), seguida por Austrália (21,1%) e Reino Unido (20,9%). Em contraste, Índia (6,1%) e Canadá (11,3%) apresentaram os menores graus de colaboração internacional. Mesmo os países de maior volume — China e Estados Unidos — mantiveram níveis relativamente baixos (16,6% e 11,9%).

As instituições mais produtivas concentram-se sobretudo na Ásia, especialmente na China. A *Beijing Jiaotong University* lidera com 260 artigos, seguida pela *Peking University* (141), *Delft University of Technology* (135), *Southeast University* (128) e *Tongji University* (118). Entre as dez mais produtivas incluem-se ainda *Monash University* e *University of Sydney* (Austrália), *University of Utrecht* (Países Baixos), *University of Hong Kong* (Hong Kong) e *University of Ghent* (Bélgica).

As palavras-chave mais recorrentes incluem *modal choice* (625) e *theory of planned behavior/behaviour* (207), confirmando a relevância de modelos psicossociais para explicar decisões de mobilidade. O termo *public transport* (734) aparece associado a *commuting* (258) e *built environment* (242), sinalizando a relação entre mobilidade cotidiana, infraestrutura e organização espacial. Expressões como *accessibility* (146), *urban*

mobility (134) e *land use* (76) indicam articulação com o planejamento urbano. Observa-se ainda a presença de termos ligados à mobilidade ativa e sustentável, como *cycling* (120), *walking* (102), *active travel* (91), *sustainable mobility* (86) e *shared mobility* (79). O impacto da pandemia surge no termo covid-19 (299). A entrada de *machine learning* (81) sugere tendência emergente de uso de métodos computacionais.

O mapa temático (Figura 1) mostra uma estrutura consolidada em torno da TPB, com núcleos em *attitudes*, *travel satisfaction* e *structural equation model*. Temas como *public transport* e *commuting* ocupam a zona dos básicos, demandando maior aprofundamento teórico. Já tópicos como covid-19, *shared mobility* e *urban mobility* surgem como nichos emergentes, de alta densidade e baixa centralidade. A ausência de termos associados à Teoria da Motivação Humana reforça sua subexploração, configurando um vazio teórico relevante.

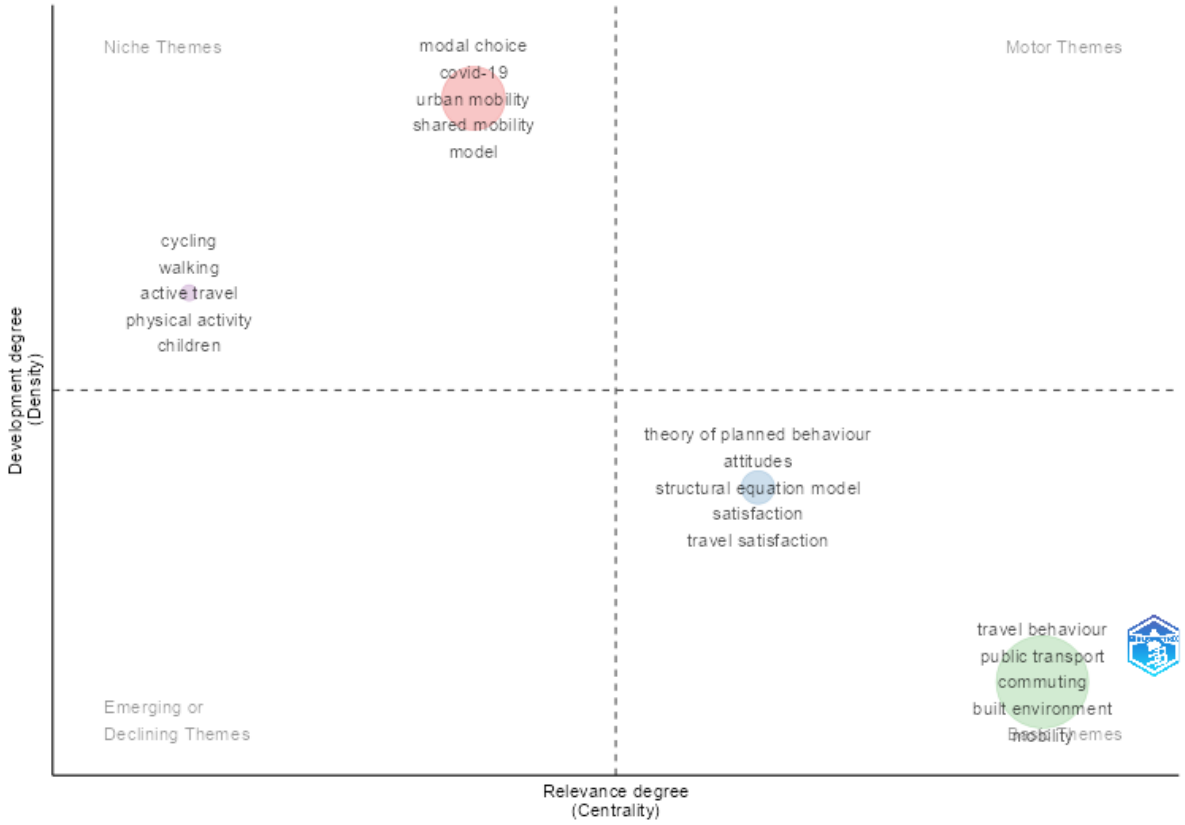


Figura 1: Mapa temático da produção científica (1975–2025)

De modo geral, os resultados evidenciam um campo consolidado, mas marcado por assimetrias teóricas e geográficas. A centralidade da *TPB*, a aplicação incipiente da Teoria da Motivação Humana e o predomínio de determinados países e instituições configuram padrões que moldam a produção. A emergência de novas temáticas — sustentabilidade, impactos da COVID-19 e métodos computacionais — revela a capacidade de incorporar desafios contemporâneos. Esses achados fundamentam a análise crítica desenvolvida na seção seguinte.

4. DISCUSSÃO

Os resultados confirmam e aprofundam tendências já discutidas na literatura, revelando um campo em expansão, marcado por maior complexidade metodológica e interesse em abordagens interdisciplinares. Conforme Klarin (2024), o *Bibliometrix* permite um mapeamento estruturado da produção, evidenciado aqui pelo crescimento consistente do número de publicações, especialmente após 2016. Esse aumento relaciona-se ao amadurecimento do debate sobre mobilidade urbana sustentável, emergência das cidades inteligentes e incorporação de teorias da psicologia social nos estudos de comportamento de viagem.

A Teoria do Comportamento Planejado aparece como referencial dominante nos documentos mais citados e

nas palavras-chave mais recorrentes, confirmando seu papel central (Zhang e Quoquab, 2022). Sua relevância decorre da capacidade de explicar fatores individuais que influenciam decisões de mobilidade — atitudes, normas subjetivas e percepção de controle. Essa predominância reforça o argumento de Novaco (2015), segundo o qual teorias da psicologia social contribuem para sistemas de transporte mais sensíveis às necessidades humanas.

Em contrapartida, a Teoria da Motivação Humana permanece subexplorada, embora ofereça alto potencial explicativo. Suas categorias — necessidades fisiológicas, de segurança, pertencimento, estima e autorrealização (Maslow, 1943) — permitem interpretar escolhas de mobilidade como expressões de motivações psicológicas e sociais. A ausência de termos ligados a essa teoria no mapa temático (Figura 1) reforça a lacuna. Integrações entre *TPB* e Motivação Humana podem estruturar hipóteses causais em que necessidades influenciam crenças, que moldam intenções e resultam em comportamentos observados. Essa perspectiva abre espaço para análises mais abrangentes do comportamento de viagem.

