



Revista

PAVIMENTAÇÃO

Ano XIX - nº 54 - 2025 - www.abpv.org.br - www.revistapavimentacao.org.br - ISSN 1809-1865

**Impacto das condições
climáticas no trincamento
por fadiga simulado em
pavimentos asfálticos**

MAIS DE 65 ANOS
DE INOVAÇÃO



LÍDER MUNDIAL EM TECNOLOGIA DE COMPACTAÇÃO

ORIGEM E HISTÓRIA

A BOMAG — Bopparder Maschinenbau-Gesellschaft — foi fundada em 1957 em Boppard, Alemanha. Nesse mesmo ano, lançou o primeiro rolo compactador vibratório duplo com acionamento total do tambor. Em 1972, construiu um centro de P&D de classe mundial. Hoje, com subsidiárias em mais de 120 países e como parte do Grupo FAYAT, é a principal fabricante mundial de equipamentos para construção e compactação de estradas.

1957
O primeiro rolo vibratório duplo do mundo

1972
Centro de P&D líder mundial

2004
Integração no Grupo FAYAT

2025
Nova geração do BF 350 na Bauma

TRÊS PILARES, UM OBJETIVO

A BOMAG fabrica máquinas para compactação de solos, asfalto e resíduos. Estabilizadoras, recicladoras, fresadoras e extensoras completam uma gama que atende desde as pequenas obras e paisagismo até a construção de grandes rodovias, aeroportos, barragens e diques.

COMPACTADORES
ROLOS AUTOPROPELIDOS

O núcleo histórico da marca. Rolos autopropulsados, tandem, compactadores de pneus, placas e pisos que cobrem desde trabalhos de valas até as obras de terraplanagem mais exigentes, todos equipados com os mais avançados sistemas de assistência inteligente do mercado.



MÁQUINAS FRESAGEM A FRIO

O ION DUST SHIELD, que reduz em mais de 80% as emissões de micropartículas de poeira ao carregá-las eletricamente e convertê-las em pó grosso inofensivo.



VIBROACABADORAS

Uma gama de 5 a 21 toneladas com tecnologias como MAGMALIFE, QUICK COUPLING e ECOMODE, que economiza até 20% de energia e reduz o impacto ambiental sem sacrificar a potência.

TECNOLOGIAS EXCLUSIVAS

VARIOCONTROL

BOMAP

ECONOMIZER

TELEMATIC

ION DUST

ECOSTOP

ECOMODE

MAGMALIFE

QUICK COUPLING

SIDEVIEW

TERRAMETER

BLINDAGEM CONTRA POEIRA DE ÍONS

LÍDER EM CONTROLE INTELIGENTE

A BOMAG é reconhecida como a principal fabricante mundial de equipamentos e máquinas de compactação para construção de estradas, com subsidiárias e distribuidoras em mais de 120 países, apoiando projetos de desenvolvimento urbano, construção rodoviária e engenharia ambiental.



ABPv
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
PAVIMENTAÇÃO

SEDE

Rua Miguel Couto, nº 105,
Sobrelojas 4 e 5 - Centro
Rio de Janeiro - RJ
CEP: 20070-030
(21) 2233-2020

Site: www.abpv.org.br
E-mail: abpv@abpv.org.br

Redes sociais:

[Instagram@abpv_br](https://www.instagram.com/abpv_br)
[Facebook.ABPv1959](https://www.facebook.com/ABPv1959)
[Linkedin:
AssocBrasPavimentacao](https://www.linkedin.com/company/AssocBrasPavimentacao)

Conselho Editorial

Diretoria da ABPv

Editora-Chefe

Arqta. Georgina Libório
Azevedo Braga
georgina@abpv.org.br
MTb 31365-RJ

Editor Técnico

Lélio Antônio Teixeira Brito

Arte e Edição

Jornalista Ivan da Costa
Ivandac@gmail.com
MTb RH 10819

36ª DIRETORIA

Triênio 2023-2025

Diretora-Presidente

Engª. Luciana Nogueira Dantas

Diretor Vice-Presidente

Eng. Cássio Alberto Teoro do Carmo

Diretora Administrativa

Arqta. Georgina Libório Azevedo Braga

Diretor Financeiro

Eng. João Vicente Falabella Fabrício

Diretor Técnico

Eng. Lélio Antônio Teixeira Brito

Diretor de Divulgação

Eng. Rafael Lopes Martins

CONSELHO FISCAL

Sócio Coletivo

Maccaferri América Latina

Nouryon Ltda.

Sócio Individual

Eng. Cristiano Costa Moreira

Eng. Oswaldo Tuchumantel Júnior

COMITÊ TÉCNICO CIENTÍFICO

Adalberto Leandro Faxina
Aislan Buhler
Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio
Armando Morilha Junior
Ben-Hur Albuquerque Silva
Bruno Guimarães Delgado
Carla Therezinha Borjaille Alledi
Carlos Yukio Suzuki
Caroline Dias Amâncio Lima
Cassio Eduardo Lima de Paiva
Consuelo Alves da Frota
Cristiano da Costa Moreira
Djalma Martins Pereira
Douglas Fadul Villibor
Fabiano Pereira Cavalcante
Filipe Almeida Corrêa do Nascimento
Filipe Augusto Cinque de Proença Franco

Franciso Thiago Sacramento Aragão
Geraldo Luciano de Oliveira Marques
Glicério Trichês
Jefferson Lins da Silva
João Vicente Falabella Fabrício
João Virgílio Merighi
John Kennedy Guedes Rodrigues
Jorge Augusto Pereira Ceratti
José Carlos da Silva Filho
José Leomar Fernandes Júnior
José Tadeu Balbo
Laura Maria Goretti da Motta
Leni Figueiredo Mathias Leite
Liedi Légi Bariani Bernucci
Luciano Pivoto Specht
Luiz Miguel de Miranda
Magnus Baroni

Marcelo de Castro Takeda
Marcílio Augusto Neves
Maria da Conceição Monteiro Azevedo
Maria Esther Soares Marques
Mario Sergio de Souza Almeida
Natália de Souza Correa
Nilton de Souza Campelo
Paulo Roberto Borges
Prepredigna D. E. Almeida da Silva
Rita Moura Fortes
Rosângela dos Santos Motta
Rui José da Silva Nabais
Saul Birman
Silvio Rodrigues Filho
Taciano Oliveira da Silva
Valmir Bonfim
Walter Canales Sant'Ana



Revista
PAVIMENTAÇÃO



NOSSA CAPA

A imagem que ilustra a
capa desta edição é do
Fotógrafo Igor Alecsan-
der. Envie sua foto para
abpv@abpv.org.br

Sumário

**8 INFRAQUIZ 2025: CONHECIMENTO, INTEGRAÇÃO E ENERGIA NA
CELEBRAÇÃO DOS 50 ANOS DA RAPv**

**12 50ª RAPv / 27º ENACOR / 6ª ExpoEnacorRAPv:
DESTAQUE EM BELO HORIZONTE/MG**

**15 CARACTERIZAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE
REVESTIMENTOS DE PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE QUIXADÁ/CE**
Emanuely Pereira Souza
Glécia Rozane Silviera Vieira
Mariana de Araujo Leite

**29 IMPACTO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO TRINCAMENTO POR
FADIGA SIMULADO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Victória Nunuas-Ramos
Luciano Pivoto Specht
Cléber Faccin
Silvio Lisboa Schuster
Deividi da Silva Pareira
Henrique Otto Coelho
José Antônio Santana Echeverria
Luiz Guilherme Rodrigues de Mello

**41 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO COMPORTAMENTO DE
SHAKEDOWN DE SOLOS FINOS: SUBLASTROS FERROVIÁRIOS**

William Wilson dos Santos
Gleyciane Almeida Serra
Lisley Madeira Coelho
Sergio Neves Monteiro
Gabriel de Carvalho Nascimento
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

**53 SIMULAÇÃO LABORATORIAL DO ENVELHECIMENTO DE LIGANTE
ASFÁLTICO: ANÁLISE REOLÓGICA COMPARATIVA**

Osires de Medeiros Melo Neto
Albaniza Maria da Silva Lopes
Alysson Benicio Ferreira Diniz
Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

**63 ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS DA PISTA REVERSÍVEL
DA RODOVIA DF-095 NO DISTRITO FEDERAL**

Raphael Augusto Vasconcelos de Souza
Pastor Willy Gonzales Taco

É com imenso entusiasmo que a ABPv apresenta a 54ª edição da **Revista PAVIMENTAÇÃO**. Esta edição é especialmente significativa, pois os artigos selecionados têm origem em trabalhos submetidos à 50ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), realizada em Belo Horizonte/MG, evento que reafirma a vitalidade técnica da engenharia de pavimentação. A diretoria celebra a qualidade das contribuições e reforça a importância da revista como canal permanente de divulgação e valorização da pesquisa e da prática em pavimentação no Brasil.

**Lélio Antônio Teixeira Brito,
Georgina Libório Azevedo Braga,
Luciana Nogueira Dantas,
Cássio Alberto Teoro do Carmo,
João Vicente Falabella Fabrício e
Rafael Lopes Martins**



EVENTOS

1ª edição do InfraQuiz: Conhecimento, Integração e Energia na Celebração dos 50 anos da RAPv

Além dos debates de alto nível e das inovações apresentadas no Expominas, a edição de 2025 em Belo Horizonte foi palco do InfraQuiz. Muito mais do que uma competição acadêmica, o InfraQuiz é uma ferramenta fundamental de *networking* e integração geracional. A torcida animada e o entusiasmo das **8 equipes inscritas (UFPE, UFRGS, IFCE, FAMIG/ PUC MG, CEFET MG, UFRJ, UFRB/UEFS e UFRGS/CEFET MG)** evidenciaram a paixão da nova geração pela engenharia de infraestrutura, coroando o sucesso de um evento que investe no futuro profissional da juventude mantendo a solidez do conhecimento técnico.

Esta competição é destinada a alunos de graduação e pós-graduação e tem como objetivo promover o aprendizado, a interação e o incentivo na área de infraestrutura viária, por meio de um jogo de perguntas e respostas. As equipes, compostas por até 4 participantes, competem em rodadas eliminatórias, respondendo a perguntas técnicas e gerais relacionadas ao tema. O jogo utiliza um sistema com botões



(buzzers) para registrar qual jogador fez o acionamento primeiro e a equipe com maior pontuação avança até a final. A competição valoriza o trabalho em equipe, a rapidez no raciocínio e o conhecimento técnico.

Equipe vencedora: 1º lugar - UFRGS

Tutor: Lélío Antônio Teixeira Brito

Participantes: Katlin Modesto Dorneles, Carolina Jardim Garcia, Fernanda Vargas Ramires e Henrique Falck Grimm

2º lugar: FAMIG/ PUC MG

Tutora: Anna Luiza Braga Amaral

Participantes: Dayana Corrêa de Oliveira, Aline Rose Pinto Melo, Janaína Martins Lima e Lucas Cordeiro Silva Gontijo



3º lugar: UFRJ

Tutor: Francisco Thiago Sacramento Aragão

Participantes: Bruno Cavalcante Mota, Marco Antônio Marques do Nascimento, Emanuely Oliveira de Carvalho, Clara Rayssa Romero Rodrigues de Souza

Melhor Jogador: Henrique Falck Grimm

Patrocinadores - RAPv Enacor:

Diamante: Codemge, Governo do Estado de Minas Gerais, DNIT, Governo Federal, Mútua, Sinales, Sigla Sinalização, Strata Engenharia, Grupo Mais, DER-MG, SICEPOT MG, Verdetec, Sinasc

Platina: ARRB, Lisy Segurança Viária, Vimaster, Projel Engenharia Especializada, Pavidez Engenharia

Ouro: Softplan, Houer, Systra, Traçado, Dynatrust, Estratégica, Viaencosta, Flexmodular, Pottencial Seguradora, Engemap, SITRAN MG, Planep, Tamasa, LM Construtora, Lojas 360, Construtora Gaspar, Arteleste Construções

Prata: infraTest, Infraconsult, Renovaurb, Altanoroeste, Cava Infraestrutura, Grupo Eritran, Stratura, Greca Asfaltos, Pavesys, Sintram, ABCP, CNT/ SEST SENAT/ ITL FETCEMG, Kteli, Grupo GTO, Solocap, Kanaflex, DER-SP

Bronze: ACO, Betar, Huesker, Amanco Wavin, Disbral Asfalto, Allkaz, Roadrunner, Consol Engenheiros Consultores, Imtraff Group, Ecovias Norte Minas, MPX Engenharia, Via Brasília Segura, FGV IBRE, Solubloc, Emconbras, Dama Infra, Modera Engenharia, Minasfalto, Fiori, SHEMAPO, Nacional Participações, Construtora Luiz Costa

E contando com os Apoios Institucionais: Metalgalva, Instituto Pavimentar, Rodovias & Vias, Fremix, Unicall, Serpro, Governo Federal, Copasa e Governo de Minas Gerais



Mincursos online realizados pela ABPv em 2025

Análise Mecânica de Pavimentos Flexíveis – Lélío Brito e Thais Kleinert – 09/04/2025

Superpave: Caracterização de Materiais e Dosagem – Alexander Vivoni – 07/05/2025

Conceitos Geotécnicos Aplicados a Pavimentos – 3 Módulos – Esther Marques, Victor Hugo e Mayssa Alves – de 27 a 29/05/2025

Compactação de Solos – Ismael Corrêa – 26/06/2025

Reciclagem de Pavimentos Asfálticos – Valmir Bonfim – 15/07/2025

Microrrevestimento Asfáltico a Frio – Alexander Vivoni – 20/08/2025



O QUE A ABPv OFERECE AOS ASSOCIADOS



Entidade técnico-cultural sem fins lucrativos fundada em 1959 no Rio de Janeiro, a ABPv tem por missão promover a preservação, a manutenção, o aprimoramento cultural e o desenvolvimento da técnica de pavimentação no Brasil.

- Divulgação da cultura e técnica da pavimentação através do ensino (treinamentos e cursos), publicações periódicas, seminários, eventos e palestras.
- Promoção da melhoria do ensino da pavimentação.
- Promoção de ações, estudos, convênios técnicos-científicos e projetos para solução de problemas que dificultem o aperfeiçoamento das técnicas de pavimentação.
- Intercâmbio de conhecimentos entre técnicos e entidades nacionais e estrangeiras no que se refere às normas, pesquisas, projetos, convênios e literatura especializada.
- Apoio às organizações congêneres que tenham os mesmos objetivos que a ABPv.
- Realização de eventos periódicos para divulgação e discussão de trabalhos técnicos-científicos, workshops e minicursos.
- Estimulo à participação dos seus sócios nos trabalhos de pavimentação.
- Preservação do registro da memória da pavimentação do País.
- Realização de eventos periódicos para a divulgação e discussão de trabalhos técnicos-científicos.

Entre as atividades educacionais e atividades culturais da ABPv destacam-se, além dos cursos de capacitação profissional, dois grandes eventos de nível nacional: a RAPv – REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO; e a RPU – REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA. Realiza também a EXPOPAVIMENTAÇÃO, uma exposição de produtos e serviços da área de engenharia de pavimentação.

SUSTENTABILIDADE FAZ PARTE DA ATUAÇÃO DA FREMIX

Buscamos constantemente soluções que contribuam para a redução de impactos ambientais, incentivando o reaproveitamento de materiais, a reciclagem e práticas mais conscientes dentro das nossas operações.

Acreditamos que construir com responsabilidade também é pensar nos próximos passos, no futuro e no impacto que deixamos.



Nossos Serviços



Demolição e Britagem



Reciclagem de Pavimentos



Nivelamento de Tampões



Fresagem e Microfresagem



Pavimentação Asfáltica

Redução de impactos ambientais

Reaproveitamento de materiais e recursos

Compromisso com as pessoas e a sociedade

Excelência técnica com responsabilidade

✉ contato@fremix.com.br

📞 (11) 91968-5504

📞 (11) 4196-5533

🌐 fremix.com.br

FREMIX
30 ANOS

2025 – O JUBILEU DE OURO DA PAVIMENTAÇÃO - 50 REUNIÕES ANUAIS DE PAVIMENTAÇÃO - TECNOLOGIA E CONECTIVIDADE EM INFRAESTRUTURA

50ª RAPv / 27º ENACOR / 6ª ExpoEnacorRAPv: Destaque em Belo Horizonte/MG

O ano de 2025 se consolidou como um período de intensa atividade e progresso para o setor de pavimentação e infraestrutura de transportes no Brasil. A ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação) e a ABDER (Associação Brasileira dos Departamentos Estaduais de Estradas de Rodagem) promoveram mais um RAPv Enacor, evento crucial que superou a marca de 3.000 participantes e impulsionou o debate sobre as tendências, tecnologias e a sustentabilidade no segmento.

De 27 e 30 de outubro de 2025, a capital mineira, Belo Horizonte, foi palco da 50ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), do 27º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) e da 6ª ExpoEnacorRAPv. Com o apoio do DER/MG (Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais) e do Governo do Estado de Minas Gerais, o encontro, sediado no Expominas, manteve sua tradição como o principal fórum de discussões técnicas e de gestão em áreas vitais como pavimentação rodoviária, ferrovias, aeroportuária, projetos, gerência de pavimentos, logística e segurança viária.

A 6ª ExpoEnacorRAPv reafirmou-se como um espaço fundamental para a exposição de tecnologias de ponta, produtos inovadores e serviços que



impulsionam a modernização do setor. Profissionais, pesquisadores, estudantes e empresas tiveram a oportunidade de aprofundar conhecimentos, realizar *networking* e explorar soluções que visam maior eficiência e durabilidade nas obras de infraestrutura.

Durante o evento foi realizada uma ampla programação composta por palestras nacionais e internacionais, 5 minicursos, 3 mesas-redondas, 3 visitas técnicas, além de 190 trabalhos técnico-científicos e de estudos de caso de obras, oriundos de diversos estados brasileiros e de renomadas instituições de ensino e pesquisa do país.



A Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) celebrou as 50 edições da Reunião Anual de Pavimentação (RAPv).

No Centro de Convenções, cada diretor contou sua história de dedicação e amor a essa grande instituição numa cerimônia descontraída e de muita emoção. A Reunião reflete o compromisso contínuo com a engenharia de pavimentação e a infraestrutura de transportes do Brasil, sendo um fórum de debates sobre as principais evoluções, tendências, inovações técnicas e políticas de segurança, organização e gestão em áreas cruciais como rodovias, ferrovias, aeroportos, gerência de pavimentos, logística e segurança viária. Tendo tido como seu presidente e fundador o Engº Jacques de MEDINA.

O evento também contou com uma festa de confraternização no Palácio das Mangabeiras onde foi servido um delicioso jantar ao som do show “Flausino e Sideral cantam Cazuza”.





A Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv) celebrou as 50 edições da Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) com uma comemoração no Centro de Convenções onde cada diretor contou sua história de dedicação e amor a essa grande instituição

O prestigiado Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom reconheceu, nesta edição histórica de 50 anos da Reunião Anual de Pavimentação, a valiosa contribuição de diversos profissionais para o avanço da engenharia:

- Eng. Anderson das Neves Nascimento
- Eng. Geraldo Luciano de Oliveira Marques
- Eng. Lélío Antônio Teixeira Brito
- Eng. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello
- Eng. Luiz Henrique Teixeira
- Eng. Marcílio Augusto Neves

Nossa próxima Reunião acontecerá em Goiânia capital de Goiás em conjunto com a ENACOR e a GOinfra, aguardaremos todos lá entre os dias 22 e 26 de junho de 2026.



Que as 50 edições da RAPv inspirem o futuro da infraestrutura de transportes do Brasil!

Homenageados com o Prêmio Engenheiro Mario Kabalem Restom



CARACTERIZAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE REVESTIMENTOS DE PAVIMENTAÇÃO NA CIDADE DE QUIXADÁ/CE

CHARACTERIZATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF PAVEMENT COATINGS IN THE CITY OF QUIXADÁ/CE

Emanuely Pereira Sousa¹
Glécia Rozane Silveira Vieira²
Mariana de Araújo Leite³

¹ IFCE - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (Campus Quixadá), Quixadá/CE, emanuely.pereira.sousa60aluno@ifce.edu.br; mariana.leite@ifce.edu.br.
² ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, Regional Nordeste, gleciavieira@abcp.org.br.
³ IFCE - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (Campus Quixadá), Quixadá/CE, mariana.leite@ifce.edu.br.