A coocorrência de palavras-chave indica que mobilidade sustentável, comportamento de viagem e intenção de uso ocupam posições centrais, corroborando Scarano et al. (2023). O surgimento de tópicos associados à pandemia de COVID-19, serviços de mobilidade e cidades inteligentes, apontado por Herlan et al. (2024) e Bao et al. (2023), demonstra adaptação do campo às transformações sociais e tecnológicas recentes.

A produção por país mostra liderança de Estados Unidos, Reino Unido e China, reiterando Bastam et al. (2022) e Wang et al. (2023). A presença tímida da América Latina aponta a necessidade de ampliar a visibilidade de contextos no sul global e promover colaborações internacionais mais equitativas.

Os resultados também evidenciam limites apontados por Aman e Gläser (2024) e Gautret et al. (2017), especialmente a dependência de bases indexadas e o risco de vieses na seleção. Combinar bibliometria com métodos qualitativos (entrevistas, grupos focais, etnografias) pode aprofundar a compreensão de motivações e barreiras em diferentes grupos sociais, além de validar empiricamente hipóteses integrativas *TPB*–Motivação.

5. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo mapear a produção científica sobre comportamento de viagem, com foco na Teoria do Comportamento Planejado e na Teoria da Motivação Humana. A análise bibliométrica permitiu identificar tendências, lacunas e articulações conceituais, contribuindo para o avanço das pesquisas e para o aperfeiçoamento de políticas de mobilidade.

Os resultados confirmam a predominância da *TPB* como estrutura teórica central na explicação das decisões de mobilidade, por articular atitudes, normas sociais e percepção de controle. Em contrapartida, a Teoria da Motivação Humana ainda ocupa posição incipiente, embora seu potencial para integrar dimensões psicológicas e sociais seja expressivo. A emergência de temas como sustentabilidade, cidades inteligentes e impactos da COVID-19 evidencia a vitalidade e a adaptabilidade do campo.

Ao sistematizar um corpus amplo e multidisciplinar, a investigação amplia o repertório teórico e metodológico disponível e promove conexões entre psicologia social, urbanismo, engenharia de transportes e políticas públicas. Para além da academia, os achados oferecem subsídios à formulação de políticas mais inclusivas, responsivas e sustentáveis. Do ponto de vista social, reforça-se a necessidade de modelos de transporte que contemplem não apenas critérios funcionais, mas também aspirações subjetivas por cidades mais justas e acessíveis.

Entre as limitações, destacam-se o uso restrito a duas bases indexadas e a ênfase quantitativa, que pode excluir contextos sub-representados e dificultar a apreensão de aspectos qualitativos. Apesar disso, os achados permanecem robustos e indicam a relevância de métodos complementares.

O mapeamento realizado abre frentes para pesquisas futuras, como: (i) aprofundar a articulação entre *TPB* e Teoria da Motivação Humana; (ii) incorporar recortes sociais negligenciados, sobretudo populações vulnerabilizadas; (iii) analisar os efeitos das transformações tecnológicas nos padrões de mobilidade; e (iv) reconhecer especificidades culturais nos processos de escolha modal. Mais do que oferecer um panorama

quantitativo, o estudo contribui para consolidar uma agenda interdisciplinar e centrada no ser humano. A análise bibliométrica reafirma seu papel estratégico como ferramenta de orientação científica, sensível à complexidade das realidades urbanas e às múltiplas dimensões que conformam os comportamentos de mobilidade.

REFERÊNCIAS

Ajzen, I. (1991) The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, v. 50, n. 2, p. 179–211. DOI: 10.1016/0749-5978(91)90020-T

Aman, V. e J. Gläser (2024) Investigating knowledge flows in scientific communities: the potential of bibliometric methods. *Minerva*. DOI: 10.1007/s11024-024-09542-2

Anable, J. (2005) 'Complacent car addicts' or 'aspiring environmentalists'? Identifying travel behaviour segments using attitude theory. *Transport Policy*, v. 12, n. 1, p. 65–78. DOI: 10.1016/j.tranpol.2004.11.004

Bao, L.; M. Kusadokoro; A. Chitose e C. Chen (2023) Development of socially sustainable transport research: a bibliometric and visualization analysis. *Travel Behaviour and Society*, v. 30, p. 60–73. DOI: 10.1016/j.tbs.2022.08.012

Bastam, M. N.; M. R. Mat Yazid e M. N. Borhan (2022) School travel behavior research milestone (1979–2021): a bibliometric review analysis. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, v. 13, n. 13, p. 1–14. DOI: 10.14456/itjemast.2022.90

De Vos, J. (2020) The effect of COVID-19 and subsequent social distancing on travel behavior. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 5, 100121. DOI: 10.1016/j.trip.2020.100121

Gautret, M.; S. Messori; A. Jestin; M. Bagni e A. Boissy (2017) Development of a semi-automatic bibliometric system for publications on animal health and welfare: a methodological study. *Scientometrics*, v. 113, n. 2, p. 803–823. DOI: 10.1007/s11192-017-2494-8

Han, H. (2015) Travelers' pro-environmental behavior in a green lodging context: converging value-belief-norm theory and the theory of planned behavior. *Tourism Management*, v. 47, p. 164–177. DOI: 10.1016/j.tourman.2014.09.014

Herlan, H.; E. Elyta; S. R. Fachmi Al Qadrie e A. Asriadi (2024) Building urban mobility through smart cities and sustainable policies. *Jurnal Borneo Administrator*, v. 20, n. 2, p. 171–184. DOI: 10.24258/jba.v20i2.1428

Klarin, A. (2024) How to conduct a bibliometric content analysis: guidelines and contributions of content co-occurrence or co-word literature reviews. *International Journal of Consumer Studies*, v. 48, n. 2. DOI: 10.1111/ijcs.13031

Maslow, A. H. (1943) A theory of human motivation. *Psychological Review*, v. 50, n. 4, p. 370–396. DOI: 10.1037/h0054346

Novaco, R. W. (2015) Transportation, psychology of. In: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 2 ed., v. 24, p. 623–628. DOI: 10.1016/B978-0-08-097086-8.22020-5

Quintal, V. A.; J. A. Lee e G. N. Soutar (2010) Risk, uncertainty and the theory of planned behavior: a tourism example. *Tourism Management*, v. 31, n. 6, p. 797–805. DOI: 10.1016/j.tourman.2009.08.006

Scarano, A.; M. Aria; F. Mauriello; M. R. Riccardi e A. Montella (2023) Systematic literature review of 10 years of cyclist safety research. *Accident Analysis & Prevention*, v. 188, 106996. DOI: 10.1016/j.aap.2023.106996

Steg, L. (2005) Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 39, n. 2–3, p. 147–162. DOI: 10.1016/j.tra.2004.07.001

Wang, P.; N. A. Haron; A. H. Alias e T. H. Law (2023) Knowledge map of climate change and transportation: a bibliometric analysis based on CiteSpace. *Atmosphere*, v. 14, n. 3, 434. DOI: 10.3390/atmos14030434

Zhang, J. e F. Quoquab (2022) Documenting the knowledge of pro-environmental travel behaviour research: a visual analysis using CiteSpace. *Journal of Tourism Futures*. DOI: 10.1108/jtf-03-2022-0101

Christiane Aguiar de Andrade (christiane.andrade@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – COPPE, Programa de Engenharia de Transportes (PET), Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão CEP: 21941-914 - Rio de Janeiro/RJ - Brasil
Matheus Henrique de Souza Oliveira (matheus@pet.coppe.ufrj.br)
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – COPPE, Programa de Engenharia de Transportes (PET), Av. Horácio Macedo, 2030. Bloco H - Sala 106 - Ilha do Fundão CEP: 21941-914 - Rio de Janeiro/RJ - Brasil

DIGITAL TWINS AND THE RESILIENCE OF CRITICAL TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE IN DEVELOPING COUNTRIES

Filipe Berbert Miranda, **Pastor Willy Gonzales Taco**,
Universidade De Brasília

ABSTRACT
Critical transportation infrastructure underpins modern economies and societies, yet ageing assets, climate extremes, and rapid urbanisation increasingly threaten its resilience. Digital Twin (DT) technology, defined as a high-fidelity virtual replica continuously synchronised with its physical counterpart, has emerged as a transformative tool for enhancing resilience, real-time monitoring, and lifecycle management of such infrastructure. This paper investigates how DTs can contribute to strengthening critical transportation networks, especially in developing countries, and examines the barriers hindering their widespread adoption. Recent research highlights significant potential for DTs to improve predictive maintenance, disaster preparedness, and operational efficiency. However, implementation remains limited due to challenges including technological gaps, high costs, lack of expertise, and institutional fragmentation. Addressing these challenges requires coordinated strategies, capacity building, and collaborative partnerships. This study aims to inform stakeholders seeking to leverage DTs to build safer, more resilient, and efficient transportation systems in developing contexts.