DOI: 10.21526/abpv.v54.1

RESUMO

O aumento das temperaturas urbanas e a intensificação das ilhas de calor têm impulsionado estudos sobre o comportamento térmico de superfícies pavimentadas, sobretudo em regiões de clima quente e seco. Em Quixadá, município do sertão central cearense, as altas temperaturas e a diversidade de revestimentos viários suscitam questionamentos sobre a eficiência térmica de cada tipo de pavimento. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar a temperatura superficial de pavimentos asfálticos e intertravados em diferentes vias da cidade, analisando a influência dos materiais e das condições do entorno na retenção de calor. A pesquisa foi conduzida por meio de medições em campo, utilizando termômetro infravermelho em 15 pontos ao longo das vias analisadas, com registros realizados em três horários distintos ao longo do dia, durante o mês de setembro de 2024. Os resultados indicaram que os pavimentos asfálticos apresentaram as maiores temperaturas, chegando a 62 °C ao meio-dia, enquanto os intertravados atingiram 54 °C, com diferenças de até 8 °C em um mesmo dia. Essa variação foi associada à coloração dos blocos e à presença de sombreamento arbóreo. Além disso, observou-se que vias largas e arborizadas apresentaram maior eficiência no resfriamento ao final do dia. Conclui-se, pela caracterização realizada, que o desempenho térmico não depende unicamente do tipo de revestimento, mas da interação entre material, tonalidade e características ambientais. Os dados obtidos nessa pesquisa oferecem subsídios para políticas públicas de mitigação das ilhas de calor e apontam possibilidades para estudos futuros sobre variações sazonais e estratégias passivas de conforto térmico urbano.

Palavras-chave: temperatura superficial; pavimento asfáltico; blocos de concreto intertravados; ilhas de calor urbanas.

ABSTRACT

The rise in urban temperatures and the intensification of heat islands have driven studies on the thermal behavior of paved surfaces, especially in hot and dry climates. In Quixadá, a city located in the semi-arid region of Ceará, Brazil, high temperatures combined with the diversity of road surface types raise questions about the thermal efficiency of different pavements. This study aimed to characterize the surface temperature of asphalt and concrete block pavements on various streets in the city, analyzing the influence of materials and surrounding conditions on heat retention. The research was conducted through field measurements using an infrared thermometer at 15 points along the analyzed roads, with data collected at three different times of the day during September 2024. The results showed that asphalt pavements exhibited the highest temperatures, reaching up to 62 °C at noon, while interlocking concrete pavements reached 54 °C, with differences of up to 8 °C on the same day. This variation was associated with block color and the presence of tree shading. Additionally, wide and tree-lined streets demonstrated greater cooling efficiency by the end of the day. The study concludes that thermal performance does not depend solely on the pavement type but rather on the interaction between material, color, and environmental characteristics. The data obtained in this research provide valuable input for public policies aimed at mitigating urban heat islands and offer insights for future studies on seasonal variations and passive strategies for improving urban thermal comfort.

Keywords: surface temperature; asphalt pavement; interlocking concrete blocks; urban heat islands.

INTRODUÇÃO

Os pavimentos urbanos são estruturas compostas por camadas de materiais com diferentes funções, projetadas para oferecer suporte ao tráfego, conforto aos usuários e durabilidade frente às condições ambientais, geométricas e operacionais das vias (BERNUCCI *et al.*, 2022). No entanto, além das solicitações mecânicas, o desempenho desses revestimentos também é fortemente influenciado por fatores climáticos, como variações de temperatura e umidade (MEDINA; MOTTA, 2015). Conforme destaca a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017), o clima está entre os principais agentes de degradação dos materiais de pavimentação, interferindo diretamente em sua durabilidade e no comportamento estrutural ao longo do tempo.

A transferência de calor nas superfícies pavimentadas modifica propriedades térmicas e mecânicas dos revestimentos e contribui significativamente para a intensificação das ilhas de calor urbanas (ANAND; SAILOR, 2022). Esse fenômeno, amplamente estudado no contexto urbano, resulta do acúmulo de calor absorvido por superfícies impermeáveis e escuras, que o reemitem lentamente ao longo da noite, elevando as temperaturas em áreas densamente urbanizadas (GARTLAND, 2010). As características físico-químicas dos materiais, como cor, rugosidade, albedo e condutividade térmica, e as condições do entorno, como sombreamento e ventilação, exercem papel fundamental na dinâmica térmica local (BARBIRATO; SOUZA; TORRES, 2007; LOMBARDO, 1985).

Em regiões de clima quente e semiárido, como o município de Quixadá/CE, essas questões ganham ainda mais relevância. Com elevadas temperaturas ao longo de boa parte do ano, os pavimentos não apenas sofrem intensamente com as variações térmicas diurnas, mas também atuam como agentes amplificadores da sensação térmica nas áreas urbanas. Embora as diferenças térmicas entre tipos de revestimento, como o Pavimento Asfáltico (PA) e o Pavimento Intertravado (PI), sejam mencionadas em estudos pontuais (CELIS *et al.*, 2021; PEIXOTO *et al.*, 2023), ainda são escassas as pesquisas locais que quantifiquem essas variações sob condições reais de uso, especialmente em cidades de pequeno e médio porte inseridas no semiárido nordestino.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a temperatura superficial de pavimentos asfálticos e intertravados em vias urbanas da cidade de Quixadá/CE, investigando como diferentes materiais e condições ambientais influenciam na retenção e dissipação de calor ao longo do dia. A contribuição da pesquisa está em fornecer dados sobre o comportamento térmico de revestimentos viários locais, oferecendo subsídios para tomadas de decisão mais sustentáveis no planejamento urbano. Além disso, os resultados podem auxiliar na proposição de estratégias passivas de mitigação das ilhas de calor, como a escolha adequada de materiais e o incentivo à arborização urbana, aspectos fundamentais para cidades inseridas em contextos de vulnerabilidade climática.

METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida a partir de uma abordagem qualitativa e quantitativa, com ênfase na análise descritiva e comparativa do comportamento térmico de pavimentos urbanos. Para isso, o método adotado contemplou quatro procedimentos principais, descritos a seguir.

Etapas 1: Caracterização climática da cidade de Quixadá/CE

Inicialmente, foi realizada a caracterização do clima local com base em dados secundários de órgãos oficiais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCME) e plataformas meteorológicas digitais, como o *Weather Spark* (2024). Essas informações permitiram identificar o período mais apropriado para a coleta de dados térmicos, priorizando meses com baixa ocorrência de chuvas, elevada incidência solar e menor variação térmica, características típicas do clima semiárido da região.

Quixadá está situada no sertão central do estado do Ceará e apresenta clima tropical quente semiárido, com predomínio de dias ensolarados e baixa umidade relativa do ar. Conforme os dados analisados, as temperaturas mais elevadas ocorrem entre os meses de setembro e dezembro, período caracterizado por forte radiação solar e condições atmosféricas mais secas. Para este estudo, optou-se

pelo mês de setembro para realização das medições térmicas, uma vez que representa o início do ciclo mais quente do ano, com temperaturas máximas médias superiores a 35 °C e mínimas que variam pouco ao longo dos meses.

A Figura 1 ilustra as médias das temperaturas

máximas e mínimas ao longo do ano na cidade, evidenciando a baixa amplitude térmica sazonal. Essa relativa estabilidade nas médias do ar permite estimar com maior clareza os efeitos de superfície, como material, cor e sombreamento, sobre a temperatura dos pavimentos.

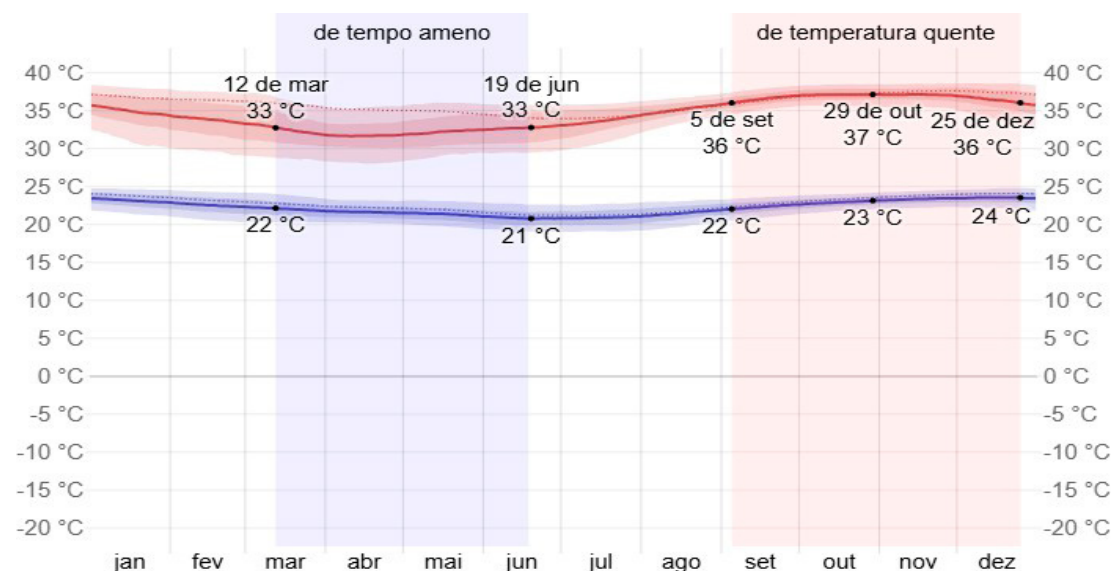


Figura 1. Temperaturas máximas e mínimas médias de Quixadá - CE (Weather Spark, 2024)

Etapas 2: Delimitação da área de estudo e identificação das vias a serem analisadas

A área de estudo foi definida em trechos urbanos centrais da cidade de Quixadá/CE, contemplando vias com diferentes características de revestimento, exposição solar e conservação. As ruas analisadas incluem: Rua Rodrigues Júnior, Rua Pascoal Crispino, Rua Laerte Pinto, Avenida Plácido Castelo, Rua Basílio Emiliano Pinto e Avenida José de Freitas Queiroz. A seleção dessas vias levou em considera-

ção seu fluxo de veículos e pedestres, a diversidade de tipos de revestimentos no pavimento (blocos de concreto intertravados e asfalto) e a exposição às condições climáticas locais. A Figura 2 apresenta registros fotográficos de alguns dos trechos analisados, evidenciando visualmente a diferença entre os tipos de revestimento, coloração superficial e entorno imediato de cada segmento avaliado. Os demais registros dos trechos analisados encontram-se detalhados no trabalho de Sousa (2025).



Figura 2. Trechos de ruas analisadas (Autor, 2025)

Após visita técnica *in loco*, foram definidos 15 pontos de coleta ao longo de aproximadamente 5 km de vias urbanas, com base em coordenadas georreferenciadas. Os pontos foram posicionados preferencialmente próximos ao centro da pista de rolamento (todas pistas simples), com o intuito de selecionar valores representativos. Os revestimentos avaliados apresentavam variações tanto no tipo de material quanto no estado de conservação, sendo identificados trechos recém-pavimentados (em 2024) e outros com sinais de desgaste por ausência de manutenção. A distribuição dos pontos seguiu a seguinte organização:

1. No entorno da Praça José de Barros, foram posicionados quatro pontos (P1 a P4), cada um em uma das ruas que circundam a praça. Sendo que P1 e P4 correspondem a trechos com pavimento asfáltico, enquanto P2 e P3 estão situados em vias com pavimento intertravado;
2. Na Rua Basílio Emiliano Pinto, pavimento intertravado, foram posicionados três pontos (P5 a P7), distribuídos com intervalos de

aproximadamente 100 metros entre si, ao longo de um trecho com cerca de 220 metros de extensão. Um ponto adicional (P8) foi alocado na transição para o pavimento asfáltico. Nesse trecho asfaltado, com aproximadamente 720 metros, foram incluídos dois pontos adicionais (P9 e P10), separados por cerca de 450 metros;

3. Na Avenida José de Freitas Queiroz, com 2,8 km de extensão em pavimento asfáltico, três pontos (P11 a P13) foram distribuídos em intervalos médios de 1,2 km, considerando a presença ou ausência de sombreamento;
4. Por fim, em outro trecho da Avenida José de Freitas Queiroz com blocos intertravados, dois pontos (P14 e P15) foram definidos com base em aspectos locais como presença de vegetação e proximidade de áreas arborizadas.

A Figura 3 apresenta o mapeamento geoespacial dos pontos de medição, com a distinção dos diferentes tipos de pavimento, colorações predomi-

nantes e detalhamento das aproximações urbanas analisadas.

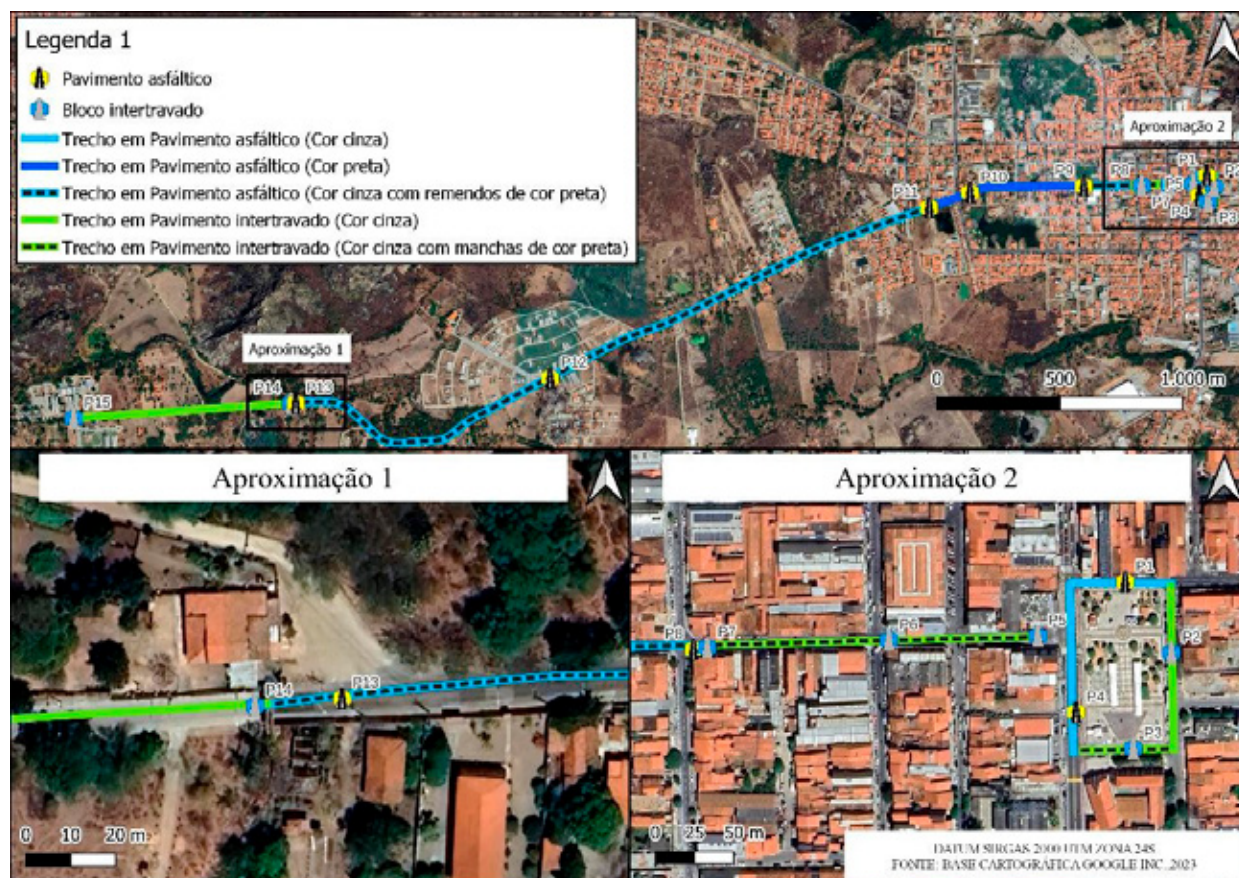


Figura 3. Localização dos pontos de coleta ao longo do trecho (Autor, 2025)

Etapa 3: Coleta de dados *in loco* e registro da temperatura superficial

A terceira etapa do estudo consistiu na aferição direta das temperaturas superficiais dos pavimentos, realizada no período de 21 a 25 de setembro de 2024, abrangendo cinco dias consecutivos de coleta. A escolha desse intervalo foi fundamentada nas características climáticas do município de Quixadá/CE, correspondendo ao fim da quadra chuvosa e ao início do período seco e quente, condição ideal para observação do comportamento térmico dos revestimentos sob máxima exposição solar. Essa definição foi respaldada por séries históricas de 30 anos disponíveis na plataforma ClimaTempo (2025), as quais indicam baixa interferência pluviométrica nesse período do ano.

As medições foram realizadas com o auxílio de um termômetro infravermelho portátil, com leitura instantânea e sem contato. O equipamento

foi posicionado a uma distância média de 5 cm da superfície, seguindo as orientações do fabricante, garantindo a padronização do procedimento e minimizando a interferência de variáveis externas. As aferições ocorreram em três horários distintos ao longo do dia: início da manhã, meio-dia (momento de maior incidência solar) e final da tarde (fase de resfriamento superficial).

Em cada um dos 15 pontos de medição, as temperaturas foram coletadas de forma sequencial (P1 a P15), realizando-se três leituras consecutivas por ponto em cada horário. Para análise, foi considerada a média aritmética dos valores obtidos. Complementarmente, as temperaturas do ar foram registradas por meio de consulta à plataforma ClimaTempo, possibilitando a comparação entre as condições atmosféricas e os valores registrados nas superfícies pavimentadas.

Após a coleta, os dados foram organizados em

planilhas eletrônicas, tabulados e analisados por meio de gráficos comparativos e tabelas-resumo, de modo a evidenciar as variações térmicas em função do tipo de revestimento, horário do dia e presença de sombreamento nos trechos analisados.

Etapa 4: Análise crítica e comparativa dos dados coletados

Os dados coletados foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados com base em três critérios principais: tipo de revestimento, horário da medição e condições do entorno (como presença de sombreamento e coloração da superfície). As médias das temperaturas em cada ponto e horário foram calculadas e comparadas entre si, permitindo identificar padrões de aquecimento ao longo do dia e avaliar a influência dos diferentes materiais e características urbanas. A temperatura do ar foi utilizada como referência para estimar a elevação térmica causada pelos pavimentos. A análise buscou interpretar os resultados de forma crítica, relacionando-os com fatores como conservação do re-

vestimento, vegetação e eficiência no resfriamento superficial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos ao longo dos cinco dias de medição evidenciam uma variação de até 15% entre os dois tipos de revestimento, com o Pavimento Asfáltico (PA) apresentando as maiores temperaturas superficiais registradas em todos os horários avaliados. Em relação à temperatura do ar, que se manteve próxima a 33 °C, os pavimentos asfálticos apresentaram uma elevação de até 88%, evidenciando que fatores como tipo de material, coloração da superfície e condições do entorno exercem influência térmica tão expressiva quanto a própria temperatura atmosférica. A Figura 4 apresenta o comportamento térmico dos pavimentos ao longo do dia, considerando os horários de medição. As curvas foram ajustadas com base nas médias coletadas nos três períodos, permitindo visualizar a tendência de aquecimento e resfriamento dos materiais analisados.