1. INTRODUCTION

Critical transportation infrastructure is the backbone of economic development and societal well-being, making its resilience to disruptions a paramount concern. Resilience, in the context of critical infrastructure, is defined as a system's ability to withstand, adapt to, and recover from disruptive events. Ensuring the continuous functionality of such infrastructure under adverse conditions has become an urgent priority for many countries, especially in developing nations where rapid urbanization and resource constraints often exacerbate vulnerabilities. Recent studies have highlighted that improving the resilience of critical infrastructure in developing countries is a key challenge and focus area (Lampropoulos *et al*., 2024).

Digital Twin (DT) technology has emerged as a promising approach to bolster infrastructure resilience. A DT is essentially a virtual replica of a physical asset that remains in continuous two-way communication with the real system. This seamless integration of data between physical infrastructure and its digital counterpart enables real-time monitoring, simulation, and predictive analytics (Fuller *et al*., 2020). Originally popularized in the manufacturing sector, DTs are increasingly being applied to complex infrastructure systems such as transportation networks. By leveraging ubiquitous sensors and IoT data, a DT can provide early warnings of potential failures, model "what-if" disruption scenarios, and optimize maintenance strategies before critical failures occur. For instance, DT-driven analysis can predict structural aging in bridges or detect emerging traffic bottlenecks, enabling proactive interventions that extend asset life and improve safety (Wu *et al*., 2025). Such capabilities translate into more efficient and resilient infrastructure operations, as digital twins support data-driven decision-making under both normal and emergency conditions. Indeed, recent reviews conclude that digital twins can significantly enhance the security, resilience, and continuity of critical infrastructure by providing interactive visualization and real-time simulation for decision support (Lampropoulos *et al*., 2024).

Despite these advantages, there remain important gaps in both research and practice. Most DT implementations in transportation infrastructure to date have been narrow in scope, focusing on specific subsystems (e.g. a bridge or a traffic signal network) rather than providing an integrated, system-wide solution. Comprehensive frameworks that span the entire infrastructure lifecycle – from planning and design to operation, disruption response, and recovery – are still lacking (Wu *et al*., 2025). This limitation is especially pronounced in developing countries, where digital transformation in infrastructure lags behind and DT adoption faces additional hurdles. Challenges such as limited high-speed connectivity and fragmented data ecosystems can impede real-time data exchange, which is vital for effective digital twin operation (Ahmadi *et al.,* 2021). Moreover, technical and organizational barriers to integrating diverse data sources mean the full potential of DTs for resilience is not yet realized (Wu *et al*., 2025). For example, establishing a common data environment and standards for urban-scale digital twins is an ongoing challenge (Yan et al., 2024), and the need for advanced networks (beyond 5G) to support reliable, low-latency data flows is evident (Ahmadi *et al.,* 2021). These gaps underscore the importance of developing tailored approaches that address the context of developing regions, where both the stakes and constraints for infrastructure resilience are high.

This study aims to bridge these gaps by exploring and demonstrating how digital twin technology can strengthen the resilience of critical transportation infrastructure in developing countries. The research objective is to formulate a conceptual framework that integrates digital twins into transportation infrastructure management and resilience planning. This framework addresses key technical issues identified in the literature – such as data integration, real-time analytics, and lifecycle monitoring – and adapts them to the realities of developing country contexts. In parallel, the applied objective is to provide actionable insights and guidelines for practitioners and policymakers. By outlining how a DT-based system can be implemented for real-time monitoring, predictive maintenance, and disaster response in transportation networks, the study offers a blueprint for translating the concept into practice. In essence, we seek to demonstrate that a well-designed digital twin can act as a resilience-enhancing tool for transportation infrastructure, improving preparedness and adaptive capacity in the face of disruptions. This introduction sets the stage for the subsequent sections, which detail the proposed framework and illustrate its application, thereby advancing both the academic understanding and practical implementation of digital twins for infrastructure resilience in developing regions.

2. LITERATURE REVIEW

Digital Twin technology, which originated in manufacturing and aerospace, has increasingly penetrated the infrastructure sector over the past decade. A DT goes beyond traditional digital models by maintaining a real-time, bi-directional connection with its physical counterpart. Data streams from sensors, such as strain gauges, accelerometers, GPS, and environmental monitors, feed into a virtual environment, which can simulate behaviour under different loading, environmental, or operational conditions (Fuller *et al*., 2020; Wu *et al*., 2025). This capability enables infrastructure managers to anticipate risks, simulate hypothetical scenarios, and plan interventions based on predictive analytics rather than relying on intuition or scheduled inspections (Lampropoulos *et al*., 2024).

Researchers emphasise that DTs can improve infrastructure resilience by enabling virtual testing of assets under extreme events, such as floods, earthquakes, or high-traffic loads, thereby identifying vulnerabilities before they materialise physically (Wu *et al*., 2025; Yan *et al*., 2025). For example, virtual stress testing of bridges under simulated seismic forces can inform retrofitting strategies tailored to local risk profiles (Nag *et al*., 2025). In the operational phase, DTs enable continuous monitoring, simplifying the early detection of anomalies such as unusual vibrations or settlement in bridges or tunnels (Wu *et al*., 2025). Studies demonstrate that integrating real-time monitoring with predictive models helps reduce unforeseen maintenance, prevent failures, and extend asset lifespans (Yan *et al*., 2025).

The literature also highlights the potential for DTs to transform the lifecycle management of transportation infrastructure. From design and construction through maintenance and decommissioning, a DT can serve as a digital strand connecting each phase (Fuller *et al*., 2020; Lampropoulos *et al*., 2024). In the design phase, engineers can test multiple configurations through the virtual environment, accounting for future demands and environmental changes. In maintenance, DTs integrate sensor data to predict when specific interventions will be necessary, enabling cost-effective asset management (Wu *et al*., 2025). However, researchers caution that real-world implementation remains limited. While pilot projects exist, large-scale, fully integrated DT ecosystems are rare, particularly in developing contexts where digital infrastructure, funding, and expertise may be lacking (Nag *et al*., 2025).

3. DISCUSSION

The potential benefits of DTs for critical transportation infrastructure are substantial. The primary advantage is the enhancement of resilience, which is defined as the ability of systems to resist, adapt to, and rapidly recover from disruptions. By enabling virtual simulations of disaster scenarios, DTs provide infrastructure managers with insights into the probable impacts of extreme events, allowing them to design proactive mitigation measures. This is particularly relevant for developing nations, which are more likely to suffer the consequences of natural hazards and climate change. For instance, virtual modelling of flood impacts on road networks can guide investment in drainage systems or elevation of vulnerable segments, reducing the likelihood of catastrophic failures during extreme weather events (Wu *et al*., 2025).

Equally significant is the application of DTs in real-time monitoring. In traditional infrastructure management, inspections are typically periodic and often depend on visual analysis, resulting in delays in detecting emerging problems. On the other hand, a DT constantly updates its virtual model using sensor data, enabling the early identification of structural issues, such as unusual strain patterns in a bridge girder or settlement in a roadway. Predictive analytics integrated into DT platforms can foresee deterioration trends, allowing maintenance crews to intervene before minor defects evolve into critical failures (Yan *et al*., 2025). Such predictive maintenance approaches reduce life-cycle costs and enhance safety, a crucial consideration in developing nations with limited budgets for emergency repairs.

The integration of DTs throughout the entire asset's lifecycle also promises considerable gains in efficiency and sustainability. During the planning and design phases, virtual testing of different settings and materials can optimise costs and improve resilience results. In operations, DTs help manage traffic flows dynamically, reducing congestion and emissions. Finally, during asset renewal or decommissioning, DTs offer a comprehensive historical record of asset performance, supporting informed decisions on rehabilitation or replacement (Fuller *et al*., 2020; Lampropoulos *et al*., 2024).

However, several formidable challenges deter the adoption of DT in developing countries. First, technological barriers are significant. Implementing a DT requires advanced digital infrastructure, including reliable broadband connectivity, IoT sensor networks, cloud computing resources, and high-performance computing capabilities. Many developing countries lack such infrastructure, resulting in data gaps or delays that weaken the effectiveness of DT applications (Nag *et al*., 2025).

Second, financial restraints can sometimes be challenging. The development and maintenance of a DT ecosystem involve considerable capital disbursement. Costs include hardware installation (sensors, cameras, servers), software licenses, data storage, and the skilled workforce required for operation and maintenance. Developing nations often prioritise immediate infrastructure needs over high-tech innovations, leading to limited investment in DT solutions (Wu *et al*., 2025).

Third, human capital is scarce in expertise specific to digital modelling, data analytics, and AI applications in civil engineering contexts. Even when governments express interest in DT adoption, they frequently lack the technical capacity to implement or sustain such systems independently (Yan *et al*., 2025).

Finally, institutional division and a lack of regulatory frameworks further hinder the deployment of DT. Transportation infrastructure often involves multiple agencies and jurisdictions, creating silos that obstruct the seamless data sharing essential for the integration of DTs. Moreover, concerns about cybersecurity, data privacy, and the legal implications of relying on AI-driven recommendations present additional obstacles (Fuller *et al*., 2020; Nag *et al*., 2025).

Addressing these challenges will require multi-faceted strategies. Collaborative partnerships between governments, academia, and the private sector can help reduce costs, share expertise, and build local capacity. International development banks and aid organisations may play a crucial role by funding pilot projects and providing technical assistance. Equally important is the development of standardised frameworks and regulatory guidelines to govern data sharing, cybersecurity, and the ethical use of digital technologies in public infrastructure (Lampropoulos *et al*., 2024). In this way, developing nations can progressively overcome barriers and harness DT technology to build safer, more resilient, and efficient transportation systems.

4. CONCLUSION

Digital Twins offer transformative potential for improving resilience, monitoring, and lifecycle management of critical transportation infrastructure. They provide tools for proactive decision-making, enable virtual simulations of extreme events, and facilitate predictive maintenance strategies that reduce costs and enhance safety. In developing countries, the adoption of DTs could be particularly impactful, given the higher vulnerability of infrastructure systems to natural hazards, climate change, and operational stress. Yet significant obstacles remain, including technological limitations, financial constraints, a shortage of skilled personnel, and institutional complexities. While pilot projects demonstrate promising outcomes, scaling DT technology across national transportation networks in developing contexts will demand strategic investment, capacity building, and strong inter-sectoral cooperation. Ultimately, bridging these gaps could pave the way for infrastructure systems that are not only safer and more sustainable but also capable of withstanding the growing uncertainties of the modern world.

REFERENCES

Ahmadi, H.; A. Nag; Z. Khar; K. Sayrafian; S. Rahardja (2021). *Networked Twins and Twins of Networks: An Overview on the Relationship Between Digital Twins and 6G*. IEEE Communications Standards Magazine, 5(4), 154-160. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2000041.

Fuller, A.; Z. Fan; C. Day; and C. Barlow. (2020). *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*. IEEE Access, 8, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

Lampropoulos, G.; I. Paraskevopoulos; and G. Nikolakopoulos (2024). *Digital Twins in Critical Infrastructure: A Systematic Review*. Information, 15(8), Article 454. https://doi.org/10.3390/info15080454

Nag, D.; R. Jha; and I. Fountoulakis (2025). *Exploring Digital Twins for Transport Planning: A Review*. European Transport Research Review, 17(1), Article 15. https://doi.org/10.1186/s12544-025-00547-x

Wu, D.; Q. Wang; and X. Wang (2025). *Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey*. Applied Sciences, 15(4), 1911. https://doi.org/10.3390/app15041911

Yan, Y.; Y. Li; and T. Zhang (2025). *Digital Twin Enabling Technologies for Advancing Road Engineering and Lifecycle Applications*. Engineering, 44, 184-206. https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.006

TRANSPORTE URBANO COMO VETOR DE DESCARBONIZAÇÃO: PROPOSTAS E COMPROMISSOS ESPERADOS NA COP30

Rafael Iatagan Souza Amaral[1], **Felipe Gabriel Ferreira da Silva**[2], **Christiane Lima Barbosa**[3]
[1, 2, 3] Universidade Federal do Pará

RESUMO
Este artigo analisou o papel do transporte urbano como vetor de descarbonização em Belém-PA e as transformações urbanas desencadeadas pela iminente COP30. O método explorou propostas e compromissos esperados para o setor de transporte na conferência, avaliando como a cidade, em seu processo de preparação, pode se posicionar como um modelo de desenvolvimento urbano sustentável. A pesquisa abordou os desafios e as oportunidades de implementação de políticas de transporte de baixo carbono, considerando o contexto local e as expectativas globais para a mitigação das mudanças climáticas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A crescente preocupação com as mudanças climáticas impulsiona a busca por soluções inovadoras em diversos setores, com destaque para o transporte urbano, que se configura como um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa (IPEA, 2016). A realização da COP30 em Belém-PA, em 2025, representa uma oportunidade para discutir e propor medidas de descarbonização ao considerar a transformação urbana acelerada vivida pela cidade desde o seu anúncio como sede do evento. Este artigo examinou como o transporte urbano pode atuar como um vetor fundamental para a descarbonização, analisando as propostas e compromissos esperados da COP30 e a relevância do processo de preparação de Belém nesse contexto.

A pesquisa busca identificar como a cidade pode se posicionar como modelo de mobilidade urbana sustentável, oferecendo soluções inovadoras e adaptadas ao seu contexto local, além de avaliar as expectativas globais para a mitigação das mudanças climáticas. A abordagem integra estratégias como a eletrificação da frota de ônibus, o incentivo à mobilidade ativa, o investimento em infraestrutura de transporte público e a transformação de Belém em um centro de experimentação de soluções para a descarbonização urbana. Esta é uma pesquisa qualitativa e exploratória, desenvolvida por meio de pesquisa bibliográfica e documental. A abordagem adotada permite uma análise crítica sobre as transformações urbanas e os desafios da mobilidade sustentável em Belém-PA no contexto da COP30, em especial, o transporte urbano como vetor de descarbonização, integrando perspectivas locais e globais sobre a mitigação das mudanças climáticas.