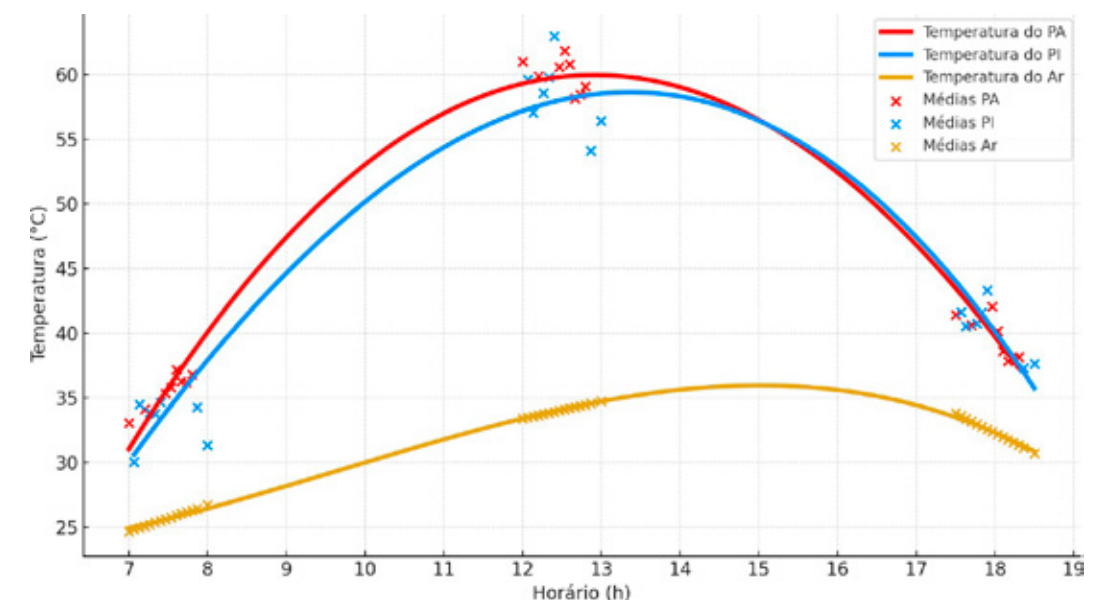


Figura 4. Comparativo entre comportamento das temperaturas ao longo do dia (Autor, 2025)

A Figura 5 complementa essa análise ao detalhar as linhas de tendência das temperaturas registradas especificamente no primeiro período de medição (07h00 às 08h00). Optou-se por apresentar este intervalo como exemplo representativo,

uma vez que os demais períodos demonstraram comportamento térmico coerente com as tendências gerais observadas na Figura 4.

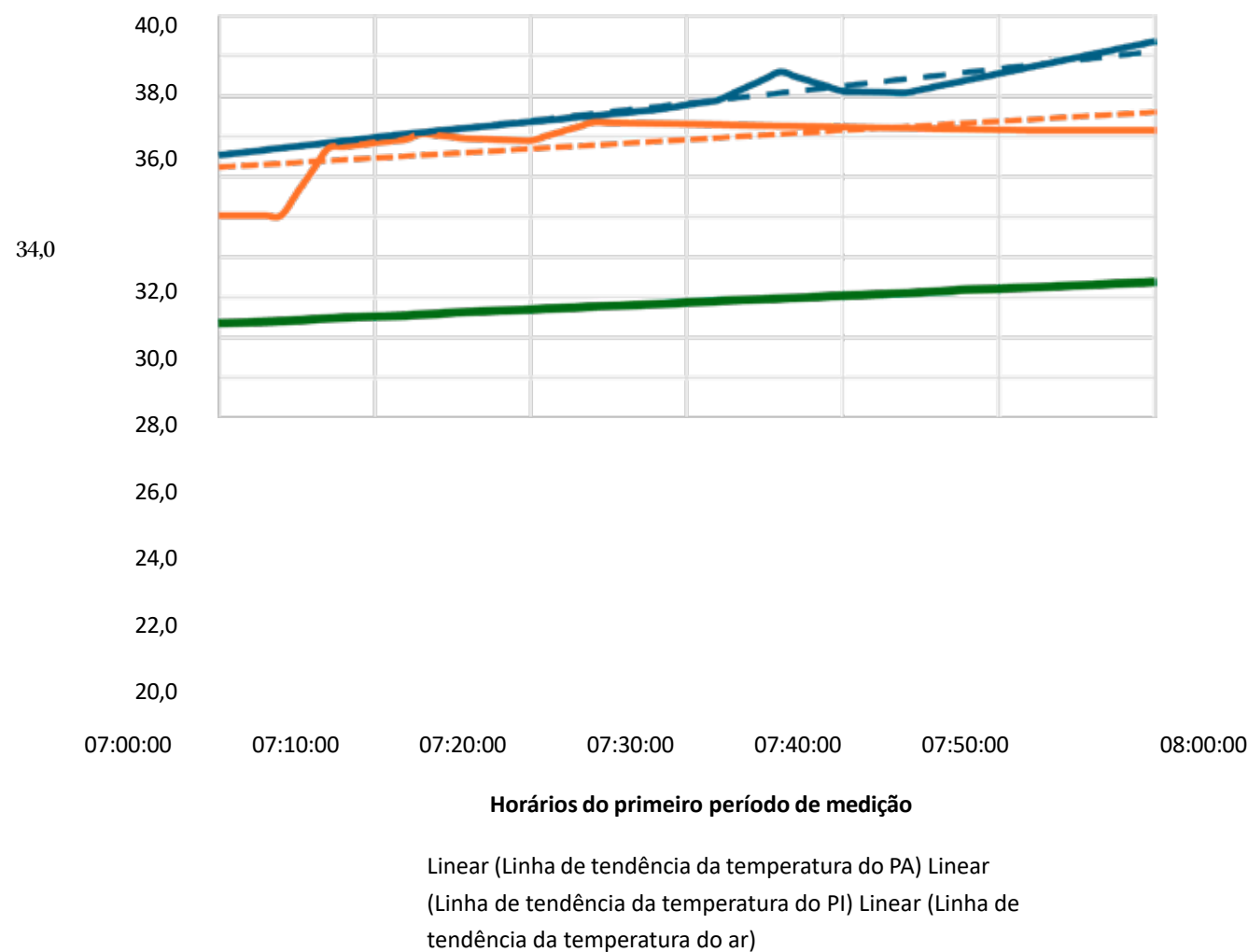


Figura 5. Linhas de tendência das temperaturas no primeiro período de medição (Autor, 2025)

Observa-se um padrão de aquecimento semelhante para ambos os materiais, com o pavimento asfáltico (PA) atingindo valores superiores em todo o intervalo analisado. Esse comportamento reforça que fatores como tipo de material, coloração da superfície e condições de entorno exercem influência térmica mais expressiva do que a própria temperatura atmosférica isolada.

O gráfico permite visualizar com clareza a dinâmica de ganho e perda de calor dos dois tipos de revestimento. Tanto o PA quanto o pavimento intertravado (PI) apresentam elevação acentuada da temperatura até o início da tarde, seguida por um processo de resfriamento. Contudo, destaca-se que, apesar das temperaturas do PI serem inferiores ao longo de grande parte do dia, após as 15h ocorre uma aproximação dos valores em relação ao PA. Esse comportamento pode estar associado à maior

inércia térmica do concreto, que faz com que o resfriamento ocorra de forma mais lenta em comparação ao asfalto.

De forma geral, o gráfico evidencia tendências consistentes, mas também reforça a necessidade de ampliação da base de dados para representar com maior robustez essa dinâmica térmica. Com o volume de dados disponível, foi possível realizar uma caracterização preliminar adequada, ainda que com limitações inerentes ao tamanho da amostra.

Durante o período de maior radiação solar (meio-dia), o PA chegou a atingir 62 °C, enquanto o Pavimento Intertravado (PI) apresentou temperaturas máximas de 54 °C em locais com arborização. Esse comportamento está em consonância com os dados apresentados pela *American Concrete Pavement Association* (ACPA, 2009), que apontam diferenças térmicas médias em torno de

14 °C entre superfícies de concreto e pavimento asfáltico, dependendo das condições de coloração, sombreamento e contexto urbano.

Em grande parte dos pontos, o PI apresentou aquecimento mais lento e temperaturas inferiores ao asfalto, especialmente nas primeiras horas da manhã e no final da tarde. No entanto, em alguns trechos específicos, como no Ponto 7 (P7), as temperaturas registradas no PI se aproximaram das do PA. Essa elevação pode ser explicada por dois fatores principais: a coloração escura do revestimento in-

tertravado, que reduz sua refletância, e a proximidade de um segmento asfáltico com indícios de escorregamento de material betuminoso, o que pode ter alterado as propriedades térmicas do entorno. A comparação entre blocos claros e escurecidos é apresentada na Figura 6. Além da coloração escura dos blocos intertravados, no ponto P7 observou-se também a presença de resíduos betuminosos provenientes do pavimento asfáltico adjacente, como ilustrado na Figura 7.



(a) PI de coloração mais clara (b) PI de coloração mais escura
Figura 6. Comparativo de cor entre dois trechos em pavimentos intertravados (Autor, 2025)



Figura 7. Trecho do Ponto de coleta 7 (P7) (Autor, 2025)

Esse acúmulo, possivelmente decorrente de falhas na execução ou de escorregamento de material asfáltico, recobriu parte da superfície do PI, reduzindo sua refletância e favorecendo a absorção de radiação solar. Além disso, por estar localizado nas imediações de uma faixa de pedestres e de um semáforo, o trecho é constantemente ocupado por veículos em desaceleração ou parada, o que intensifica o aquecimento local devido à emissão térmica dos motores e ao calor irradiado pelas carrocerias. A permanência dos veículos também contribui para o acúmulo de resíduos como óleo, borracha e poeira, poluentes que, segundo Nasarudin e Shafri (2011), alteram as propriedades espectrais da superfície, reduzindo sua capacidade de refletir calor. Dessa forma, esses fatores combinados

ajudam a explicar por que, neste ponto específico, o pavimento intertravado apresentou comportamento térmico semelhante ao do asfáltico, em contraste com os demais pontos onde o PI se mostrou mais eficiente no controle da temperatura.

Nos trechos P11, P12 e P13, identificou-se uma diferença de até 3 °C entre pavimentos asfálticos com diferentes estados de conservação. Os trechos mais antigos, visivelmente desgastados, apresentaram temperaturas superficiais mais baixas em comparação aos pavimentos recém-executados. Essa diferença pode ser atribuída à coloração mais clara dos revestimentos envelhecidos, consequência natural da oxidação e do desgaste superficial ao longo do tempo, como é mostrado na Figura 8.



(a) revestimento envelhecido com coloração clara (b) revestimento novo com coloração escura

Figura 8. Aspecto superficial dos pavimentos asfálticos (Autor, 2025)

O pavimento envelhecido, mostrado na Figura 8(a), apresenta superfície com coloração acinzentada, textura irregular e presença de partículas expostas, sinais típicos de degradação por intempéries e falta de manutenção. Por outro lado, o revestimento mais recente, ilustrado na Figura 8(b), possui aspecto escuro, contínuo e uniforme, refletindo menor tempo de exposição e maior absorção de radiação solar.

Esse comportamento está alinhado ao que afirmam Durán, Prado e Filho (2013), que destacam que o envelhecimento do pavimento tende a aumentar sua refletância, favorecendo o controle térmico superficial. Assim, além do tipo de material, o grau de envelhecimento do revestimento é um fator determinante para a elevação ou redução da temperatura ao longo do dia.

No período da tarde (após as 17h), identificou-se um resfriamento superficial mais lento nos pontos urbanos mais densos (P1 a P10), enquanto os pontos a partir de P11 apresentaram maior dissipação térmica, possivelmente favorecida pela presença de áreas abertas e ventiladas. Além disso, nos trechos com maior cobertura vegetal, as temperaturas se mantiveram consistentemente mais amenas, com médias entre 38 °C e 40 °C, demonstrando a eficácia do sombreamento natural no controle térmico das superfícies pavimentadas.

Mapas térmicos dos trechos analisados

Para complementar a caracterização e a análise comparativa entre os tipos de pavimento, e favorecer a compreensão da distribuição espacial da tem-

peratura superficial ao longo dos diferentes horários do dia, foram elaborados mapas térmicos com base nos dados registrados nos pontos de coleta. A Figura 9 reúne esses mapas, os quais representam, respectivamente, as temperaturas medidas

no início da manhã (Figura 9(a)), no horário de pico solar (Figura 9(b)) e no final da tarde (Figura 9(c)), evidenciando as variações térmicas ao longo dos trechos estudados.



(a) trechos do 1 ao 11 no Período 1 (início da manhã)



(c) trechos do 1 ao 11 no Período 2 (meio-dia)



(e) trechos do 1 ao 11 no Período 3 (final da tarde)



(a) trechos do 12 ao 15 no Período 1 (início da manhã)



(d) trechos do 12 ao 15 no Período 2 (meio-dia)



(f) trechos do 12 ao 15 no Período 3 (final da tarde)

Figura 9. Mapa térmico dos pavimentos analisados (Autor, 2025)

Validação dos dados com equação consolidada na literatura

Para verificar a consistência dos dados coletados em campo, foi realizada uma validação utilizando a equação proposta pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP, 1994), desenvolvida para estimar a temperatura superficial de pavimentos asfálticos. Essa equação (Equação 1) considera a latitude como variável principal e foi calibrada com base em valores médios de condições climáticas, incluindo absorção solar, transmissão de calor pelo ar, radiação atmosférica e velocidade do vento.

$$T_{\text{sup}} - T_{\text{ar}} = -0,00618 \cdot \text{lat}^2 + 0,2289 \cdot \text{lat} + 24,4 \quad (1)$$

Com base na latitude de Quixadá/CE (aproximadamente 4,96°S) e na média da temperatura do ar no horário de pico (35 °C), foi estimada uma temperatura superficial média de 58,1 °C para os pavimentos asfálticos. Os dados aferidos em campo demonstraram boa compatibilidade com esse valor, apresentando, na média, uma diferença inferior a 2 °C, o que reforça a confiabilidade das medições realizadas.

Em alguns dias, os valores registrados superaram a estimativa, o que pode estar relacionado a variações microclimáticas locais, como sombreamento, tráfego intenso ou acúmulo de resíduos escuros sobre a superfície. Esse comportamento destaca a importância de considerar adaptações regionais nos modelos de predição térmica.

Ressalta-se, ainda, que não foram encontradas equações específicas na literatura técnica para estimar a temperatura superficial de pavimentos intertravados. Apesar de existirem modelos conceituados para revestimentos asfálticos, os blocos de concreto apresentam particularidades térmicas associadas à sua geometria, coloração e sistema modular, o que limita a aplicação direta dessas equações. Dessa forma, a validação neste estudo restringiu-se ao pavimento asfáltico.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo permitem afirmar que a temperatura superficial dos pavimentos urbanos não é determinada apenas

pelo tipo de revestimento, mas pela interação entre características do material, estado de conservação, coloração, presença de sombreamento e contexto urbano imediato. Em linhas gerais, os blocos intertravados demonstraram maior estabilidade térmica ao longo do dia, sobretudo em trechos com vegetação e tonalidades mais claras, apontando para o seu potencial como alternativa viável em estratégias de mitigação das ilhas de calor em cidades de clima quente e seco.

A partir das análises realizadas, fica evidente que a seleção de revestimentos urbanos deve considerar também critérios térmicos e ambientais, e não apenas estruturais ou econômicos. As informações obtidas podem servir como referência para ações de planejamento urbano, especialmente no que se refere à priorização de materiais com menor acúmulo térmico em áreas com alta densidade construtiva e baixa ventilação natural. Além disso, os dados sistematizados neste estudo fornecem uma base empírica importante para subsidiar decisões em programas de requalificação e manutenção de vias públicas.

Outro aspecto relevante é a escassez de modelos matemáticos específicos para estimar a temperatura superficial de pavimentos intertravados. Enquanto o pavimento asfáltico pôde ser validado com base em uma equação amplamente utilizada na literatura técnica, não foi identificado um modelo equivalente para os blocos de concreto. Essa limitação abre espaço para investigações futuras voltadas ao desenvolvimento de equações específicas que considerem as particularidades térmicas e geométricas desse tipo de revestimento.

Como próximos passos, recomenda-se o aprofundamento da análise por meio da incorporação de variáveis meteorológicas, como intensidade da radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, além da ampliação da amostragem para diferentes épocas do ano. Estudos dessa natureza podem colaborar com a construção de modelos preditivos mais realistas e adaptados às condições regionais, contribuindo com o enfrentamento de desafios urbanos relacionados ao conforto térmico e à sustentabilidade nas cidades.

Referências bibliográficas

- AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION (ACPA). AQD 007P – Hot Pavement: How to Reduce Excessive Pavement Temperatures. Skokie, IL, USA: ACPA, 2009. Disponível em: <https://www.acpa.org>. Acesso em: 06 set. 2024.
- ANAND, J.; SAILOR D.J. Role of pavement radiative and thermal properties in reducing excess heat in cities. *Solar Energy*, v. 242, p. 413-423, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.056> Acesso em: 06 set.2024.
- BARBIRATO, G. M; SOUZA, L. C. L; TORRES, S. C. Clima e cidade: a abordagem climática como subsídios para estudos urbanos. Maceió: EDUFAL, 2007.
- BERNUCCI, L. B. et al. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2022.
- CELIS, A. M. C. et al. Análise da influência da temperatura superficial da pavimentação em clima equatorial úmido. Estudo de caso. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. 2021. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4428>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- CLIMATEMPO. Climatologia de Quixadá. 2025. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/989/quixada-ce>. Acesso em: 25 jan. 2025
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Brasil tem método antigo para dimensionar o pavimento. Brasília, 2017.
- DURÁN, G. Y. B.; PRADO, D. A.; FILHO, W. P. Caracterização da refletância espectral de materiais urbanos com uso de Espectroradiômetro. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p.8893-8900

GARTLAND, L. Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de textos, 2010. LOMBARDO, M. A. Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucite, 1985. 244p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. Mecânica dos pavimentos (3ª ed.). 2015. Rio de Janeiro, RJ: Interciência.

NASARUDIN, N.E.M.; SHAFRI, H.Z.M. Development and Utilization of urban spectral library for remote sensing of urban environment. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, vol. 5, n. 1, 2011, pp. 44-56.

PEIXOTO, N. G. de M. et al. Avaliação do comportamento térmico de materiais empregados em projeto de requalificação viária na cidade de Fortaleza. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, v. 17, p. 1-10, 2023. Anais [...]. [S. l.], 2023. p. 1-10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.4001. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4001>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SOUSA, E. P. Caracterização da temperatura superficial em revestimentos de pavimentação flexível da cidade de Quixadá CE / Emanuel Pereira Sousa. - 2025. 73 f. : il. color.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (SHRP). The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. Washington, D.C.: National Research Council, 1994.

WEATHER SPARK. Clima, condições meteorológicas e temperatura média por mês de Quixadá. 2024. il. color. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/31033/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Quixad%C3%A1-Cear%C3%A1-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em 13. jan. 2025.

O seu futuro está aqui!
Confira nossos cursos que irão fazer a sua carreira decolar!

- Pós-Graduação**
ENGENHARIA RODOVIÁRIA: CONCESSÕES DE RODOVIAS E VIAS URBANAS
Curso On-line
Escaneie e saiba mais
- Pós-Graduação**
ENGENHARIA DE PAVIMENTAÇÃO
Curso On-line
Escaneie e saiba mais
- Pós-Graduação**
SUPERVISÃO E CONTROLE TECNOLÓGICO DE OBRAS RODOVIÁRIAS
Curso On-line
Escaneie e saiba mais

Fale conosco e transforme SUA CARREIRA!
comercial@iposespecializacao.com.br
62 99852-2379 41 3010-6427

IPOS
PÓS-GRADUAÇÃO

Acesse iposespecializacao.com.br e conheça todos os nossos cursos

Como surgiu a ABPv

Há 66 anos a Associação Brasileira de Pavimentação está presente no cenário da infraestrutura de transportes do Brasil, promovendo a divulgação, o debate e o ensino da engenharia de pavimentação.

Sua história tem início numa época de grande entusiasmo de desenvolvimento rodoviário no país, os anos 50, quando o governo se dirigiu à realização de algumas rodovias importantes econômica e estrategicamente, e à melhoria de outras já existentes. A essa época, já era determinante que seriam utilizadas as técnicas da pavimentação para a garantia da qualidade das novas estradas e sua manutenção.

Nesse contexto, o engenheiro Mario Kabalem Restom, divagava com seus colegas de canteiros de serviços das obras rodoviárias sobre os benefícios que a engenharia nacional teria com a criação de uma associação em torno da pavimentação. Notadamente, seria o locus para sedimentar e aprofundar em estudos o que se observava no campo e debater novos ensaios e normas técnicas.

Da mesma ideia compartilhavam profissionais pioneiros da pavimentação no Brasil, como o engenheiro químico Pontes Corrêa, engenheiro Aldenor Campos e engenheiro Murillo Lopes de Souza.

Kabalem, então com espírito determinado, foi a mola propulsora da criação em 15 de setembro de 1959 da Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, na cidade do Rio de Janeiro. A ata de fundação foi assinada pelos engenheiros Saul Birman, Aldenor Ribeiro Campos, Jacques de Medina, Francisco Bolívar Lobo Carneiro, Paulo Alvim Monteiro de Castro, Manuel Ribeiro Alves Filho, Décio Nascentes da Silva, Fernando Fonseca Martins, Washington Juarez de Brito e pelo próprio Kabalem. Concretizava-se assim o ideal compartilhado com o químico Pontes Corrêa, que faleceu antes de ver seu sonho realizado.

Vale mencionar que já em 1951 a comunidade científica rejubilou-se com a criação do Conselho Nacional de Pesquisas, onde no seu âmbito, passou a funcionar, em 1957, o renomado Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, que foi muito importante na trajetória da ABPv.

No ano seguinte a sua criação, a ABPv realizou a primeira Reunião Anual de Pavimentação – RAPv. Nessa ocasião foi instituído pela Equipe Editora/Revista Construção, do engenheiro Aldenor Ribeiro Campos, o Prêmio Pontes Corrêa. A honra era destinada àqueles profissionais que contribuíam com relevância e destaque para a engenharia de pavimentação nacional. E posteriormente, o Prêmio Pontes Corrêa tornou-se a maior

honraria concedida pela ABPv.

Com o avanço dos estudos e desenvolvimento da infraestrutura do país, a pavimentação se estendeu também para os modais ferroviário, portuário e aeroportuário.

Ao longo desses 66 anos a ABPv vem realizando periodicamente a Reunião Anual de Pavimentação – RAPv, e a Reunião de Pavimentação Urbana – RPU, dois importantes eventos nacionais do setor. São publicados periodicamente boletins informativos, livros, anais e a Revista PAVIMENTAÇÃO, uma referência em seu seguimento.

A área acadêmica que desenvolve pesquisas sobre mecânica de pavimentos, materiais, desempenho funcional e sistemas de gerência, muito deve à ABPv pelas oportunidades oferecidas de divulgação e discussão de seus trabalhos produzidos em monografias, dissertações e teses de pós-graduação.

O meio empresarial, no que tem de mais esclarecido, reconhece o papel que associações como a ABPv representam para o prestígio da Engenharia brasileira. Por isso, registram-se apoios financeiros para reuniões técnicas, publicações em geral e premiações.

E finalmente o setor governamental como prefeituras, Departamentos Estaduais (DERs) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) têm na ABPv um grande suporte através dos congressos, cursos e palestras para atualização de novos métodos e tecnologias mundialmente aplicadas.

Portanto, a ABPv é agente e testemunha de todos os esforços da engenharia nacional de pavimentação.

1ª Diretoria da ABPv. A partir da esquerda: Eng. Paulo Alvim Monteiro de Castro, Eng. Saul Birman, Eng. Mario Kabalem Restom, Eng. Jacques de Medina, Eng. Aldenor Ribeiro Campos, Eng. Manoel Ribeiro Alves Filho e Eng. Francisco Bolívar Lobo Carneiro



IMPACTO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NO TRINCAMENTO POR FADIGA SIMULADO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

IMPACT OF WEATHER CONDITIONS ON FATIGUE CRACKING SIMULATED IN ASPHALT PAVEMENTS

Victória Nunes-Ramos¹

Luciano Pivoto Specht¹

Cléber Faccin¹

Silvio Lisboa Schuster¹

Deividi da Silva Pereira¹

Henrique Otto Coelho²

José Antônio Santana Echeverria²

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello²

¹Universidade Federal de Santa Maria, victorianunesramos@gmail.com; luspecht@ufsm.br; crfaccin@gmail.com; silviolschuster@ufsm.br; dsp@ufsm.br

²Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, henrique.coelho@dnit.gov.br; jose.echeverria@dnit.gov.br; luiz.mello@dnit.gov.br

DOI: 10.21526/abpv.v54.2

RESUMO

A crescente preocupação com os impactos das mudanças climáticas sobre a infraestrutura viária tem impulsionado o desenvolvimento de metodologias que incorporem as variáveis ambientais em análises mecânicas e previsões de desempenho de pavimentos flexíveis. Em paralelo a isso, o trincamento por fadiga é um dos principais mecanismos de falha dessas estruturas, e a influência das condições ambientais sobre esse fenômeno, especialmente térmicas, ainda carece de estudos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de diferentes condições climáticas sobre o dano por fadiga simulado em pavimentos flexíveis, com base em dados climáticos horários históricos de duas cidades brasileiras com características distintas: Manaus (AM) e Porto Alegre (RS). Utilizou-se o modelo numérico para calcular os perfis de temperatura do revestimento, e o *software* FlexPAVE™ para simular o desempenho estrutural de 147 misturas asfálticas sob dois níveis de tráfego (baixo e muito pesado). Os resultados mostraram que climas frios e com maior amplitude térmica, como o de Porto Alegre, tendem a intensificar o dano por fadiga, especialmente sob tráfego elevado. Por outro lado, o clima com temperaturas constantemente elevadas de Manaus pode favorecer o relaxamento de tensões no revestimento, resultando em menor dano acumulado. Testes estatísticos confirmaram a significância das diferenças observadas entre os climas, principalmente em condições de tráfego severo. A alta variabilidade dos resultados em cada cenário, mesmo sob condições fixas de simulação, evidenciaram ainda a relevância da mistura asfáltica na resposta estrutural, visto que constituíam a única variável dentro de um mesmo grupo de simulação. Assim, a pesquisa reforça a importância de considerar parâmetros climáticos na análise da fadiga em pavimentos, e aponta para a necessidade de abordagens regionalizadas de avaliação.

Palavras-chave: clima; modelagem térmica; misturas asfálticas; fadiga; simulação de pavimentos.

ABSTRACT

The growing concern regarding the impacts of climate change on road infrastructure has driven the development of methodologies that incorporate environmental variables into mechanical analyses and performance predictions of flexible pavements. In parallel, fatigue cracking remains one of the primary failure mechanisms in these structures, yet the influence of environmental conditions — especially thermal ones — on this phenomenon remains underexplored. This study aimed to evaluate the impact of different climatic conditions on simulated fatigue damage in flexible pavements, based on historical hourly climate data from two Brazilian cities with distinct profiles: Manaus (AM) and Porto Alegre (RS). A numerical model was used to calculate the temperature profiles of the asphalt layer, and the FlexPAVE™ software was employed to simulate the structural performance of 147 asphalt mixtures under two traffic levels (low and very heavy). The results indicated that colder climates with greater thermal variation, such as Porto Alegre, tend to intensify fatigue damage, particularly under higher traffic loads. Conversely, the consistently high temperatures in Manaus may promote stress relaxation in the asphalt layer, resulting in lower accumulated damage. Statistical tests confirmed the significance of the observed differences between climates, especially under severe traffic conditions. The high variability observed in each simulation group — even under fixed conditions — also highlighted the importance of the asphalt mixture in the structural response, as it was the only varying input within each scenario. Thus, the findings underscore the need to incorporate climatic parameters in material selection and fatigue analysis, reinforcing the relevance of regionalized approaches to pavement performance assessment.

Keywords: climate; thermal modeling; asphalt mixtures; fatigue; pavement simulation.

INTRODUÇÃO

As alterações climáticas, definidas como mudanças no sistema climático global decorrentes do aquecimento do planeta, alterações na circulação oceânica ou outros fatores, vêm sendo intensamente discutidas nas últimas décadas (Tilio Neto, 2008). Esse fenômeno deriva tanto de causas naturais quanto de ações antrópicas, sobretudo pelo aumento da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (Aizebeokhai, 2009). Em paralelo a isso, o impacto dessas mudanças sobre a infraestrutura viária, principalmente em pavimentos asfálticos, tem se tornado cada vez mais evidente (Liu et al., 2023), visto que são estruturas sensíveis ao meio ambiente, especialmente às variações de temperatura (Gong et al., 2022; Li et al., 2017; Motta, 1991) e umidade (Brondani et al., 2022, 2023). Assim, variações climáticas importantes exercem influência no comportamento estrutural dos pavimentos, podendo retardar ou acelerar a sua degradação (Enríquez-de-Salamanca, 2019).

Reconhecendo a influência do clima sobre a durabilidade das estruturas viárias, estudos recentes têm destacado a necessidade de incorporar essa variável nos processos de dimensionamento dos pavimentos (Chowdhury, 2020; Schuster et al., 2022). Tal consideração, no entanto, só se tornou viável com os avanços recentes dos métodos de análise, uma vez que abordagens tradicionais assumiam propriedades dos materiais constantes a partir de temperaturas e frequências únicas nos ensaios de caracterização. Nesse sentido, Bernucci et al. (2022) destacam três principais lógicas no dimensionamento de pavimentos: (i) o método empírico tradicional, baseado na capacidade de uma camada proteger as inferiores, ancorado em índices como o *California Bearing Ratio* (CBR); (ii) o método mecanístico-empírico baseado na limitação de respostas estruturais específicas (como deformações ou tensões) sob um carregamento padrão; e (iii) o dimensionamento voltado à previsão de desempenho, em que se define um nível máximo de deterioração admissível ao fim da vida útil de projeto.

As abordagens (ii) e (iii) representam os métodos mecanístico-empíricos, que se apoiam em modelos analíticos e validação experimental. Nes-

se contexto, o desenvolvimento de extensas bases de dados de pavimentos reais permitiu a formulação de funções de transferência, que traduzem resultados laboratoriais em propriedades de campo (como a área trincada), as quais foram codificadas em programas computacionais como o FlexPAVE™, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) brasileiro e o *Computational Analysis of Pavements 3D-Design* (CAP3D-D). O FlexPAVE™, em particular, é uma ferramenta de previsão de desempenho que permite avaliar a resposta de diferentes estruturas de pavimento considerando diferentes materiais, tráfegos e climas. Utilizando a análise tridimensional por elementos finitos com modelagem viscoelástica dos materiais, o *software* permite estimar os danos por fadiga e deformação permanente, levando em conta as variações térmicas e a ação de cargas móveis.

Entre os mecanismos de deterioração que afetam o desempenho estrutural dos pavimentos flexíveis e que podem ser modelados por essas ferramentas, a fadiga é um dos mais relevantes. Esse fenômeno resulta da repetição das cargas de tráfego, gerando a progressiva formação de microtrincas na camada asfáltica, que evoluem até a ruptura do material (Di Benedetto et al., 2004; Tayebali et al., 1994; Yoder; Witczak, 1975). A degradação da camada de revestimento manifesta-se por meio de defeitos que reduzem o conforto e a segurança dos usuários, e determinam os gatilhos de intervenção (Hass; Hudson; Zaniwski, 1994). Para que seja possível planejar obras rodoviárias de forma eficaz, é importante prever com precisão a evolução do dano por fadiga, considerando variáveis que reproduzam adequadamente as condições reais de serviço.

Dentre essas variáveis, diferentes condições de tráfego são frequentemente investigados em estudos de previsão de desempenho, como o acúmulo de repetições do eixo-padrão e variações de velocidade (Etheridge et al., 2019; Fahad; Bektas, 2025; Mahran; Moussa; Younis, 2023; Nunes-Ramos, 2023; Shakhan; Topal; Sengoz, 2023). No entanto, poucos trabalhos têm avaliado o impacto de diferentes climas na fadiga dos pavimentos, especialmente com previsões mecanicistas, o que se deve, em parte, à escassez de dados climáticos detalhados e à complexidade envolvida na modelagem térmica dos

revestimentos asfálticos ao longo do tempo e da profundidade. Algumas exceções incluem os estudos de Chaves (2021), Chen e Wang (2022), Liu *et al.* (2023), Zhang *et al.* (2024), Wang, Gong e Gu (2025) e Mahran, Moussa e Younis (2023), que buscaram incorporar o clima em suas análises.

A modelagem térmica de pavimentos pode ser realizada por abordagens empíricas (Chaves, 2021; Lopes, 2019), analíticas (Chong; Tramontini; Specht, 2009) ou numéricas (Chen; Wang; Xie, 2019; Rajapaksha *et al.*, 2023). Nesse contexto, destaca-se o modelo numérico desenvolvido recentemente por Faccin *et al.* (2024), que propõe uma abordagem unidimensional capaz de prever o perfil térmico de pavimentos flexíveis ao longo da profundidade, a partir de dados climáticos e propriedades térmicas dos materiais, com foco na realidade brasileira.

Além disso, os avanços nos métodos de caracterização da fadiga em misturas asfálticas têm viabilizado a obtenção de propriedades fundamentais que podem ser utilizadas para simular o comportamento desses materiais em diferentes condições de carregamento e temperatura. Um exemplo clássico é a interpretação do ensaio de fadiga à tração direta por meio do modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage* – S-VECD) (Underwood; Baek; Kim, 2012). A integração das propriedades obtidas por esse modelo com dados de rigidez em ampla faixa de temperaturas e frequências, combinados com informações climáticas, já pode ser realizada em ferramentas como o FlexPAVE™, o que permite avaliar

de forma mais realista o efeito do clima sobre a vida de fadiga dos pavimentos.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do clima no dano por fadiga de pavimentos asfálticos, considerando dados climáticos históricos para duas localidades brasileiras com características contrastantes. Para isso, 147 misturas asfálticas foram simuladas no FlexPAVE™, sob dois níveis de tráfego, e cujos perfis de temperatura foram calculados por um modelo numérico usando dados climáticos horários do período de 2014 a 2023.

MATERIAIS E MÉTODOS

Planejamento da Pesquisa

A Figura 1 apresenta o planejamento da pesquisa, iniciado pela coleta e processamento de dados climáticos horários provenientes da base MERRA-2, considerando duas localidades brasileiras no período de 2014 a 2023. Em seguida, foi realizada a modelagem numérica da temperatura horária do pavimento ao longo da profundidade, utilizando o modelo proposto por Faccin *et al.* (2024). A terceira fase consiste na simulação mecânica de pavimentos, com auxílio do *software* FlexPAVE™, avaliando 147 diferentes misturas asfálticas, além de dois cenários de tráfego e dois cenários climáticos. Por fim, a pesquisa realizou comparações estatísticas dos resultados para compreender o efeito das condições climáticas na evolução do dano por fadiga em pavimentos.

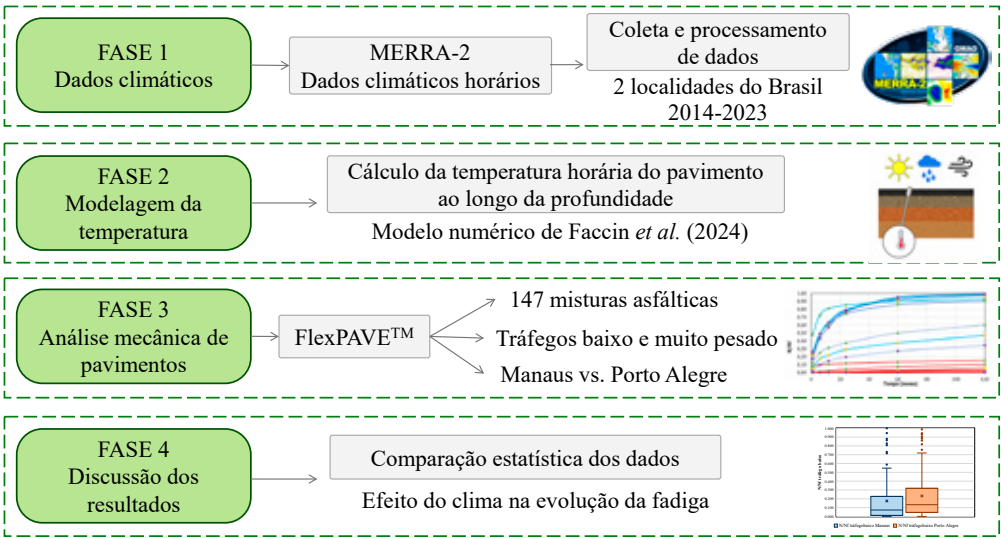


Figura 1. Planejamento da pesquisa

Dados climáticos e localidades estudadas

Para a obtenção dos perfis de temperatura do pavimento, foram coletados dados climáticos horários provenientes da reanálise MERRA-2, uma base de dados que reúne variáveis meteorológicas obtidas a partir da combinação de observações terrestres, atmosféricas, oceânicas e por satélite, desenvolvi-

da pelo *Goddard Space Flight Center* (Gelaro *et al.*, 2017). Os dados foram acessados pelo pacote *nasa-power* (Sparks, 2018) do *software* R (R Core Team, 2024), e pelo portal da NASA (NASA, 2024). No mesmo *software*, o processamento dos dados abrangeu um período de 10 anos (2014–2023), e as variáveis climáticas coletadas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dados climáticos horários usados na pesquisa (Autores, 2025)

Dados climáticos horários	Unidade
T2M – Temperatura do ar a 2 metros	(°C)
T2MDEW - Temperatura do ponto de orvalho a 2 metros	(°C)
WS2M – Velocidade do vento 2 metros	m/s
RAD - Radiação solar incidente	w/m²

Neste trabalho, duas cidades brasileiras foram avaliadas, representando duas das cinco zonas climáticas de pavimentação estabelecidas em Faccin (2025) (Tabela 2), sendo escolhidas por apresentarem padrões climáticos bastante distintos. Segundo o autor, a cidade de Manaus, por estar situada na Re-

gião Norte e inserida na Floresta Amazônica, apresenta elevados índices de precipitação, umidade e temperatura. Por outro lado, Porto Alegre (região Sul do país) apresenta temperaturas mais baixas e grande amplitude térmica.

Tabela 2. Cidades avaliadas (Autores, 2025)

Cidade	Estado	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Manaus	Amazonas	-3,103333	-60,016389	61,25
Porto Alegre	Rio Grande do Sul	-30,053611	-51,174722	41,18

Cálculo dos perfis de temperatura do pavimento

A partir dos dados climáticos coletados na etapa anterior, foram calculados os perfis de temperatura do pavimento a partir do modelo numérico de Faccin *et al.* (2024), que considera o balanço de energia existente entre o pavimento e o ambiente. Destaca-se que neste trabalho não foi utilizado o *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM), tradicionalmente adotado em simulações no FlexPAVE™, por apresentar limitações relevantes, como a utilização de modelos de radiação que podem ser fisicamente inconsistentes e a adoção de coeficientes de convecção inadequados, o que leva à superestimação das temperaturas sob condições sem vento e períodos quentes (Faccin *et al.*, 2024).

Dessa forma, os dados climáticos citados na Tabela 1 permitiram o cálculo da temperatura horária do pavimento e, no caso deste estudo, a cada 2 cm de profundidade. As propriedades usadas no cálculo foram adotadas com base em valores típicos da literatura, sendo: diferentes parâmetros termofísicos para os materiais de cada camada do pavimento, de acordo com a Tabela 3 (Dempsey; Thompson, 1970; Hall *et al.*, 2012; Specht; Borges; Hellmann, 2008); o valor de 0,05 para o albedo, típico de concretos asfálticos novos (Rose; Levinson, 2013); e uma emissividade da mistura asfáltica de 0,9 (Chen; Wang; Xie, 2019).