A base de dado foi o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Belém (IEGEE), publicado em 2023 pela Prefeitura Municipal de Belém em parceria com o ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. Esse documento fornece dados atualizados, entre 2018 e 2022, sobre os principais setores emissores, incluindo o setor de transportes, que se destaca como o maior contribuinte para as emissões de GEE no município. A metodologia GPC (*Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories*) também foi utilizada no IEGEE para compreender a estrutura das emissões urbanas e orientar a análise das propostas de descarbonização. Adicional, consultas em fontes como artigos científicos, relatórios técnicos, planos municipais e notícias especializadas. As informações foram organizadas e analisadas de forma descritiva e interpretativa, buscando identificar oportunidades e desafios no processo de transformação da mobilidade urbana de Belém. A análise se concentrou em tópicos como eletrificação da frota, mobilidade ativa, transporte fluvial, políticas públicas e investimentos estratégicos no setor.

2. O CENÁRIO DE BELÉM-PA E AS TRANSFORMAÇÕES URBANAS PARA A COP-30

2.1. A Situação Atual dos Sistemas de Transporte em Belém

A frota de ônibus em Belém começou a ser renovada com a introdução de 300 novos veículos "Geladão" que oferecem ar-condicionado e outras melhorias (DIÁRIO DO PARÁ, 2024). O acordo entre empresas e governos locais é uma transição gradual para veículos mais modernos e confortáveis (DETRAN, 2024). A substituição gradual dessa frota é necessária para modernizar o transporte público, porém, tem-se que retirar de circulação os veículos antigos para uma real melhora na qualidade do serviço e redução das emissões.

O serviço de táxi em Belém, tem sido substituído pelos aplicativos de transporte, como Uber, devido a fatores como a economia e a facilidade de cobrança (SOARES, 2017). A transição para os aplicativos reflete uma mudança no comportamento dos usuários, que buscam alternativas mais convenientes, nem sempre mais

eficientes ou sustentáveis. Belém, como cidade portuária, também depende do transporte fluvial responsável por conectar áreas periféricas e ilhas, como Mosqueiro, ao centro da cidade, utilizado para a mobilidade de cidadãos. No entanto, a falta de regularidade nos serviços fluviais, a manutenção questionável das embarcações e terminais são desafios a serem superados para garantir a eficácia desse transporte (TOBIAS et al., 2024).

2.2. Infraestrutura e Investimentos em Mobilidade

Os 100 km de ciclofaixas em Belém têm qualidade e segurança criticadas devido à falta de manutenção e obstáculos nas calçadas (GOVERNO DO PARÁ, 2024). Atender à demanda por transporte e melhorar a qualidade de vida urbana requer investimento na cidade e, para o evento, tem-se projetos estratégicos como a construção de viadutos e a modernização das principais vias de circulação (AGÊNCIA PARÁ, 2024) somado aos R$ 4,7 bilhões do Governo Federal destinados às obras de infraestrutura urbana (GOVERNO FEDERAL, 2024). Os investimentos em mobilidade sustentável, o BRT Metropolitano e a substituição da frota veicular de ônibus, representam tentativas por uma mobilidade urbana mais sustentável (METRÓPOLES, 2024).

2.3. O Potencial do Transporte Fluvial para a Descarbonização

O transporte fluvial tem potencial para a descarbonização da matriz de transporte da cidade: a utilização de embarcações mais limpas (como as elétricas ou por biocombustíveis) podem reduzir as emissões do setor e promover uma maior integração entre os diferentes modais de transporte (TOBIAS et al., 2024). À exemplo do transporte fluvial eletrificado na Suécia, mostra ser possível adotar tecnologias mais sustentáveis em embarcações e obter em ganhos econômicos e ambientais. As características geográficas e a demanda das comunidades periféricas potencializam a exploração desse modal se acompanhada por investimentos em infraestrutura fluvial e eletrificação das embarcações visando a integração da mobilidade urbana.

3. O TRANSPORTE URBANO COMO VETOR DE DESCARBONALIZAÇÃO

3.1. Eletrificação da Frota: Ônibus Elétricos, Veículos Leves Elétricos e Incentivos à Aquisição de Carros Elétricos

A eletrificação da frota de transporte urbano é uma das principais alternativas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e para a mobilidade sustentável como os trólebus elétricos da cidade de Araraquara-SP (CINTRÃO, 2017). A popularização dos veículos elétricos no Brasil somada às tecnologias de infraestrutura tem promovido uma transição para sistemas mais sustentáveis. Em Belém, os 40 ônibus elétricos (e-Bus) serão operados no BRT Almirante Barroso, são fabricados no Brasil e possuem baterias recarregadas em quatro horas (MOBILIDADE ESTADÃO, 2025) sendo esta uma tentativa de atender a meta de 10% de ônibus elétricos até 2030 como previsto no Plano de Ação Climática de Belém (PLAC-Belém). É um passo inicial no processo de descarbonização da cidade e de melhoria da qualidade do transporte público na cidade (UM SÓ PLANETA, 2025).

3.2. Transporte Público Coletivo: Expansão e Modernização de Sistemas como o BRT

Com a finalização prevista do BRT Metropolitano em Belém para a COP30 haverá mais um sistema de transporte coletivo visando reduzir a dependência de veículos particulares, à exemplo de Bogotá (Colômbia) e Curitiba (Brasil), uma alternativa eficaz no combate à poluição urbana (REIS et al., 2013). Nos trechos operantes, o BRT de Belém apresenta problemas estruturais, abandono de estações, acúmulo de lixo e defeitos nos sensores das portas, o que afeta a segurança e o conforto dos passageiros. Apenas 15 ônibus articulados estão em operação, o que contribui para a superlotação e longos tempos de espera, sobretudo nos horários de pico (Portal Ônibus, 2024). A infraestrutura do BRT Metropolitano possui buracos e falhas, aumentando o risco de acidentes e a mobilidade (O Liberal, 2024a). A população está insatisfeita quanto à falta de integração com outros modais, à insegurança e à qualidade geral do serviço, o que compromete a aceitação e a eficiência do transporte público em Belém (O Liberal, 2024b).

3.3. Mobilidade Ativa e Micromobilidade: Investimento em Infraestrutura para Bicicletas e Pedestres

A mobilidade ativa (caminhada e bicicletas) é uma das formas mais sustentáveis de transporte e, não gera emissões de poluentes. A revitalização e ampliação das ciclofaixas, junto a programas de incentivo ao uso são fundamentais para tornar Belém mais sustentável. A micromobilidade (bicicletas e patinetes) se destacam para viagens curtas e integradas ao transporte público. O programa Bike Belém, descontinuado em 2020, pode ser revitalizado com novas políticas de gestão e manutenção da infraestrutura cicloviária (CRUZ, 2021). A micromobilidade pode reduzir a dependência de carros particulares em distâncias curtas se integrada com os

sistemas de transporte público de massa.

3.4. Planejamento Urbano Orientado ao Transporte (POT): Cidades Mais Compactas e Mistas

O POT tem o objetivo de criar cidades mais compactas e com acesso a serviços e funções urbanas sem depender de carros, pois prioriza o transporte público e a mobilidade ativa. A ideia é construir cidades mais eficientes, com melhor qualidade de vida, e menor impacto ambiental (ARCHDAILY, 2025). Desenvolver Belém sob a ótica do POT requer a integração dos diferentes modais de transporte e a criação de um sistema de mobilidade mais acessível e menos poluente, à exemplo dos corredores exclusivos para o transporte público, a ampliação de áreas de lazer e a revitalização de espaços urbanos.

3.5. Logística Urbana Sustentável

A redução das emissões de CO_2 na logística é um dos objetivos de descarbonização. A logística urbana sustentável envolve a otimização das rotas de transporte de cargas, o uso de veículos de carga elétricos ou de baixa emissão como os caminhões elétricos ou os movidos a biocombustíveis, uma tendência nas grandes cidades (MACÁRIO et al., 2006), parâmetros não previstos em Belém.