Tabela 3. Propriedades termofísicas dos materiais adotados nas camadas do pavimento (Dempsey; Thompson, 1970; Hall *et al.*, 2012; Specht; Borges; Hellmann, 2008)

Camada do pavimento	Massa específica (kg/m ³)	Capacidade térmica (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Concreto asfáltico	2,371	921	1,16
Agregados para base	2200	900	1,50
Agregados para subbase	2100	850	1,20
Subleito	1800	1200	1,50

Desempenho à fadiga do revestimento asfáltico

O FlexPAVE™ é um *software* de previsão de desempenho que simula o comportamento de pavimentos sob diferentes combinações de materiais, climas, tráfegos e composições estruturais. Uma vez que utiliza a análise tridimensional por elementos finitos com modelagem viscoelástica dos materiais, é possível a consideração das variações de temperatura e de cargas móveis para estimar os danos por fadiga e por deformação permanente da estrutura (Barros *et al.*, 2022). Assim, foi viável a simulação da resposta do pavimento em termos de dano por fadiga para diferentes condições climáticas, a partir da consideração dos perfis de temperatura calculados na etapa anterior.

O FlexPAVE™ foi usado na pesquisa em sua versão 1.1 Beta. Nesse sentido, destaca-se que essa versão adota o perfil de temperatura variável do pavimento ao longo do tempo, assumindo como padrão anual as variações do primeiro ano de análise. Em todas as simulações, adotou-se a carga de um eixo simples com rodas duplas de 80 kN (eixo-padrão),

com pressão de inflação de 0,80 MPa, área de contato retangular com razão comprimento/largura de 1,5714 e velocidade de 60 km/h (velocidade comum para o tráfego de cargas no Brasil). A distribuição diária de tráfego seguiu o padrão de Nascimento (2015).

Neste estudo, adotou-se um panorama comum a diversas rodovias brasileiras, no qual uma estrutura única de pavimento é submetida a um tráfego crescente ao longo dos anos, sem que haja nenhuma intervenção estrutural. Dessa forma, é possível visualizar as diferenças entre misturas asfálticas em condições distintas. Foram avaliados cenários de curto prazo, considerando-se que o tráfego é baixo (número de repetições do eixo-padrão acumulado – N – de 1x10⁶), e de longo prazo, assumindo um N acumulado de 8x10⁷, representativo de um tráfego extremamente pesado. A classificação do tráfego seguiu os limites de Ceratti, Bernucci e Soares (2015). Além disso, a composição das camadas seguiu valores retroanalísados de pavimentos reais (Bordin, 2020; Bueno, 2019; Santos, 2015; Scherer, 2018), conforme a Figura 2.

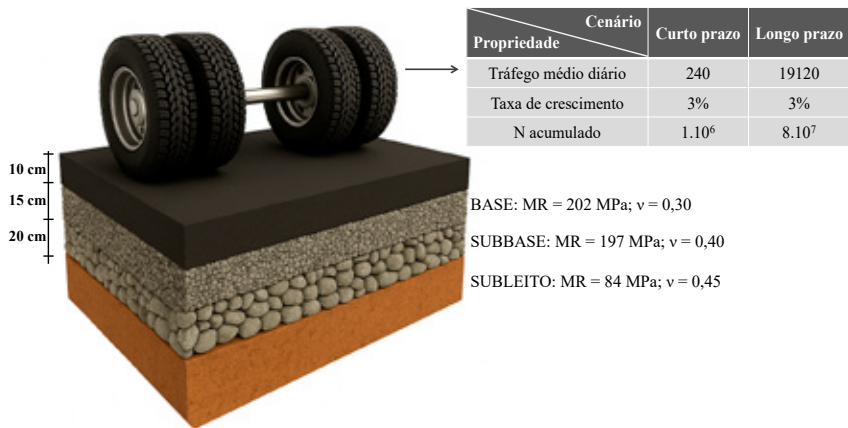


Figura 2. Estrutura e tráfegos simulados no FlexPAVE™ (Autores, 2025)

No revestimento, dados de rigidez e fadiga de 147 misturas asfálticas catalogadas por Nunes-Ramos (2023) foram usados nas análises, totalizando 588 cenários simulados (considerando as variações de tráfego e clima). Os dados de entrada para o

software são provenientes dos ensaios de Módulo Complexo (AASHTO T 342, 2022) e Fadiga à Tração Direta (AASHTO T 400, 2023), conforme ilustrado na Figura 3.

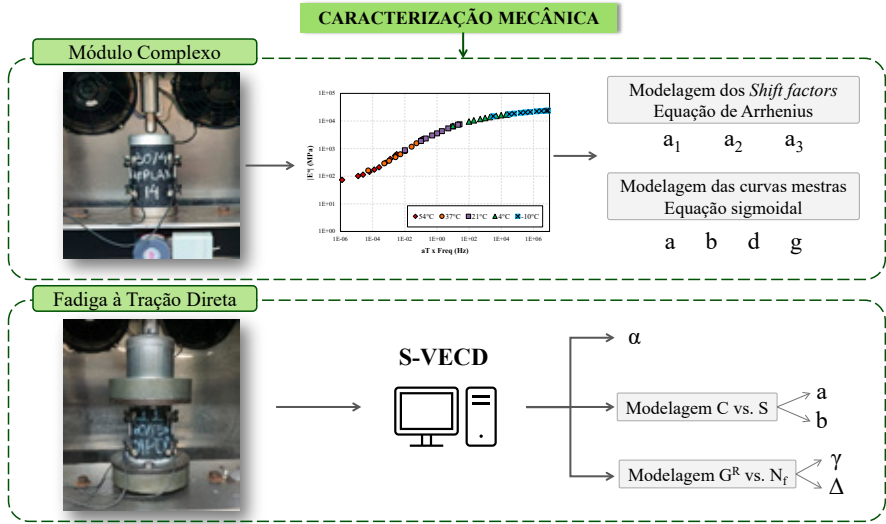


Figura 3. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas inseridas no FlexPAVE™ (Autores, 2025)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise mecânica de pavimentos descrita na etapa anterior permitiu a observação do dano por fadiga na camada asfáltica após o acúmulo total do tráfego (N/Nf). A partir da Figura 4, observou-se que o clima parece ter influência no dano por fadiga de pavimentos asfálticos, tanto sob tráfego baixo (a) quanto muito pesado (b). Em ambos os casos, os valores de N/Nf simulados com as condições climáticas de Manaus foram, em geral, inferiores aos de Porto Alegre, indicando que, sob uma mesma condição de tráfego, os pavimentos apresentam menor dano acumulado em climas quentes, como ocorre na da região Norte do país.

No cenário de tráfego baixo, os valores de N/Nf para Manaus encontram-se abaixo de 0,2 em sua maioria, e é possível notar valores mais elevados e dispersos sob o clima Porto Alegre, que apresentou danos variando de 0,0 até próximos a 0,7. Tais observações indicam que, mesmo sob tráfego leve, o clima mais frio e com maior amplitude térmica de Porto Alegre tende a acelerar a fadiga da estrutura, acumulando mais dano ao longo do tempo. Além disso, sob tais condições desfavoráveis, as propriedades mecânicas das misturas asfálticas possuem

influência mais acentuada nos resultados, visto que ainda é possível encontrar concretos asfálticos de maior desempenho que apresentaram danos mais baixos, o que pode explicar a maior variabilidade dos dados no clima frio.

Sob tráfego muito pesado, a diferença entre os climas parece se manter, embora a variabilidade dos dados cresça expressivamente. As estruturas simuladas para Porto Alegre apresentaram, em média, valores de N/Nf mais altos do que aquelas em Manaus, com média superior a 0,5 e uma grande concentração de casos próximos à danificação completa da área simulada (N/Nf ≈ 1,0). Por outro lado, os resultados de Manaus indicam menor concentração de dano acumulado sob a mesma carga. Nesse caso, a condição desfavorável do tráfego também evidencia a influência do desempenho das misturas no resultado (indicada pela grande dispersão de valores), já que foram observadas misturas com grande capacidade de resistir ao dano por fadiga mesmo sob condições extremas de carga e clima.

As diferenças encontradas estão relacionadas às condições ambientais de cada cidade. Em Manaus, o calor intenso e constante tende a reduzir a rigidez do ligante, podendo retardar o surgimento

de trincas por fadiga ao permitir maior relaxação de tensões internas. Em campo, também pode haver o a cicatrização de eventuais trincas formadas durante a passagem repetida do tráfego, mas esse fenômeno ainda não pode ser simulado no FlexPAVE™. Já em Porto Alegre, as temperaturas mais

baixas e variações térmicas acentuadas aumentam o comportamento frágil da mistura, além de provocar mudanças constantes no estado de tensões do material devido à grande amplitude térmica, especialmente em situações de tráfego elevado.

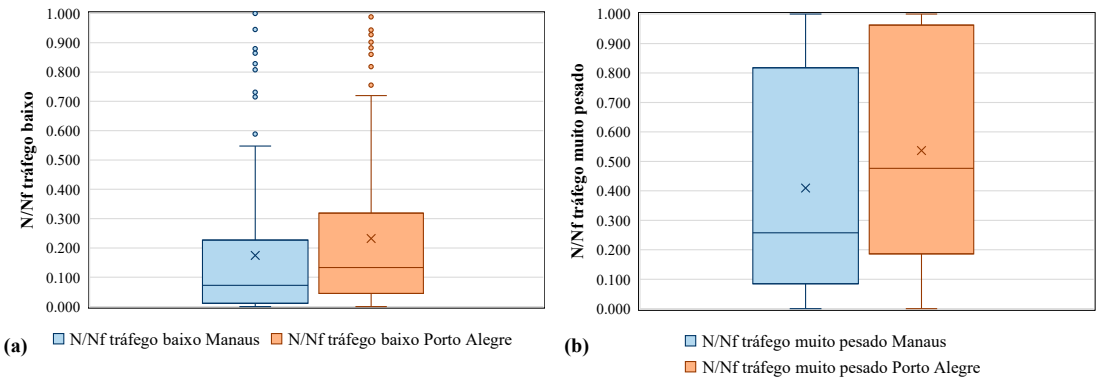


Figura 4. Boxplots de N/Nf ao final do tráfego acumulado para os tráfegos (a) baixo e (b) muito pesado (Autores, 2025)

Na Tabela 4 estão apresentados os intervalos de confiança de N/Nf ao final do tráfego acumulado, estimados pelo método *Bootstrap* (10000 reamostragens com reposição e 95% de confiança – IC95%), pois testes de Shapiro-Wilk confirmaram a não normalidade dos dados. Inicialmente foi observado que os valores de desvio padrão (Sd) são relativamente elevados, indicando que os resultados de dano por fadiga apresentaram alta variabilidade mesmo sob condições fixas de simulação (tráfego, clima e suporte estrutural). Portanto, reforça-se a influência da mistura asfáltica usada na camada de revestimento, visto que foi a única variação estrutural realizada dentro de um mesmo cenário de análise. Assim, é possível afirmar que o material do revestimento tem papel determinante na resposta à fadiga dos pavimentos, e que novas formas de selecionar adequadamente esses materiais devem ser investigadas.

Para um tráfego baixo, os intervalos de confiança para os danos médios apresentaram sobreposição entre os climas, o que não permite afirmar que há uma diferença estatística entre eles, para 95% de confiança. Contudo, após a remoção de *outliers* (valores fora do intervalo $Q1-1,5*IQ$; $Q3+1,5*IQ$, sendo Q1 e Q3 os quartis 1 e 3, respectivamente, e IQ o intervalo interquartil), os intervalos de confiança deixam de se sobrepor, e o dano médio para Porto

Alegre é maior que para Manaus.

Tais observações foram confirmadas pelos resultados do *Bootstrap* para a diferença de médias, pelo qual um intervalo de confiança para a diferença das médias é calculado e diferenças estatísticas significantes são apontadas quando o valor nulo está fora desse intervalo. Nesse sentido, o IC95% da diferença de médias (Porto Alegre – Manaus) foi $[-0,00343; 0,11694]$ para todos os dados e $[0,01907; 0,09391]$ desconsiderando *outliers*. Assim, é possível afirmar que há uma diferença estatística entre os danos, mas que não é tão expressivo quando o tráfego é baixo.

No entanto, o clima parece ter maior influência em condições de tráfego severo, visto que não houve sobreposição dos intervalos entre as duas cidades, e o dano médio por fadiga para Porto Alegre é maior do que para Manaus. O resultado foi confirmado pelo *Bootstrap* para a diferença de médias, em que o IC95% foi $[0,04056; 0,21382]$, que não contém o valor nulo. Esses valores reforçam que climas mais frios e com maior amplitude térmica tendem a ser mais agressivos para esse mecanismo de deterioração.

Vale destacar, por fim, que o cálculo dos perfis de temperatura pelo modelo de Faccin *et al.* (2024) considera apenas parâmetros de temperatura, e

por isso regiões com maior diferença climática tenderão a apresentar variações mais expressivas no dano por fadiga. No entanto, as condições distintas no regime de chuvas e, portanto, nos valores de umidade, podem ter impacto nas simulações de

pavimentos, o que deverá ser investigado no futuro quando o *software* permitir essa consideração ou quando utilizada outra ferramenta, como o *AASH-TOWare Pavement ME Design*.

Tabela 4. Medidas descritivas e intervalos de confiança para N/Nf ao final do tráfego acumulado (Autores, 2025)

N/Nf Tráfego baixo						
Clima	Inclusão de Outliers	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	IC
Manaus	Sim	0,175	0,247	-0,038	0,042	[0,137 : 0,217]
Porto Alegre	Sim	0,232	0,271	-0,043	0,044	[0,189 : 0,276]
Manaus	Não	0,110	0,135	-0,022	0,023	[0,088 : 0,133]
Porto Alegre	Não	0,167	0,177	-0,029	0,030	[0,137 : 0,197]
N/Nf Tráfego muito pesado						
Clima	Inclusão de Outliers	Média amostral	Sd amostral	Erro inferior (percentil 2,5%)	Erro superior (percentil 97,5%)	IC
Manaus	Não há outlier	0,409	0,374	-0,059	0,061	[0,351 : 0,470]
Porto Alegre	Não há outlier	0,537	0,382	-0,062	0,062	[0,475 : 0,599]

CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência das condições climáticas, traduzidas em variações de temperatura, no dano por fadiga de pavimentos flexíveis, utilizando avaliações mecânicas de pavimentos no *software* FlexPAVE™, nas quais 147 misturas asfálticas distintas foram simuladas sob o clima de Manaus (AM) e Porto Alegre (RS), e em condições de tráfego baixo e muito pesado. Diferentes dados climáticos horários foram obtidos para as duas cidades brasileiras, e a modelagem térmica do revestimento ao longo da profundidade foi realizada com o modelo numérico de Faccin *et al.* (2024). Os resultados mostraram que o clima tem influência sobre o desempenho à fadiga das misturas asfálticas, especialmente para condições mais severas de tráfego. Para um tráfego baixo, os pavimentos simulados sob o clima de Porto Alegre apresentaram valores médios mais altos de dano por fadiga em comparação a Manaus. Para um tráfego muito pesado, essa diferença foi ainda mais acentuada, reforçando que climas frios e com maior amplitude térmica, como o de Porto Alegre, tendem a ser mais agressivos quanto ao trincamento por fadiga. Em contrapartida, o clima de Manaus, com temperaturas constantemente elevadas, contribui para a redução da rigidez das misturas, o que parece fa-

vorecer o relaxamento de tensões. Diferentes intervalos de confiança foram calculados para o dano médio ao final do tráfego acumulado. Nesse cenário, verificou-se que não é possível afirmar que há uma diferença estatística entre os danos médios para um cenário de tráfego baixo, apenas quando outliers são desconsiderados. No entanto, o clima parece ter mais influência sob condições de tráfego muito pesado, o que foi confirmado por testes estatísticos.

A pesquisa evidenciou que o aumento de temperatura resultante do aquecimento global pode não alterar ou até mesmo ser benéfico quando se trata do problema da fadiga, e que os maiores desafios estarão relacionados à deformação permanente. Por outro lado, mostrou que a seleção das misturas asfálticas para projetos rodoviários deve considerar aspectos de temperatura, visto que as maiores exigências de desempenho à fadiga se encontrarão em climas frios. Nesse sentido, em caso de desenvolvimento de um sistema de classificação por fadiga unificado no país, recomenda-se a consideração do cenário climático mais desfavorável, ou seja, com temperaturas mais baixas.

Observou-se também uma alta dispersão nos resultados, especialmente para condições mais severas de clima e tráfego, mesmo com condições

fixas de simulação. Tal observação evidencia que o comportamento da mistura asfáltica usada no revestimento tem influência importante na reposta estrutural. Assim, novas estratégias de seleção e projeto desses materiais devem ser consideradas para aumentar a durabilidade dos pavimentos.

A partir deste trabalho, recomenda-se expandir a análise para outras zonas climáticas brasileiras, além de repetir a análise para níveis intermediários de tráfego. Por fim, o impacto climático observado nesta pesquisa indica que a seleção de materiais asfálticos tem potencial para ser realizada de maneira regionalizada, considerando particularidades climáticas, como forma de melhorar a assertividade dos projetos rodoviários no país.

Referências bibliográficas

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 342: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Washington, D. C., 2022.

AASHTO T 400: Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. Washington, D. C., 2023.

AIZEBOKHAI, A. P. Global warming and climate change: Realities, uncertainties and measures. *International Journal of Physical Sciences*, v. 4, n. 13, p. 868–879, 2009.

BARROS, L. M. de *et al.* Characterization of the permanent deformation of asphalt mixtures based on indexes and on pavement structural performance. *Construction and Building Materials*, v. 326, p. 126555, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126555>

BERNUCCI, L. B. *et al.* Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2ªed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BORDIN, D. T. Implantação, acompanhamento e análise de desempenho de trechos monitorados em Santa Maria - RS. 2020. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22281>

BRONDANI, C. *et al.* Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures: Influence of Aggregates, Visual Analysis, and Mechanical Tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 2, p. 04022433, 2023. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004603](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004603)

BRONDANI, C. *et al.* Moisture susceptibility of asphalt mixtures: 2S2PID rheological model approach and new index based on dynamic modulus master curve changes. *Construction and Building Materials*, v. 331, p. 127316, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127316>

BUENO, L. D. Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos. 2019. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/19395>.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação. Rio de Janeiro/RJ: ABEDA, 2015.

CHAVES, B. de S. Análise da influência da temperatura na previsão de desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos a partir da modelagem viscoelástica. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22963>.

CHEN, X.; WANG, H. Impact of warming temperature on asphalt pavement overlay performance and cost: case study in New Jersey. *Road Materials and Pavement Design*, v. 23, n. 12, p. 2886–2899, 2022. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1991840>

CHEN, J.; WANG, H.; XIE, P. Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors. *Applied Thermal Engineering*, v. 158, p. 113755, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113755>

CHONG, W.; TRAMONTINI, R.; PIVOTO SPECHT, L. Application of the laplace transform and its numerical inversion to temperature profile of a two-layer pavement under site conditions. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, v. 55, n. 11, p. 1004–1018, 2009. <https://doi.org/10.1080/10407780903014194>

CHOWDHURY, M. S. Quantifying the Effects of Climate Change on Pavement Performance Prediction using AASHTOWare Pavement ME Design. Tese (doutorado), Boise State University Theses and Dissertations, Boise, Idaho, EUA, 2020. Disponível em: <https://scholarworks.boisestate.edu/td/1734/>.

DEMPSEY, B. J.; THOMPSON, M. R. A Heat-Transfer Model for Evaluating Frost Action and Temperature-Related Effects in Multilayered Pavement Systems. *In: 49TH ANNUAL MEETING OF THE HIGHWAY RESEARCH BOARD*, 1970, Washington District of Columbia. Anais [...]. Washington District of Columbia, United States, 1970. p. 39–56.

DI BENEDETTO, H. *et al.* Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, v. 37, p. 202–216, 2004. <https://doi.org/10.1007/bf02481620>

ENRÍQUEZ-DE-SALAMANCA, Á. Environmental impacts of climate change adaptation of road pavements and mitigation options. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, n. 6, p. 691–696, 2019. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326236>

ETHERIDGE, R. A. *et al.* Evaluation of Fatigue Cracking Resistance of Asphalt Mixtures Using Apparent Damage Capacity. *Journal of Materials in Civil Engineerin*, v. 31, n. 11, p. 04019257, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002870](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002870)

FACCIN, C. *et al.* Comparison of Climate Data from NASA POWER Reanalysis and Data Measured at Surface Weather

Stations for Application in Brazilian Paving Projects. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 47, p. 1–18, 2024. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2024_47_60749

FACCIN, C. Consideração das condições climáticas em projetos de pavimentação no Brasil: aplicações e impacto dos aumentos de temperatura. Tese (doutorado) em andamento, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2025.

FACCIN, C. *et al.* Desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura de pavimento flexíveis. *Transportes*, v. 32, n. 2, p. e2984, 2024. <https://doi.org/10.58922/transportes.v32i2.2984>

FAHAD, M.; BEKTAS, N. Data-Driven Pavement Performance: Machine Learning-Based Predictive Models. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 15, n. 7, p. 3889, 2025. <https://doi.org/10.3390/app15073889>

GELARO, R. *et al.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, v. 30, n. 14, p. 5419–5454, 2017. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

GONG, Z. *et al.* Review of regulation techniques of asphalt pavement high temperature for climate change adaptation. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, v. 3, n. 9, p. 1–18, 2022. <https://doi.org/10.1186/s43065-022-00054-5>

HALL, M. R. *et al.* Influence of the Thermophysical Properties of Pavement Materials on the Evolution of Temperature Depth Profiles in Different Climatic Regions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 1, p. 32–47, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000357](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000357)

HASS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. M. Modern pavement management. Malabar (EUA): Krieger Publishing Company, 1994.

LI, Y. *et al.* Effective temperature for predicting permanent deformation of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 871–879, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.118>

LIU, T. *et al.* Adaptation measures for asphalt pavements to climate change in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 415, p. 137861, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137861>

LOPES, T. A. S. Análise do Efeito da Sazonalidade da Temperatura e do Tráfego no Desempenho de Pavimentos Flexíveis: Segmentos Monitorados de Araranguá-SC. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214816>.

MAHRAN, N.; MOUSSA, G.; YOUNIS, H. Flexible Pavement Distresses Prediction Models using AASHTOWare. *Journal of Engineering Sciences*, v. 51, n. 6, p. 345–364, 2023. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2023.211235.1228>

MOTTA, L. M. G. da. Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. PhD Thesis. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio

de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

NASA. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project, 2024. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/>.

NASCIMENTO, L. A. H. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. 2015. 304 f. Tese (doutorado), North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, EUA, 2015.

NUNES-RAMOS, V. Proposta para seleção de ligantes e misturas asfálticas considerando deformação permanente e fadiga. 2023. 1–398 f. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.

R CORE TEAM. The R Project for Statistical Computing. 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.

RAJAPAKSHA, M. M. C. et al. Temporal and spatial temperature predictions for flexible pavement layers using numerical thermal analysis and verified with large datasets. *Case Studies in Construction Materials*, v. 18, p. e02008, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02008>

ROSE, L. S.; LEVINSON, R. Analysis of the effect of vegetation on albedo in residential areas: Case studies in suburban Sacramento and Los Angeles, CA. *GIScience and Remote Sensing*, v. 50, n. 1, p. 64–77, 2013. <https://doi.org/10.1080/15481603.2013.778557>

SANTOS, M. S. dos. Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria - RS. 2015. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

SCHERER, R. G. Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico. 2018. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

SCHUSTER, S. L. et al. Impacto das mudanças climáticas nas temperaturas máximas de pavimentos e no grau de desempenho exigido para ligantes asfálticos: projeções futuras para o Rio Grande do Sul. *Revista Estradas*, v. 27, p. 66–73, 2022.

SHAKHAN, M. R.; TOPAL, A.; SENGOZ, B. The influence of truck speed on pavement defects. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 24, n. 2, p. 2128348, 2023. <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2128348>

SPARKS, A. nasapower: A NASA POWER Global Meteorology, Surface Solar Energy and Climatology Data Client for R. *Journal of Open Source Software*, v. 3, n. 30, p. 1035, 2018. <https://doi.org/10.21105/joss.01035>

SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; HELLMANN, L. Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes. *Revista Tecnologia*, v. 29, n. 2, p. 198–210, 2008. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/37>.

TAYEBALI, A. A. et al. Fatigue Response of Asphalt-Aggregate



Mixes, Part I and II Strategy Highway Research Program, Project A-404. 1994.

TILIO NETO, P. de. Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres. Tese (doutorado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

UNDERWOOD, B.; BAEK, C.; KIM, Y. Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. Transportation Research Record, n. 2296, p. 36–45, 2012. <https://doi.org/10.3141/2296-04>

WANG, C.; GONG, G.; GU, J. A Comparative Study on Selecting the General Circulation Model for Pavement Design in China: A Case Study of Beijing. Journal of Infrastructure Systems, v. 31, n. 3, p. 04025011, 2025. <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2616>

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Principles of pavement design. New York (EUA): John Wiley e Sons, Inc., 1975.

ZHANG, Q. et al. Temperature variations and frozen zone migration: assessing the influence of climate change on fatigue cracking in roadway asphalt pavements—a case study of seven provinces in China. Road Materials and Pavement Design, v.

26, n. 5, p. 1105–1121, 2024. <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2409855>.

Engenharia que **conecta**
dados, caminhos e pessoas

A **Inteligência Artificial** integra dados de campo, tráfego, clima e acidentes para auxílio na tomada de decisão, priorizando intervenções de engenharia, resultando em **segurança viária e melhor nível de serviço para os usuários** das vias.

pavesys
ENGENHARIA DE PAVIMENTOS

pavesys.com.br
Porto Alegre e São Paulo



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO COMPORTAMENTO DE SHAKEDOWN DE SOLOS FINOS: SUBLASTROS FERROVIÁRIOS

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MOISTURE
VARIATION ON THE MECHANICAL
PERFORMANCE OF FINE-GRAINED SOILS
AS SUB-BALLAST MATERIAL IN RAILWAY
STRUCTURES

William Wilson dos Santos¹
Gleyciane Almeida Serra¹
Lisley Madeira Coelho¹
Sergio Neves Monteiro¹
Gabriel de Carvalho Nascimento²
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães¹

¹Instituto Militar de Engenharia (IME), wilson.william@ime.eb.br; eng. gleycianeserra@gmail.com; madeiralisley@ime.eb.br; snevesmonteiro@gmail.com; guimaraes@ime.eb.br

²Universidade Federal Fluminense, gabrielcn@id.uff.br

DOI: 10.21526/abpv.v54.3

RESUMO

Este trabalho analisa o efeito da variação de umidade no desempenho mecânico de solos finos da região de São Luís (MA), visando sua aplicação como sublastro em estruturas ferroviárias. Foram estudados dois solos: um arenoso não laterítico (AM03) e outro argiloso com características lateríticas (AM09). A metodologia incluiu ensaios laboratoriais de caracterização física e ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência e dos limites de shakedown. Além dos ensaios, utilizaram-se simulações numéricas com o Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio do software SysTrain 2.0, para avaliar o comportamento estrutural das camadas de sublastro. Os módulos de resiliência médios obtidos foram de 577 MPa (AM03) e 638 MPa (AM09). Os ensaios de deformação permanente foram realizados na umidade ótima e 1% acima da ótima. Observou-se que o aumento da umidade reduziu significativamente os limites de shakedown: cerca de 50% para o AM03 e 25% para o AM09, evidenciando maior resistência do solo laterítico à variação hídrica. Com o aumento das razões de tensão, os limites de ambos os solos tenderam a se aproximar, independentemente da umidade. As simulações numéricas confirmaram os efeitos negativos da umidade elevada. O solo AM03 apresentou falha progressiva e redistribuição intensa de tensões, enquanto o AM09 manteve-se no regime de shakedown, ainda que com deformações acumuladas maiores. Os resultados ressaltam a importância do controle de umidade para garantir a durabilidade de infraestruturas ferroviárias, especialmente em regiões tropicais. A pesquisa contribui para o desenvolvimento de projetos ferroviários mais resilientes e adaptados a condições ambientais variáveis.

Palavras-chave: Sublastro; umidade ótima; shakedown; infraestrutura de transportes

ABSTRACT

This study investigates the effect of moisture variation on the mechanical performance of fine-grained soils from the São Luís region (Maranhão, Brazil), focusing on their application as sub-ballast material in railway structures. Two soil types were analyzed: a non-lateritic sandy soil (AM03) and a clayey lateritic soil (AM09). The methodology included laboratory tests for physical characterization and repeated load triaxial tests to determine the resilient modulus and shakedown limits. In addition to experimental tests, numerical simulations were performed using the Finite Element Method (FEM) via the SysTrain 2.0 software to assess the structural behavior of sub-ballast layers. The average resilient moduli obtained were 577 MPa for AM03 and 638 MPa for AM09. Permanent deformation tests were conducted at the optimum moisture content and at 1% above optimum. It was observed that increased moisture significantly reduced the shakedown limits—by approximately 50% for AM03 and 25% for AM09—highlighting the higher hydric stability of the lateritic soil. As stress ratios increased, the shakedown limits of both materials tended to converge, regardless of moisture content. The numerical simulations confirmed the negative impacts of elevated moisture levels. AM03 exhibited signs of progressive failure and pronounced stress redistribution, while AM09 remained within the shakedown regime, although with greater accumulated deformations. These findings emphasize the importance of moisture control to ensure the durability of railway substructures, especially in tropical environments subject to significant climatic variability. The research contributes to the development of more resilient and sustainable railway infrastructure projects, better adapted to environmental challenges.

Keywords: subballast; optimum moisture; shakedown; transportation infrastructure.

INTRODUÇÃO

O sublastro ferroviário é fundamental para a durabilidade da via, atuando na distribuição de cargas, filtragem e estabilidade mecânica (Indraratna et al., 2011; Indraratna e Salim, 2005; Spada, 2003). Seu desempenho é sensível às variações de umidade e aos carregamentos cíclicos, que aceleram deformações permanentes e comprometem a integridade estrutural (Guimarães et al., 2021; Soliman e Shalaby, 2015). A avaliação mecânica envolve ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, sendo este último essencial na escolha de materiais granulares (Medina e Motta, 2015; Santos et al., 2025; Delgado et al., 2019).

Há divergência quanto à permeabilidade ideal do sublastro: enquanto Indraratna et al. (2011) defendem sua função drenante, Guimarães (2021) admite o uso de solos lateríticos finos. Já a AREMA (2013) recomenda um equilíbrio entre permeabilidade e impermeabilidade para evitar a saturação do subleito.

Variações de umidade associadas ao clima e ao lençol freático reduzem a resistência do solo e elevam as deformações ao longo do tempo (Menezes et al., 2023; Schulz e Poblete, 2019; Selig e Waters, 1994). Esses efeitos se intensificam sob cargas elevadas e drenagem deficiente (Wang et al., 2017). Estudos anteriores mostram melhor desempenho dos solos lateríticos com controle de umidade (Guimarães, 2008; Thuler, 2005; Menezes, 2023), enquanto o excesso hídrico reduz a resistência e o módulo resiliente (Zhang, 2018; Thom e Brown, 1987; Hashem e Zapata, 2013; Nazzal et al., 2020).

Embora o uso do SysTrain em simulações ferroviárias venha crescendo (Ribeiro, 2022; Cruz, 2019; Delgado, 2021; Santos et al., 2024), são raros os estudos que integram o teor de umidade às análises de shakedown. Este trabalho busca preencher essa lacuna, combinando ensaios laboratoriais e simulações com o SysTrain 2.0 para avaliar o impacto da umidade nos limites de shakedown e nas deformações permanentes, visando à melhoria do desempenho estrutural do sublastro.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada com duas amostras de solo (AM03 e AM09) provenientes de São Luís, Mara-

nhão, caracterizadas fisicamente e compactadas na umidade ótima determinada em laboratório. A AM09 teve sua umidade elevada em 1% acima da ótima por umedecimento capilar, enquanto a AM03 foi mantida na condição ótima.

O conceito de shakedown refere-se ao comportamento de um material granular ou solo sob carregamento cíclico, no qual, após um número inicial de ciclos, as deformações permanentes se estabilizam, permitindo que a estrutura suporte carregamentos repetidos sem colapso progressivo. A avaliação envolve variáveis como a tensão axial máxima aplicada (σ_1), a tensão de confinamento (σ_3) e a razão de tensões (σ_1/σ_3), que influenciam diretamente o regime de resposta observado. Os limites de shakedown foram avaliados por ensaios triaxiais de carga repetida, analisando o comportamento mecânico dos solos em diferentes níveis de umidade. Em paralelo, simulações numéricas no software SysTrain 2.0, com o Método dos Elementos Finitos (MEF), permitiram verificar a ocorrência de shakedown e o acúmulo de deformações permanentes, complementando os resultados experimentais com uma análise estrutural das camadas de sublastro.

Caracterização física

A caracterização física do solo foi realizada por meio de uma série de ensaios laboratoriais, seguindo as respectivas normas técnicas. A determinação da massa específica real dos grãos foi conduzida conforme a NBR 6558. A análise granulométrica foi realizada de acordo com a NBR 7181, enquanto os limites de liquidez e de plasticidade foram obtidos conforme as normas NBR 6459 e NBR 7180, respectivamente. O ensaio de compactação seguiu a NBR 7182. Além disso, foram aplicados o ensaio Mini-MCV, conforme o procedimento estabelecido pelo DNIT 259, e o ensaio de perda de massa por imersão, segundo a norma DNER ME 256.

Caracterização Mecânica

Os ensaios foram realizados utilizando o equipamento SIGEO (v.1.0) (Figura 1) localizado no Laboratório de Solos do Instituto Militar de Engenharia (IME). As amostras foram compactadas em moldes cilíndricos (100 × 200 mm) utilizando energia do Proctor Modificado, aplicada com um soquete ma-

nual de 2,5 kg em 10 camadas, com 33 golpes por camada, de acordo com as normas DNIT 134 (2018) e DNIT 179 (2018).



Figura 1: Equipamento triaxial de cargas cíclicas

Os ensaios de MR, realizados em duplicata conforme a DNIT 134/2018, foram processados no Sys-Train (MRCalc) para obtenção dos parâmetros do modelo e R², adotando-se o modelo composto de Pezo (1993), amplamente utilizado no dimensionamento de pavimentos no Brasil.

Os ensaios de deformação permanente (DP) foram conduzidos com frequência de 2 Hz (120 ciclos/min), sendo o regime de shakedown avaliado pela deformação acumulada entre os ciclos 3000 e 5000, conforme a norma EN 13286-7/2004. Os critérios de classificação foram:

$$\epsilon_{5000} - \epsilon_{3000} < 0,045 \times 10^{-3} \text{ - Shakedown}$$
$$0,045 \times 10^{-3} \leq \epsilon_{5000} - \epsilon_{3000} < 0,4 \times 10^{-3} \text{ - Escoamento plástico}$$
$$\epsilon_{5000} - \epsilon_{3000} \geq 0,4 \times 10^{-3} \text{ - Colapso incremental}$$

Onde ϵ_{5000} e ϵ_{3000} correspondem às deformações axiais permanentes medidas no ciclo 5000 e no ciclo 3000 de carregamento, respectivamente.

Procedimento de Condicionamento de Umidade

A variação da umidade foi realizada por umedecimento capilar (Figura 2), posicionando-se as amostras sobre pedra porosa em recipiente com água. Elevações superiores a 1% acima da umidade ótima geraram deformações excessivas, sendo adotado como limite prático o acréscimo de aproximadamente 1%. Durante o processo, as amostras foram rotacionadas a cada 15–20 min para uniformizar a umidade, com tempos de imersão de 40 min (AM03) e 60 min (AM09). Após condicionamento, permaneceram 50 min em câmara úmida, sendo então pesadas e secas em estufa para determinação da umidade final.

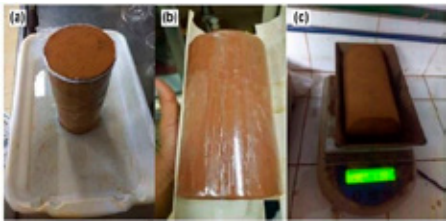


Figura 2: Procedimento de Condicionamento de Umidade

Simulações no Systrain

Foram realizadas simulações numéricas via método dos elementos finitos no software SysTrain 2.0 para avaliar o desempenho das amostras AM03 e AM09 como sublastro sob diferentes condições de umidade. Quatro cenários foram analisados, todos com carga de 32,5 t/eixo: Cenário 1 (AM03 com umidade ótima), Cenário 2 (AM03 com umidade 1% acima da ótima), Cenário 3 (AM09 com umidade ótima) e Cenário 4 (AM09 com umidade 1% acima da ótima). A geometria da superestrutura foi mantida constante em todas as simulações, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de entrada para a simulação da infraestrutura ferroviária

Elemento	Descrição	
Trilhos	• Bitola: 1,6 m	• Módulo de elasticidade: 210 GPa
	• Seção: TR-68	• Coeficiente de Poisson: 0,3
	• Peso específico: 7867,01 kg/m³	
Dormentes	• Monobloco de concreto protendido	• Seção trapezoidal
	• Comprimento: 2,8 m	• Altura: 20 cm
	• Largura da base: 30 cm	• Largura do topo: 28 cm
	• Peso específico: 2400 kg/m³	• Módulo de elasticidade: 33 GPa
Fixações	• Coeficiente de Poisson: 0,2	• Espaçamento: 60 cm
	• Elemento de mola	• Coeficiente de rigidez: 170.000 kN/m (eixo z)
	• Coeficiente de rigidez: 17.000 kN/m (eixos x/y)	
Lastro	• Pedra britada	• Espessura: 30 cm
	• Ombreira: 40 cm de largura	• Talude (H:V) 1:1
	• Inclinação transversal: 3% em ambos os lados	• Peso específico: 1730 kg/m³
Sublastro	• Espessura: 25 cm	• Material argiloso resiliente
	• Comportamento elástico não linear	• Ombreira: 50 cm de largura
	• Talude: 1:1,2 nas extremidades	• Inclinação transversal: 1%
Subleito	• Espessura: 300 cm	• Comportamento: elástico linear
	• Módulo resiliente: 100 MPa	• Ombreira: 2 m de largura
	• Talude: 1:1,5 nas extremidades	• Inclinação transversal: 1%
Carregamento	• Vagões tipo hopper	• Distância entre engate e eixo: 1,21 m
	• 2 truques	• Distância entre eixos: 1,7 m
	• Distância entre truques: 13,945 m	• Carga por eixo: 32,5 t/eixo
	• Posição de referência: ponto médio entre dormentes	• Número de eixos: 4
	• 1º eixo selecionado: 3	• Simetria: sim

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da caracterização física das amostras estão dispostos na Tabela 2, que apresenta os principais parâmetros obtidos nos ensaios de compac-

tação, granulometria e limites de Atterberg, classificação SUCS e HRB, destacando que ambos os solos apresentam um comportamento distinto em relação à distribuição de partículas e aos limites de consistência.

Tabela 2: Ensaios de compactação e caracterização

Amostra	Método	Densidade Máxima seca (g/cm³)	Umidade Ótima (%)	Limite de Líquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	MCT	HRB	SUCS
AM03	Modificado	2,048	10,33	20,46	13,26	7,2	NA'	A-4	SM
AM09	Modificado	2,043	10,45	20,28	15,26	5,02	LG'	A-4	ML-CL

Os solos analisados foram classificados como NA' e LG' segundo o MCT (DNIT 259, 2023), conforme Tabela 2. A compactação Proctor modificada revelou massas específicas secas semelhantes: 2,048 g/cm³ (AM03) e 2,043 g/cm³ (AM09). Os índices de plasticidade foram baixos (7,2% e 5,02%), favorecendo a compactação e a estabilidade volumétrica. A granulometria indicou predominância de areia fina, fator relevante sob carregamentos cíclicos.