4. COMPROMISSOS ESPERADOS NA COP30 PARA O SETOR DE TRANSPORTES

A COP30 em Belém-PA é uma oportunidade para o Brasil e demais países reafirmarem compromissos concretos com a mitigação das mudanças climáticas, em especial no setor de transportes, um dos principais emissores de gases de efeito estufa. O intento é definir metas de redução de emissões (transporte público, mobilidade ativa e eletrificação da frota), fortalecer políticas públicas como o Plano de Ação Climática de Belém, definir marcos regulatórios, incentivar medidas como a criação de zonas de baixa emissão e a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes renováveis. À complementar, impulsionar mecanismos de financiamento internacional (Fundo Verde Climático), viabilizar projetos de transporte sustentável, ampliar a infraestrutura cicloviária e os sistemas de transporte coletivo. A cooperação internacional será essencial na transferência de tecnologias limpas. A inovação e a pesquisa ganharão centralidade no evento, com destaque para o desenvolvimento de biocombustíveis e a eletrificação de modais, incluindo embarcações, como alternativa viável para a Amazônia. A expectativa é que a COP30 consolide um ambiente de articulação global voltado à aceleração da transição energética e à construção de um sistema de mobilidade urbana mais justo, limpo e resiliente.

5. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O TRANSPORTE URBANO EM BELÉM – PA

Belém e outras cidades brasileiras enfrentam desafios de implementação de soluções de transporte sustentável quanto as limitações orçamentárias, a infraestrutura e integração entre os diferentes modais de transporte, e a ampliação da cobertura de transporte público para as áreas mais afastadas. O sistema de transporte coletivo de Belém é dependente dos ônibus e de sua superlotação e atrasos. A eletrificação da frota, embora seja uma solução promissora, requer altos investimentos em infraestrutura e tecnologia, um desafio à gestão pública (GOVERNO DO PARÁ, 2025).

O BRT Metropolitano, a adoção de veículos de carga elétrica, a otimização das rotas de transporte, a reativação do programa Bike Belém e a ampliação da infraestrutura cicloviária são medidas plausíveis direcionadas a uma mobilidade mais eficiente e menos poluente. A atuação conjunta entre esferas públicas, setor privado e sociedade civil é essencial para consolidar as transformações necessárias, sobretudo por meio de parcerias regionais e políticas integradas com outras cidades amazônicas. A COP30 pode servir como catalisadora dessas ações, proporcionando um ambiente favorável ao financiamento de projetos sustentáveis e à disseminação de boas práticas.

6. CONCLUSÃO

A transição para um sistema de transporte urbano mais sustentável em Belém-PA é um desafio e uma boa oportunidade. Cabe ao setor de transportes liderar a descarbonização da cidade bem como é necessário um esforço em conjunto entre governos, empresas e sociedade para alcançar as metas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Com a realização da COP30 e a transformação urbana provocada pelo evento, os projetos de mobilidade em execução poderiam introduzir mudanças substanciais, impulsionar a adoção de tecnologias limpas e a criar

políticas públicas voltadas a sustentabilidade. A eletrificação da frota de transporte público, a melhoria da infraestrutura cicloviária e a implementação de sistemas de transporte de massa eficientes são passos essenciais para a construção de uma cidade mais resiliente.

Contudo, o que se observa é um reforço do modelo rodoviarista priorizando o veículo particular com os seus 82,66% de investimentos em obras desta natureza, seguindo o padrão viário do Brasil. O modal aquaviário recebeu 0,30% destinados à construção de dois terminais turísticos e ampliação do Porto de Outeiro, total monetário não contemplando as travessias diárias entre as ilhas e o município. Até a correta operacionalização do BRT como o devido, o sistema de transporte coletivo seguirá pouco atraente a novos usuários, portanto, retardando a transferência modal na região metropolitana de Belém.

Além disso, a integração entre os diferentes modais de transporte e a promoção de soluções de mobilidade ativa são essenciais para transformar Belém em um modelo de cidade verde, contribuindo para a redução das emissões no Brasil e na região amazônica. O futuro do transporte urbano em Belém depende de decisões estratégicas tomadas hoje, com foco em inovação, sustentabilidade e a preservação do meio ambiente para as futuras gerações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA PARÁ. Em Belém, Estado investe em obras estratégicas para melhorar o tráfego e qualidade de vida de mais de 1,3 milhão de moradores. 2024. Disponível em: https://agenciapara.com.br/noticia/60475. Acesso em: 6 jul. 2025.

ARCHDAILY. O que é desenvolvimento urbano orientado ao transporte sustentável? 2020. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/953510. Acesso em: 6 jul. 2025.

BERNARDES, Flaviane Fernandes; FERREIRA, William Rodrigues. Logística urbana: análises e considerações acerca do transporte de cargas. 2013. Disponível em: https://www.geoamazonia.net/index.php/revista/index. Acesso em: 6 jul. 2025.

BRASIL DE FATO. A COP30 e a mobilidade em Belém: o que está em jogo? 2025. Disponível em: https://www.brasildefato.com.br/2025/05/15/a-cop30-e-a-mobilidade-em-belem-o-que-esta-em-jogo. Acesso em: 6 jul. 2025.

BELEM NEGÓCIOS. Obras do Terminal Hidroviário Internacional de Belém contribuem para hospedagem durante a COP. 2024. Disponível em: https://www.belemnegocios.com/post/obras-do-terminal-hidroviario-internacional-de-belem-contribuem-para-hospedagem-durante-a-cop. Acesso em: 6 jul. 2025.

BELEM NEGÓCIOS. R$ 600 bi para mobilidade urbana: Belém está entre as capitais que receberão investimentos. 2024. Disponível em: https://www.belemnegocios.com/post/r-600-bi-para-mobilidade-urbana-belem-esta-entre-as-capitais-que-receberao-investimentos. Acesso em: 6 jul. 2025.

CINTRÃO, Janaina Florinda Ferri et al. O sistema trólebus de Araraquara – SP: memória e história do transporte coletivo no período de 1959 a 1999. Revista Brasileira Multidisciplinar - ReBraM, Araraquara, v. 20, n. 1, supl., p. 19-34, 2017. Disponível em: https://www.revistabrasileirarebram.com. Acesso em: 4 jul. 2025.

CRUZ, Lynnie; OLIVEIRA, William. Micromobilidade em Belém: análise sobre o projeto de bicicletas compartilhadas "Bike Belém". 2021. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

DETRAN/PA. Dashboard da Frota. Disponível em: https://dashboard-frota.detran.pa.gov.br/. Acesso em: 6 jul. 2025.

ESTADÃO. Linha fluvial de Belém (PA) até ilha de Mosqueiro permanece sem liberação para funcionamento. 2024. Disponível em: https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/dia-a-dia/linha-fluvial-de-belem-pa-ate-ilha-de-mosqueiro-permanece-sem-liberacao-para-funcionamento. Acesso em: 6 jul. 2025.

G1 PARÁ. Navio que faz a travessia Belém-Mosqueiro volta a operar aos finais de semana. 2024. Disponível em: https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2024/07/18. Acesso em: 6 jul. 2025.

GOVERNO FEDERAL. Infraestrutura, mobilidade e emprego: os impactos positivos da COP30 em Belém. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/11/infraestrutura-mobilidade-e-emprego-os-impactos-positivos-da-cop30-em-belem. Acesso em: 6 jul. 2025.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Desafios da mobilidade urbana no Brasil. Brasília: Ipea, 2016. Disponível em: https://www.ipea.gov.br. Acesso em: 6 jul. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Technical Report, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch. Acesso em: 26 nov. 2023.

MACÁRIO, Rosário; CAIADO, Gonçalo. Logística urbana e plataformas de comunicação e informação. Aula ministrada. Mestrado em Transporte. Instituto Superior Técnico. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Acesso em: 21 abr. 2006.

METRÓPOLES. Belém ganha renovação inédita de frota de ônibus. 2024. Disponível em: https://www.metropoles.com/conteudo-especial/belem-ganha-renovacao-inedita-de-frota-de-onibus. Acesso em: 6 jul. 2025.

MÜLFARTH, Roberta Consentino Kronka; ALBALA, Paula Lelis Rabelo; SATO, André Eiji. Pandemia, mobilidade ativa e ambiente urbano: fragilidades, potencialidades das cidades e o renascimento da urbanidade. Oculum Ensaios, Campinas, v. 19, e225144, 2022. DOI: 10.24220/2318-0919v19e2022a5144. Disponível em: https://www.oculumensaios.com. Acesso em: 4 jul. 2025.

O LIBERAL. Obras do BRT Metropolitano seguem atrasadas. 2025. Disponível em: https://www.oliberal.com/belem/alvo-de-reclamacoes-obras-do-brtmetropolitano-seguem-atrasadas-1.796025. Acesso em: 6 jul. 2025.

O LIBERAL. População expõe transtornos ao utilizar BRT em Belém. 2025. Disponível em: https://www.oliberal.com/belem/populacao-expoe-transtornos-ao-utilizar-brt-em-belem-1.728392. Acesso em: 6 jul. 2025.

PORTAL ÔNIBUS. BRT de Belém convive com problemas estruturais e superlotação. 2024. Disponível em: https://portalunibus.com.br/2024/08/15/brt-de-belem-convive-com-problemas-estruturais-e-superlotacao. Acesso em: 6 jul. 2025.

REIS, João Gilberto Mendes dos et al. Bus Rapid Transit (BRT) como solução para o transporte público de passageiros na cidade de São Paulo. INOVAE - Journal of Engineering and Technology Innovation, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2013. Disponível em: https://www.inovaejournal.com. Acesso em: 4 jul. 2025.

SEMANA ACADÊMICA. Mobilidade ativa: uma possibilidade de mobilidade urbana. Revista Científica Semana Acadêmica, Fortaleza, v. 11, n. 229, p. 1-12, 2023. DOI: 10.35265/2236-6717-229-12392. Disponível em: https://semanaacademica.org.br. Acesso em: 4 jul. 2025.

SILVA, Maria João da; GOMES, Luís Henrique. Micromobilidade e sua aplicação nas cidades latino-americanas: análise crítica de sistemas de bicicletas compartilhadas. 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_3d1c15c35ee9c594b53dc59009bf8180. Acesso em: 6 jul. 2025.

SOARES, Lucélia Reis Santos. Planejamento urbano e gestão de transportes na Amazônia: as políticas públicas para a mobilidade urbana em face do processo de dispersão metropolitana em Belém-PA. Revista GeoAmazônia, Belém, v. 5, n. 10, p. 138–159, 2017. Disponível em: https://www.geoamazonia.net/index.php/revista/index. Acesso em: 6 jul. 2025.

TAGLIARI, Itamar Adriano; PAWLOWSKY, Urivald. A mobilidade ativa e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2030. Research, Society and Development, v. 10, n. 6, e47510616052, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i6.16052. Disponível em: https://www.rsdjournal.org. Acesso em: 4 jul. 2025.

TOBIAS, Maisa Sales Gama et al. BRT Rodofluvial em cidades da Amazônia: o caso de Belém - PA. Revista Foco, Curitiba, v. 17, n. 4, p. 1-18, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n4-112. Disponível em: https://revistafoco.com. Acesso em: 4 jul. 2025.

UM SÓ PLANETA. Promessas no papel: com COP30 à vista, Belém enfrenta desafios para modernizar frota de ônibus e reduzir emissões. 2025. Disponível em: https://umsoplaneta.globo.com/opiniao/colunas-e-blogs/direto-de-belem/noticia/2025/03/18. Acesso em: 6 jul. 2025.

VARGA, B. O.; ICLODEAN, C.; MARIASIU, F. Electric and hybrid buses for urban transport: energy efficiency strategies. Suíça: Springer, 2016.

BELÉM (Município). Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa de Belém/PA. Belém: Prefeitura Municipal de Belém; ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, 2023. 109 p. Disponível em: https://iclei.org/wp-content/uploads/2024/01/RELATORIO-IEGEE_-BELEM_V4_240110_180752.pdf. Acesso em: 7 jul. 2025.

Rafael Iatagan Souza Amaral (rafaeliatagan14@gmail.com)
Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01 - Bairro: Guamá. CEP: 66075. Belém, Pará, Brasil)
Felipe Gabriel Ferreira da Silva (fegabriel159@gmail.com)
Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01 - Bairro: Guamá. CEP: 66075. Belém, Pará, Brasil)
Christiane Lima Barbosa (cllima@ufpa.br)
Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Civil, Rua Augusto Corrêa, nº 01 - Bairro: Guamá. CEP: 66075. Belém, Pará, Brasil)

IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS VIÁVEIS PARA CONSTRUÇÃO DE PORTOS CAPAZES DE RECEBER E OPERAR NAVIOS PÓS PANAMAX

Adriane Pimenta[1], Daniele Laura Bridi Mallmann[2], Rodrigo Affonso Albuquerque Nóbrega[1], Martí Puig[3]
[1]Universidade Federal de Minas Gerais, [2]Universidade Federal de Pernambuco, [3]Universidade Politécnica da Catalunya

RESUMO
A atividade portuária nos últimos anos tem sofrido fortes pressões para sua adequação aos princípios do desenvolvimento sustentável e para adaptação de sua capacidade para receber navios cada vez maiores como os Pós Panamax e Capesize. Neste contexto, há a necessidade de portos mais modernos, adequados a esta nova realidade da navegação mundial. Esta nova realidade está fortemente ligada a canais de navegação mais profundos, áreas em terra para armazenamento, transporte e instalação de equipamentos para receber e armazenar imensos volumes de carga além da logística de transporte adequada para distribuição da carga e espaços em água para manobra destes navios. Deste modo, este estudo tem como objetivo indicar, ao longo da costa brasileira, quais as áreas apresentariam maior aptidão, do ponto de vista social e ambiental, para implantação de portos capazes de receber e operar navios pós Panamax, utilizando como ferramenta geoprocessamento e álgebra de mapas.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil vive um momento estratégico para a macrologística nacional promovido pelas métricas recordes de produção agrícola e os projetos de construção de ferrovias estruturantes. Contudo a eficiência logística poderá esbarrar na insuficiência portuária, sobretudo pela incompatibilidade de receber e operar navios de classes pós Panamax e superiores para grãos e containers. A importância dos portos para o comércio e o desenvolvimento econômico de um país é inegável. No Brasil, o setor portuário representa cerca de 95% da corrente de comércio exterior e movimentou 1,303 bilhões de toneladas em 2023 (ANTAQ, 2024).

Uma forma de economia de escala e reduzir o consumo de combustível por volume transportado é por meio da ampliação dos navios (navios Panamax e Capesize), os quais são mais econômicos, trazendo vantagem financeira para o exportador aumentando a competitividade. Como gastam menos combustível por tonelada transportada, também emitem menos gases causadores do efeito estufa. No entanto, requerem portos capazes de recebê-los, ainda raros no Brasil, onde o Terminal de Produtos Diversos (TPD) de Tubarão/ES é o único com estrutura de acostagem adequada para navios Capesize. O segundo tipo de navio em tamanho são os pós Panamax. No Brasil, as instalações portuárias capazes de receber estes navios são Barcarena, Itaqui, Cotegipe, Tubarão e Santos (Magalhães, 2021).

Embora os navios já alcancem a capacidade de transporte de 19000 TEU, poucos portos são capazes de receber navios com capacidade entre 8000 e 10000 TEU, limitação não exclusivamente brasileira (OCDE, 2011). Para atender navios com tais proporções, é necessário centenas de hectares de terra e de água, com infraestrutura para rodovias e ferrovias ou armazéns e áreas industriais, além de berços para acomodar grandes navios e terminais capazes de operar enormes quantidades de bens (Notteboom et al., 2022). Além de área para receber navios de maior porte, é necessário também profundidade compatível. Neste sentido, alguns portos apresentam vantagens naturais, enquanto outros necessitam de dragagens ou aterros.
Considerando essas condições, o objetivo geral deste estudo é identificar, ao longo da costa brasileira, quais áreas apresentam maior aptidão do ponto de vista físico, social, ambiental e logístico, para implantação de portos capazes de receber e operar navios pós Panamax, utilizando como ferramenta geoprocessamento e álgebra de mapas.

2. METODOLOGIA

Para a implantação de portos capazes de receber e operar navios pós Panamax, este estudo seguiu os critérios mínimos necessários conforme estabelecido por Notteboom et al., 2022: para atender navios com tais proporções, é necessário centenas de hectares de terra e de água, com infraestrutura para rodovias e ferrovias ou armazéns e áreas industriais, além de berços para acomodar grandes navios e terminais capazes de operar enormes quantidades de bens.

A partir desta premissa foram consideradas as seguintes camadas para a realização de álgebra de mapas, por ordem de importância estipulada para este estudo que tem como enfoque o viés ambiental. Todas as camadas

utilizadas na modelagem foram reprojetadas para SIRGAS 2000/Brasil Policônica EPSG:5880 com tamanho do pixel de 100X100 m, resolução adequada ao propósito.

2.1. Critérios e regras

- Profundidade mínima: A primeira exigência para a receber e operar navios pós Panamax é a profundidade compatível. Navios pós Panamax apresentam calado de 15 metros e esta foi a profundidade mínima para a modelagem. Para isto foram utilizadas as informações de profundidade mínimas em maré mais baixa. Esta será a camada mais importante e, portanto, com o maior peso para o desenvolvimento da modelagem.

- Disponibilidade de área em terra: Os conflitos entre portos e as cidades são amplamente documentados para os portos brasileiros e a segunda maior preocupação neste estudo foi buscar as áreas densamente urbanizadas como zonas de repulsão para a instalação de portos, esta foi a segunda camada com maior peso no desenvolvimento de álgebra de mapas.

Ainda, considerando a necessidade de extensas áreas em terra para a instalação de portos com capacidade de receber navios pós Panamax, a segunda área de repulsão para a instalação de portos foi a presença de unidades de conservação.
A camada de unidades de conservação foi dividida em duas categorias, a primeira considerada a mais restritiva as unidades de conservação de proteção integral e a segunda categoria menos restritiva a áreas de uso sustentável.

- Disponibilidade de área em água: Para manobrar navios de grandes proporções, são necessárias extensas áreas em água para garantir a navegação e manobras seguras, assim foram utilizadas as camadas de presença de ilhas, lajes, recifes e bancos de areia.

- Conectividade com infraestrutura de transporte terrestre: Para que o escoamento e a chegada de carga sejam eficientes é necessária uma infraestrutura de transporte robusta, portanto, foram consideradas as camadas de hidrovia, ferrovia e rodovia.

2.2. Tratamento e pesos

A Tabela 1 apresenta as camadas utilizadas no desenvolvimento da álgebra de mapas, a fonte da informação, o tratamento utilizado para trabalhar o dado a ser usado na álgebra de mapas e o peso de cada atributo. Os pesos foram aplicados a partir da ordem de importância de cada critério considerado neste estudo. Por exemplo: uma das limitações dos portos brasileiros para receber navios pós Panamax é a profundidade, então este foi considerado o principal critério. A segunda maior dificuldade é os conflitos porto cidade, então este foi considerado o segundo critério em ordem de importância, e assim, foi estabelecido os critérios sucessivamente.

Tabela 1: Fontes das camadas utilizadas no geoprocessamento

Camada	Fonte	Tratamento	Peso
• Profundidade	https://smcbrasil.ufsc.br/bases-de-dados/	Interpolação	10
• Área densamente edificadas	https://www.geoaplicada.com/dados/base-cartografica-continua/	Consideradas as distâncias dos portos planejados construídos a partir dos anos 70 visto que estes portos já estavam sendo construídos como alternativas aos portos já estrangulados pelas cidades.	5
• Unidades de conservação	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/9407d38f-84d2-48ea-97dd-ee152c493043	Cálculo de proximidade e reclassificação considerando o raio de 3 km da zona de amortecimento (Conama,2010) (Conama,2010). Menos de 3 km igual a 1 mais de 3 km igual a 10.	4

Camada	Fonte	Tratamento	Peso
• Ferrovias, • Hidrovias • Rodovias	https://www.geoaplicada.com/dados/base-cartografica-continua/	Cálculo de densidade. Quanto mais denso, mais atrativo.	1
• Banco de areia, • Ilhas, • Recifes, • Lajes	https://www.geoaplicada.com/dados/base-cartografica-continua/	Cálculo de proximidade e reclassificação de 1 a 10 sendo 1 menos apto e 10 mais apto	1
• Linha de costa	https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html	Utilizada para determinar a área de estudo foi realizado um buffer de 100 km em torno da linha de costa	-

3. RESULTADOS PRELIMINARES

A partir da linha de costa foi traçada uma segunda linha a 1 km de distância em direção ao oceano para demonstrar as áreas aptas para a construção de portos capazes de receber e operar navios pós Panamax. Nesta linha foram inseridos pontos a cada 5 km para indicar as áreas com maior e menor aptidão (
Figura **1**).



Figura 1: Exemplo da distribuição dos pontos ao longo da costa

A seguir o resultado geral do modelo ao longo da costa brasileira (Figura 2). Os pontos vermelhos correspondem às áreas de maior repulsão para instalação de portos para operar navios pós Panamax e os pontos azuis representam maior aptidão.



Figura 2: Vista do resultado geral para a costa brasileira

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem geoespacial utilizada neste estudo demonstrou que esta metodologia tem potencial para ser aplicada com esta finalidade. Porém, como este trabalho consistiu em uma primeira investigação exploratória desta metodologia, o refinamento e a busca por novas camadas para compor o modelo podem resultar em maior acurácia dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ. (2024). Estatístico aquaviário. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt. Acessado em 30/01/2025.

Magalhães, L. (2021). Como navios gigantes podem reduzir os custos e os impactos ambientais da exportação brasileira. Acessado em: https://umsoplaneta.globo.com/opiniao/colunas-e-blogs/o-mundo-que-queremos/post/2021/07/como-navios-gigantes-podem-reduzir-os-custos-e-os-impactos-ambientais-da-exportacao-brasileira.ghtml. Último acesso: 25/08/2022.

Notteboom, T.; Pallis, A. e Rodrigue, J.P. (2022). Port Economics, Management and Policy. New York: Routledge, 690 pages/218 illustrations. ISBN 9780367331559.

OECD. (2011). Environmental Impacts of International Shipping: The Role of Ports, OECD Publishing. http://dx.doi.org/10.1787/9789264097339-en.

Adriane Marques Pimenta (adrioceano@ufmg.br)
Rodrigo Affonso Albuquerque Nóbrega (raanobrega@ufmg.br)
Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, sala 3046, CEP: 31270-901 - Belo Horizonte, MG, Brasil
Daniele Laura Bridi Mallmann (danielemallmann@gmail.com)
Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, CEP: 50670-901 – Recife, Pernambuco, Brasil