As umidades ótimas foram próximas: 10,33% (NA') e 10,45% (LG'). Conforme Menezes et al. (2023), solos não lateríticos perdem desempenho acima da umidade ótima, com menor módulo resiliente e maiores deformações. O solo laterítico, apesar de maior coesão por argilominerais, também é sensível à umidade. O controle hídrico nas camadas ferroviárias é, portanto, essencial, sobretudo em regiões tropicais com alta incidência de chuvas (Garmabaki, 2021).

Módulo Resiliente

O módulo de resiliência (MR) da AM03 variou entre 359 MPa e 852 MPa, com valor médio de

577 MPa, dentro da faixa esperada para solos dessa classificação. Guimarães (2009) identificou valores entre 60 e 900 MPa em solos brasileiros, e Gomes et al. (2018) apontam médias entre 151 e 553 MPa para solos NA', o que indica que os resultados deste estudo se situam na faixa superior dessas estimativas. A AM09 apresentou maior MR médio (638 MPa), com variação entre 433 MPa e 998 MPa, revelando alta variabilidade. Esses valores superam os encontrados por Guimarães (2009) e Gomes (2018).

Deformação Permanente e Shakedown

Com os resultados dos ensaios de deformação permanente, foi possível estabelecer o limite de Shakedown como recomendado pela norma europeia EN 13286-7. Utilizou-se o modelo de Werkmeister (2003), cujos limites de Shakedown apresentam uma relação exponencial entre as tensões aplicadas. Para este estudo, foram geradas as curvas de limite de Shakedown para os solos em estudo (AM03 e AM09). A Tabela 3 apresenta as tensões utilizadas e a Figura 3 apresenta as curvas em função da tensão principal e a razão de tensões.

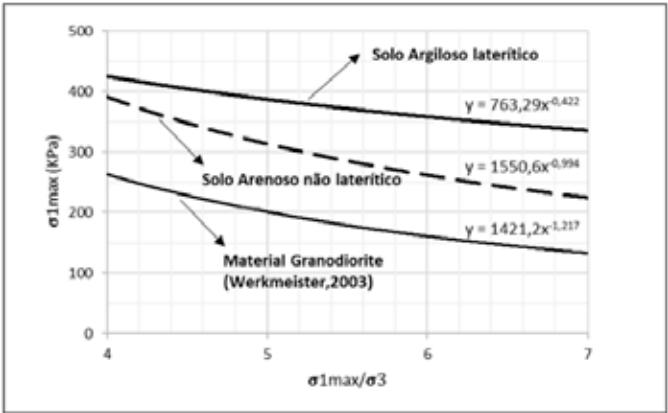


Figura 3: Limites de shakedown das amostras estudadas, comparados ao limite da granodiorito investigada por Dawson (2003)

Observa-se que ambos os solos analisados apresentaram comportamento significativamente superior em comparação ao material de referência (granodiorito), evidenciado por limites de shakedown consideravelmente mais elevados. Isso reflete sua maior capacidade de suportar cargas repetidas antes de entrar em regime de deformação permanente.

Influência do teor de umidade

Foram realizados ensaios com corpos de prova moldados com umidade aproximadamente 1% acima do teor ótimo, por meio de umedecimento

por capilaridade. Abordagens semelhantes foram adotadas por outros autores. Latvala et al. (2022) demonstraram que a resistência à carga cíclica de materiais envelhecidos de sublastro diminui significativamente com o aumento do teor de umidade, enquanto Vandoorne et al. (2021) enfatizaram a importância da medição da sucção do solo e da temperatura para melhor capturar a dinâmica de umidade em campo e sua influência no desempenho mecânico de estruturas ferroviárias. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados. Os gráficos correspondentes foram elaborados com base nesses dados, conforme ilustrado na Figura 4.

Tabela 3: Análise do shakedown – Teor de umidade ótimo

Amostra	Relação de Tensões (σ1/σ3)	Tensão Principal σ1 (kPa)	Tensão Confinamento ε3 (kPa)	(ε5000 - ε3000)	Comportamento
AM03	3	270	90	0,045	Escoamento plástico
	3	240	80	0,021	Shakedown
	4	280	70	0,08	Escoamento plástico
	4	240	60	0,012	Shakedown
	5	300	60	0,076	Escoamento plástico
	5	250	50	0,019	Shakedown
	6	180	30	0,057	Escoamento plástico
	6	120	20	0,019	Shakedown
AM09	3	330	110	0,061	Escoamento plástico
	3	300	100	0,04	Shakedown
	4	320	80	0,045	Escoamento plástico
	4	280	70	0,029	Shakedown
	5	300	60	0,051	Escoamento plástico
	5	250	50	0,028	Shakedown
	6	300	50	0,056	Escoamento plástico
	6	240	40	0,033	Shakedown

Tabela 4: Análise do shakedown - acima do teor de umidade ótimo

Amostra	Razão de Tensões (σ1 / σ3)	Tensão principal σ1 (kPa)	Tensão Confinante σ3 (kPa)	ε5000 - ε3000	Comportamento
AM03	3	180	60	0,33	Escoamento Plástico
	3	150	50	0,08	Shakedown
	4	200	50	0,068	Escoamento Plástico
	4	160	40	0,02	Shakedown
	5	200	40	0,05	Escoamento Plástico
	5	150	30	0,027	Shakedown
	6	240	40	0,022	Escoamento Plástico
	6	180	30	0,013	Shakedown
AM09	3	270	90	0,09	Escoamento Plástico
	3	240	80	0,031	Shakedown
	4	240	60	0,075	Escoamento Plástico
	4	200	50	0,034	Shakedown
	5	250	50	0,05	Escoamento Plástico
	5	200	40	0,041	Shakedown
	6	300	50	0,045	Escoamento Plástico
	6	240	40	0,02	Shakedown

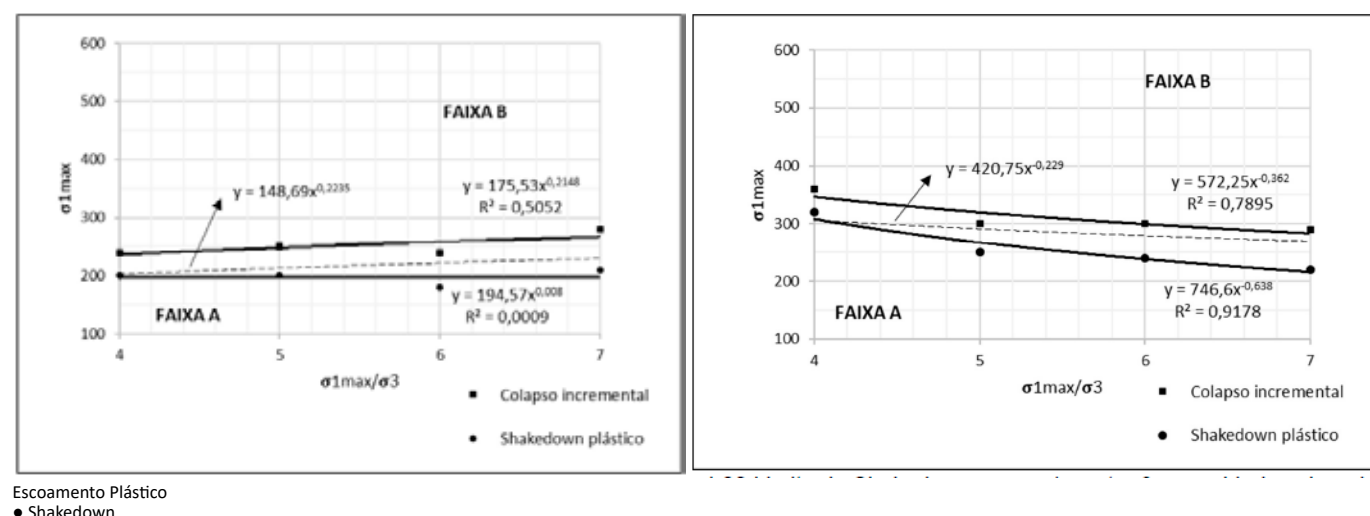


Figura 4: Limites de shakedown: (a) AM03 acima da umidade ótima. (b) AM09 acima da umidade ótima

A análise do efeito da variação da umidade é relevante para avaliar a resposta do material frente a alterações nas condições de saturação em campo, considerando especialmente pavimentos construí-

dos em regiões costeiras como a Ilha de São Luís. A Figura 5 apresenta uma comparação entre os limites de shakedown obtidos nas duas condições de umidade para as amostras estudadas.

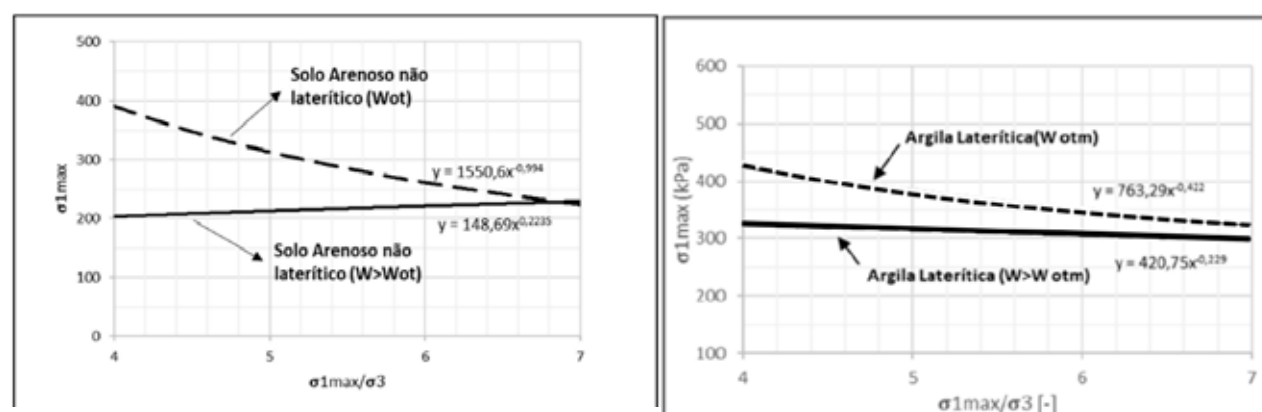


Figura 5: Limite de shakedown, teor ótimo e acima do teor ótimo – (a) AM03 e (b) AM09

Para a AM03 (solo NA'), a curva do limite de shakedown com umidade acima da ótima apresentou redução de aproximadamente 50% para a razão de tensões igual a 4, com diferença progressivamente menor até se tornar praticamente insignificante na razão 7. Esse comportamento indica que o efeito da umidade elevada sobre o limite de shakedown diminui com o aumento da razão de tensões aplicadas. No caso da AM09, a redução do limite de shakedown variou entre 20% e 25% em relação à umidade ótima. Assim como na AM03, a diferença entre as curvas também tende a se reduzir conforme aumenta a razão de tensões. Comparativamente, a AM03 apresentou maior sensibilidade, o que

pode estar relacionado às características lateríticas da AM09, como a presença de hidróxidos de alumínio que favorecem a cimentação natural e afetam as tensões de sucção.

Apesar da menor sensibilidade da AM09, ambas as amostras demonstraram influência significativa da umidade, conforme evidenciado pelas curvas obtidas segundo Werkmeister et al. (2003) e a norma EN 13286-7 (2004). Os resultados reforçam a importância de se considerar variações hidrológicas na análise do comportamento mecânico de solos tropicais, sobretudo em projetos de pavimentos em regiões sujeitas à saturação.

Simulações no Systrain

A verificação de shakedown implementada no Sys-Train é baseada na equação proposta por Werkmeister (2003), conforme apresentada na Equação 1:

$$\sigma_{1(max)} = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)^\beta \quad (1)$$

Onde:

- σ_{1max} – tensão axial máxima admissível (limite de shakedown) para a condição de confinamento analisada;
- σ_1 – tensão axial aplicada no ensaio triaxial de carga repetida (soma da tensão desviadora e da tensão de confinamento);
- σ_3 – tensão de confinamento;
- α e β – parâmetros do material.

No Systrain, a verificação de shakedown é feita por meio da razão $S1/S1max$, que compara a tensão vertical aplicada ($\sigma_d + \sigma_c$) com a tensão axial máxima admissível ($S1máx$), determinada pela Equação (1), em função da tensão de confinamento e dos parâmetros σ e β obtidos nos ensaios experimentais. Para que o solo se mantenha em regime de shakedown, essa razão deve ser inferior a 1.

As Figuras 6 e 7 apresentam o comportamento da AM03 como sublastro ferroviário, nos Cenários 1 (simulação com umidade ótima) e 2 (umidade induzida por capilaridade). No Cenário 1, predominam valores de $S1/S1max < 1$, exceto sob os eixos de carga, onde ocorrem concentrações acima do limite, indicando possível acúmulo de deformações mesmo em condição ideal de umidade.

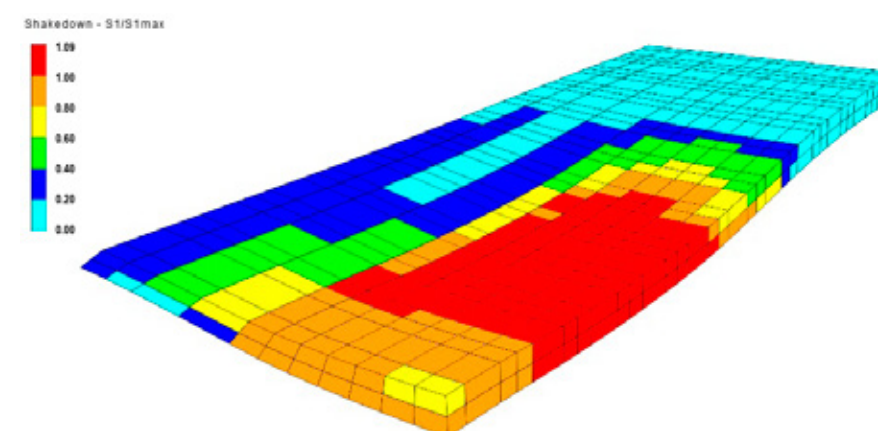


Figura 6: Verificação de shakedown na camada de lastro – Cenário 1 (umidade ótima)

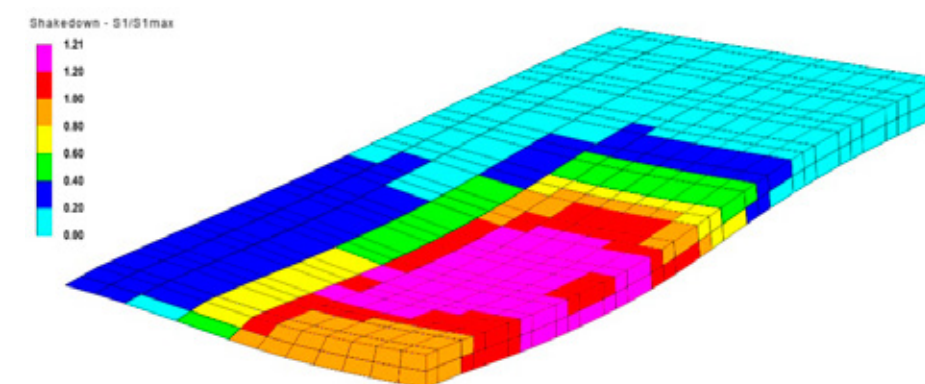


Figura 7: Verificação de shakedown na camada de lastro – Cenário 2 (umidade acima da ótima)

No Cenário 2, observa-se aumento das regiões onde $S_1/S_{1max} > 1$, indicando maior criticidade e risco de deformações progressivas em comparação ao Cenário 1. Esse comportamento reforça a vulnerabilidade do solo ao excesso de umidade, que reduz sua capacidade de suporte. A comparação dos valores de S_{1max} , 88,81 kPa no Cenário 1 e 80,01 kPa no Cenário 2, indica que a umidade acima da ótima compromete o desempenho mecânico do sublastro.

Nas simulações com a amostra AM09 como

sublastro ferroviário (Figuras 8 e 9), mesmo com aumento de umidade, a camada permaneceu em regime de shakedown ($S_1/S_{1max} < 1$). No entanto, no Cenário 4 (Simulação com umidade acima da umidade ótima), observou-se maior concentração de tensões e ampliação da zona crítica, evidenciando o impacto negativo da umidade excessiva. Os resultados reforçam que a variação da umidade afeta significativamente o comportamento mecânico do sublastro, conforme apontado pela literatura.

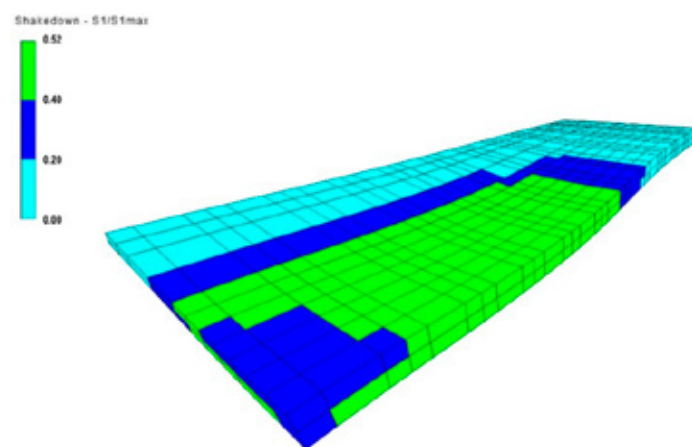


Figura 8: Verificação de shakedown na camada de lastro – Cenário 3 (umidade ótima)

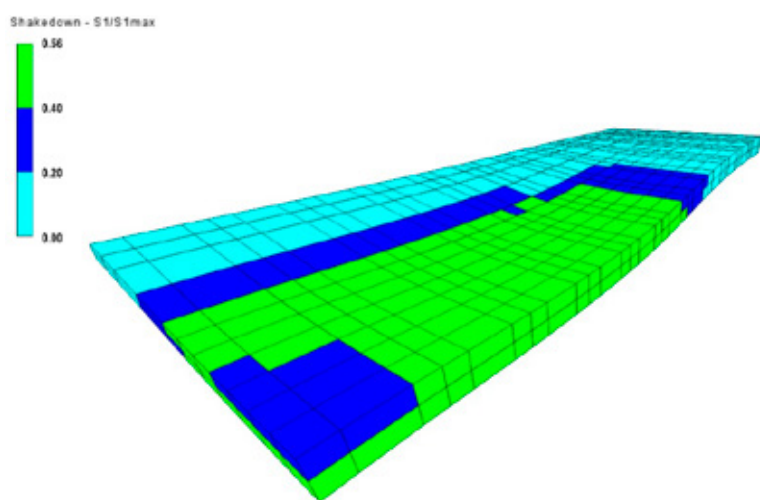


Figura 9: Verificação de shakedown na camada de lastro – Cenário 4 (umidade acima da ótima)

CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o impacto do teor de umidade no comportamento de shakedown do sublastro ferroviário, por meio de ensaios laboratoriais e simulações no SysTrain 2.0, com dois solos tropicais representativos. Verificou-se que o excesso de umidade reduz significativamente os limites de shakedown, ou seja, a tensão cíclica máxima que o material é capaz de suportar antes de entrar em regime de deformação progressiva, chegando a reduções de até 50% na AM03 (solo não laterítico) e de 20%–25% na AM09 (laterítico), o que favorece a ocorrência de deformações permanentes.

Apesar da limitação de um único ensaio por condição (conforme DNIT 179/2018), a magnitude das reduções demonstra a sensibilidade dos materiais à variação de umidade. Observou-se que o aumento da razão σ_1/σ_3 tende a mitigar os efeitos da umidade. A AM03 apresentou falha progressiva sob umidade elevada, enquanto a AM09 manteve-se estável, ainda que mais suscetível ao escoamento.

As simulações confirmaram os dados experimentais, com redução de S_{1max} de 88,81 para 80,01 kPa na AM03 e de 171,65 para 164,22 kPa na AM09. O solo laterítico mostrou melhor desempenho estrutural, apontando seu potencial como sublastro em regiões tropicais. Reforça-se, assim, a necessidade de controle rigoroso da umidade para garantir a durabilidade e estabilidade das vias ferroviárias.

Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6558: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo

com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1996.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. AREMA Manual for railway engineering. Lanham, MD, USA: AREMA, 2013.

CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 13286-7:2004 – Unbound and Hydraulically Bound Mixtures. Part 7: Cyclic Load Triaxial Tests for Unbound Mixtures. London, UK: CEN, 2004.

DELGADO, B.; FONSECA, A.; FORTUNATO, E.; MAIA, P. Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: laboratory evaluation. Transportation Geotechnics, v. 20, p. 100243, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100243>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134-ME – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Instrução de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 179-IE – Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Brasília: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 259-CLA – Solos – Classificação de solos tropicais finos para fins rodoviários utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Brasília: DNIT, 2023.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1984.

GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

GUIMARÃES, A.; MOTTA, L. D. A study on permanent deformation of lateritic soils including the shakedown concept. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

GUIMARÃES, A. C. R.; FILHO, J. C. S.; CASTRO, C. D. Contribution to the use of alternative material in heavy haul railway sub-ballast layer. Transportation Geotechnics, v. 30, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100524>.

GARMABAKI, A. H. S. et al. Adapting railway maintenance to climate change. Sustainability, v. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132413856>.

GOMES, M. S.; GUIMARÃES, A. C. R.; MARQUES, M. E. S. Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos. Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais, v. 9, 2018.

HASHEM, E. B.; ZAPATA, C. E. Enhancement of permanent deformation model for unbound materials used by DARwin-

-ME. In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, 2013.

INDRATNA, B.; SALIM, W. Mechanics of Ballasted Rail Tracks: A Geotechnical Perspective. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 2005.

INDRATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKATKAMJORN, C. Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.

LATVALA, J.; KOLISOJA, P.; LUOMALA, H. The cyclic loading resistance of old railway track sub-ballast materials at different water contents. Transportation Geotechnics, v. 35, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100772>.

MENEZES, L. C. A. et al. Analysis of the influence of moisture variation on the behavior of tropical soils of Carajás Railway. Applied Sciences, v. 13, 7909, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13137909>.

MEDINA, J.; MOTTA, L. G. Pavement Mechanics. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2015.

NAZZAL, M. D. et al. Effect of moisture content on the shakedown limits of base course materials. Transportation Research Record, v. 2675, p. 192–202, 2020. <https://doi.org/10.1177/0361198120957312>.

PEZO, R. F. A general method of reporting resilient modulus tests of soils, a pavement engineer's point of view. In: 72nd Annual Meeting of the TRB, Washington, DC, 1993.

RIBEIRO, F.; NASCIMENTO, F.; SILVA, M. Environmental performance analysis of railway infrastructure using life cycle assessment: selecting pavement projects based on global warming potential impacts. Journal of Cleaner Production, v. 365, 132558, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132558>.

SANTOS, W. W. et al. Comprehensive analysis of railway pavement with box test: characterization and evaluation of resilient modulus of steel slag ballast. In: 5th International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG), 2024. Springer: Singapore, 2025. p. 171–181.

SANTOS, W. W. dos; COELHO, L. M.; MONTEIRO, S. N.; MARQUES, M. E. S.; GUIMARÃES, A. C. R. Avaliação da escória de aciaria como agregado alternativo sustentável para lastro ferroviário: uma abordagem baseada na teoria de shakedown. Buildings, v. 14, n. 11, art. 3546, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14113546>

SCHULZ-POBLETE, M.; GRABE, P.; JACOBSZ, S. The influence of soil suctions on the deformation characteristics of railway formation materials. Transportation Geotechnics, v. 18, p. 111–123, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.11.006>.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. Track Geotechnology and Substructure Management. 14. ed. London, UK: Thomas Telford, 1994.

SOLIMAN, H.; SHALABY, A. Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content. Transportation Geotechnics, v. 4, p. 1–12, 2015.

SPADA, J. L. G. A Pavement Mechanics Approach Applied to the Understanding of the Stress-Strain Behavior Mechanism of Railway Tracks. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

THOM, N. H.; BROWN, S. F. Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base. Transportation Research Record, n. 1121, p. 50–56, 1987.

THULER, R. B. Study of soils from the state of Rio de Janeiro for application in low-traffic volume roads. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VANDORNE, R.; GRÄBE, P.; HEYMANN, G. Soil suction and temperature measurements in a heavy haul railway formation. Transportation Geotechnics, v. 31, 100675, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100675>.

WANG, H. et al. Analysis of bridge transition zones in railways considering the moisture condition of the ballast and subballast. Applied Sciences, v. 7, 1208, 2017. <https://doi.org/10.3390/APP7121208>.

WERKMEISTER, S., NUMRICH, R., DAWSON, A. R., & WELNER, F. (2003). Design of Granular Pavement Layers Considering Climatic Conditions. Transportation Research Record, 1837(1), 61-70. <https://doi.org/10.3141/1837-07>

ZHANG, J. et al. Variation of resilient modulus with soil suction for cohesive soils in South China. International Journal of Civil Engineering, v. 16, p. 1655–1667, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0315-y>.



SIMULAÇÃO LABORATORIAL DO ENVELHECIMENTO DE LIGANTE ASFÁLTICO: ANÁLISE REOLÓGICA COMPARATIVA

ALTERNATIVE LABORATORY EVALUATION PROTOCOLS AIMED AT SIMULATING THE LONG-TERM AGING OF ASPHALT BINDERS, FOCUSING ON PRACTICAL SOLUTIONS FOR LABORATORIES WITH LIMITED EQUIPMENT AVAILABILITY

*Osires de Medeiros Melo Neto¹
Albaniza Maria da Silva Lopes²
Alysson Benício Ferreira Diniz³
Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena³*

¹ Universidade Federal de Lavras, osiresdemedeiros@gmail.com

² Instituto Federal de Educação da Paraíba, albaniza.engcivil@gmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande, alyssondinizjsb@gmail.com; ledach@uol.com.br

DOI: 10.21526/abpv.v54.4

RESUMO

Este estudo avaliou protocolos alternativos de envelhecimento laboratorial com o objetivo de simular o envelhecimento a longo prazo de ligantes asfálticos, considerando a limitação de acesso ao equipamento *Pressure Aging Vessel* (PAV). Um ligante asfáltico classificado como 50/70 foi submetido a diferentes procedimentos de envelhecimento, incluindo RTFO prolongado (5 h 20 min), RTFO seguido de estufa por 72 h, 120 h e 216 h, e RTFO combinado com radiação ultravioleta (UV). Como referência de envelhecimento de campo, foi utilizado um ligante recuperado de um material fresado da camada de revestimento asfáltico da rodovia BR-230, na Paraíba. A caracterização reológica incluiu a determinação do *Performance Grade* (PG), Índice de Envelhecimento (IE), Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G^*), parâmetro *Glover-Rowe* (G-R) e ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR). Os resultados demonstraram que os protocolos RTFO prolongado (5h e 20 min) e RTFO + Estufa (216 h) apresentaram os desempenhos reológicos mais próximos ao ligante envelhecido em campo, especialmente quanto à rigidez, resistência à deformação permanente e suscetibilidade ao envelhecimento. Embora o protocolo RTFO + UV tenha promovido aumento na temperatura contínua de PG, seu desempenho foi inferior nos demais parâmetros avaliados. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os protocolos ($p < 0,05$), com destaque para o G-R como o parâmetro mais sensível à diferenciação entre os níveis de envelhecimento. Este trabalho fornece subsídios práticos e científicos para a escolha de metodologias de envelhecimento acelerado, contribuindo para a tomada de decisão em laboratórios que não dispõem do PAV.

Palavras-chave: Estufa, Reologia, RTFO, Temperatura, UV.

ABSTRACT

This study evaluates alternative laboratory aging protocols aimed at simulating the long-term aging of asphalt binders, focusing on practical solutions for laboratories with limited equipment availability, particularly in the absence of the Pressure Aging Vessel (PAV). A 50/70 penetration grade asphalt binder was subjected to various aging procedures, including prolonged RTFO (5 h 20 min), RTFO combined with oven aging at 72 h, 120 h, and 216 h, and RTFO followed by UV exposure. A field-aged binder, recovered from a milled asphalt layer on BR-230 highway in Paraíba, Brazil, served as the reference for natural aging. Rheological characterization was performed using Performance Grade (PG), Aging Index (AI), Dynamic Shear Modulus (G^), Glover-Rowe parameter (G-R), and Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR). The results demonstrated that the extended RTFO (5 h 20 min) and the RTFO + Oven (216 h) protocols produced rheological responses closest to the field-aged binder, especially in terms of stiffness, aging susceptibility, and rutting resistance. Although RTFO + UV increased PG temperature, it underperformed in other critical parameters. Statistical analysis confirmed significant differences among the protocols ($p < 0.05$), with G-R showing the highest sensitivity in differentiating aging levels. This research offers practical guidance for selecting effective laboratory aging procedures, providing a scientifically supported alternative for simulating long-term field aging in asphalt binders when PAV equipment is unavailable.*

Keywords: Oven, Rheology, RTFO, Temperature, UV.

INTRODUÇÃO

Agentes atmosféricos, como a radiação solar, a umidade proveniente da chuva e do ar, além das variações de temperatura, exercem influência considerável no comportamento dos ligantes asfálticos, promovendo alterações em suas características químicas, físicas e reológicas. Essas modificações impactam diretamente as propriedades e o desempenho das misturas asfálticas, sendo o envelhecimento do ligante o principal responsável por tais efeitos. A avaliação dos efeitos do envelhecimento nos ligantes asfálticos é fundamental, uma vez que este fenômeno afeta de maneira direta a vida útil dos pavimentos. Por esse motivo, a temática tem sido amplamente investigada, com foco na composição química e nas propriedades reológicas dos ligantes (Mazzoni *et al.*, 2020; Qian *et al.*, 2021).

O envelhecimento dos ligantes asfálticos ocorre tanto nas fases iniciais de produção, transporte e compactação das misturas asfálticas — devido à exposição a elevadas temperaturas e à perda de voláteis — quanto ao longo do tempo de serviço do pavimento, em razão de processos oxidativos. Esses mecanismos resultam em um aumento progressivo da rigidez do ligante, redução da flexibilidade das misturas, formação de trincas e, consequentemente, na deterioração do pavimento e perda de desempenho estrutural e funcional. Contudo, trata-se de um fenômeno complexo e de difícil quantificação. Nesse contexto, a definição de condições laboratoriais de ensaio que reproduzam, de forma representativa, o nível real de envelhecimento dos revestimentos asfálticos em campo tem se configurado como um dos principais desafios para a comunidade científica (Ding *et al.*, 2021; Lopes *et al.*, 2025).

Alguns métodos foram desenvolvidos com o objetivo de simular e acelerar o envelhecimento dos ligantes asfálticos em laboratório, incluindo o envelhecimento de curto prazo por meio da estufa RTFO (*Rolling Thin Film Oven*) e o envelhecimento de longo prazo utilizando o PAV (*Pressure Aging Vessel*). No entanto, a literatura destaca que a realização do ensaio PAV ainda enfrenta limitações em alguns laboratórios, principalmente devido à indisponibilidade do equipamento.

Silva Lopes *et al.* (2023) apontam que a tem-

peratura é uma das variáveis de maior influência no envelhecimento dos materiais asfálticos. Ma *et al.* (2021) investigaram os comportamentos mecânicos dinâmicos e os modelos constitutivos de ligantes e misturas asfálticas submetidos a distintos métodos de envelhecimento. Os resultados evidenciaram um aumento no módulo complexo do ligante após o envelhecimento. Ademais, a análise comparativa entre os métodos PAV, radiação ultravioleta (UV) e RTFO indicou que o RTFO exerceu o menor impacto sobre o módulo complexo do ligante.

O equipamento PAV promove o envelhecimento de longo prazo dos ligantes asfálticos. Nesse procedimento, a amostra é submetida a condições controladas de temperatura e pressão, simulando o envelhecimento em serviço correspondente a um período de 7 a 10 anos. Diante das limitações laboratoriais decorrentes da indisponibilidade desse equipamento, investigaram-se metodologias alternativas para o envelhecimento acelerado a longo prazo, empregando-se estufa convencional, estufa rotativa (RTFO) e radiação ultravioleta (UV) em ligante asfáltico classificado com penetração 50/70.

Como análise comparativa, este estudo avaliou amostras de ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 submetidas a diferentes protocolos de envelhecimento acelerado a longo prazo em laboratório em relação a um ligante asfáltico recuperado de material fresado proveniente de uma camada de revestimento asfáltico da BR-230, no estado da Paraíba. Dessa forma, as propriedades reológicas das amostras envelhecidas em laboratório foram comparadas às do ligante recuperado, com o objetivo de identificar qual protocolo reproduz um grau de envelhecimento semelhante ou mais próximo ao do ligante efetivamente envelhecido a longo prazo sob condições reais de intempéries em campo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Ligantes Asfálticos

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa laboratorial foi classificado como 50/70, com temperatura máxima de Performance Grade (PG) de 64 °C. A escolha desse ligante justifica-se pela sua ampla aplicação na região Nordeste do Brasil, local onde o estudo foi

conduzido. O ligante asfáltico recuperado foi obtido a partir de material fresado proveniente de uma camada de revestimento asfáltico localizada no km 15 da BR-230, também na região Nordeste do Brasil. O pavimento original era constituído por uma mistura asfáltica a quente do tipo concreto asfáltico denso (CAD), com tempo de serviço estimado entre 7 e 8 anos. A extração do ligante do material fresado foi realizada utilizando o equipamento Rotarex, empregando-se percloroetileno como solvente, cuja temperatura de ebulição é de 121 °C, conforme especificado na norma ASTM D2172 (2017). O processo de recuperação do ligante foi realizado em um evaporador rotativo, operando a uma temperatura de aproximadamente 60 °C ± 10 °C, durante cerca de 2 horas, sob vácuo de 0,035 mmHg. A sequência operacional adotada foi: (i) introdução de 200 mL do material extraído no balão de evaporação; (ii) início da rotação em velocidade média e aplicação do vácuo a uma temperatura inicial de 50 °C; (iii) elevação gradual da temperatura à medida que o percloroetileno era evaporado e condensado, até atingir 70 °C; e (iv) manutenção da operação a 70 °C por aproximadamente 1 hora, visando à completa remoção do solvente. Esse procedimento foi utilizado nos estudos de Melo Neto *et al.* (2022) e Melo Neto (2025), os quais, por meio de ensaio de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), evidenciaram a eficiência do processo e a ausência de solvente nas amostras recuperadas. Os autores destacam que a aplicação de vácuo favorece a extração do solvente, dispensando a necessidade de temperaturas mais elevadas.

Protocolos de envelhecimento laboratorial

Rolling Thin Film Oven (RTFO)

Esse procedimento é amplamente empregado para simular e quantificar os efeitos do calor e da exposição ao ar sobre uma película em movimento de materiais asfálticos semissólidos durante o processo de usinagem, sendo regulamentado por especificações brasileiras, europeias e americanas. A execução dos ensaios seguiu as recomendações da norma ASTM D2872 (2019). A simulação do envelhecimento do ligante foi realizada durante 85 minutos, à temperatura de 163 °C. Nesse processo, amostras previamente aquecidas, com massa de 35 gramas, permaneceram em rotação contínua e fo-

ram submetidas à aplicação de jatos de ar a cada 3 ou 4 segundos, conforme especificado na norma. Os efeitos do envelhecimento foram avaliados com base nas variações das propriedades do ligante, tais como viscosidade, ductilidade, penetração e ponto de amolecimento, determinadas antes e após o ensaio.

Envelhecimento a longo prazo no RTFO

O método empregado neste protocolo foi proposto por Subbarao Nagabhushanarao e Vijayakumar (2021). O processo consiste na realização de vários ciclos de envelhecimento RTFO a 163°C, sendo que cada ciclo tem a duração de 85 minutos. As amostras de ligante foram submetidas a 5 horas e 20 minutos no RTFO, como uma alternativa ao teste PAV a 100°C por 20 horas, conforme especificado em ASTM D6521 (2022).

Envelhecimento a longo prazo em estufa convencional

As amostras de ligante foram previamente envelhecidas no RTFO e colocadas em uma estufa por um período de 72, 120 e 216 horas a uma temperatura de 85°C. A estufa utilizada permite uma circulação de ar forçada que auxilia na degradação do ligante. A escolha da temperatura de 85°C e o tempo de duração do protocolo foi ainda fundamentada nos estudos de envelhecimento em misturas asfálticas propostos por Yin *et al.* (2017) e Lopes *et al.* (2023; 2025).

Envelhecimento a longo prazo com radiação UV

Devido à ausência de norma específica para envelhecimento por UV em ligantes asfálticos, o procedimento adotado baseou-se em protocolos descritos por Zeng *et al.* (2015), Menapace e Masad (2017) e Ma *et al.* (2021). As amostras foram previamente envelhecidas no RTFO e posteriormente submetidas ao envelhecimento foto-oxidativo em uma câmara de intemperismo acelerado (Comexim C-UV), instalada no Laboratório de Engenharia de Materiais da UFCG.

O equipamento, com 8 lâmpadas UVB Broadband TL 40W/12 RS SLV/25 (Phillips), simula os efeitos fotoquímicos da radiação solar, com espec-

tro de emissão entre 290–315 nm, e irradiância média de 55 W/m², com controle rigoroso para evitar comprimentos de onda inferiores a 280 nm. As condições de ensaio incluíram temperatura de 60 °C e exposição por 14 dias, com ciclos de 8 h de radiação UV seguidos de 4 h de escuro, conforme Menapace e Masad (2020). A escolha do tempo de exposição e da temperatura foi fundamentada nos estudos de Yin *et al.* (2017) e Xu *et al.* (2022), que correlacionam tais parâmetros a um envelhecimento equivalente a até 23 meses de serviço. A espessura do filme asfáltico foi fixada em 0,40 mm, conforme Nascimento e Faxina (2017), obtida a partir da relação entre massa, densidade do ligante e área da bandeja, seguindo o método DNIT 193 (1996). A Figura 1 apresenta a câmara UV utilizada nesse protocolo de envelhecimento.



Figura 1. Câmara de envelhecimento UV

Avaliação das Propriedades Reológicas

Performance Grade (PG)

Este ensaio é utilizado para categorizar ligantes asfálticos com base em suas características de desempenho sob diferentes condições de temperatura, o ensaio fornece informações sobre a faixa térmica na qual o ligante pode atuar de forma eficaz em aplicações de pavimentação, conforme a norma ASTM D6373 (2021). A partir dos resultados obtidos, é possível calcular o Índice de Envelhecimento (IE), que relaciona o parâmetro G*/senδ do ligante antes e após o envelhecimento a uma determinada temperatura, conforme descrito na Equação (1).

$$IE = [G^*/\text{sen}\delta (\text{envelhecida})] / [G^*/\text{sen}\delta (\text{não envelhecida})] \quad (1)$$

Onde: IE: índice de envelhecimento, G*: módulo de cisalhamento dinâmico, δ: ângulo delta.

Essa abordagem permite avaliar a suscetibilidade do material aos efeitos do envelhecimento. As amostras de ligante, em duplicata, apresentaram 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, tanto antes

quanto depois da aplicação dos protocolos de envelhecimento combinados. Com base nos resultados do módulo de cisalhamento dinâmico (G*) e do ângulo de fase (δ), foi determinado o parâmetro *Glover-Rowe* (G-R) (Rowe, King e Anderson, 2014), reconhecido como um indicador adequado para avaliar a durabilidade dos pavimentos asfálticos em campo (Hu *et al.*, 2024). Considerando o clima tropical predominante no Brasil, as temperaturas máximas nas regiões Norte e Nordeste atingem cerca de 40°C, enquanto na região Centro-Oeste, durante o verão, podem chegar a 45°C. Dessa forma, o cálculo do parâmetro G-R foi realizado a uma temperatura de 46°C, utilizando uma frequência de 10 rad/s, conforme apresentado na Equação (2). Estudos anteriores, como os de Elkashef *et al.* (2018) e Oldham *et al.* (2021), também realizaram a análise desse parâmetro em temperaturas elevadas (44,7°C).

$G-R = [G^*(\cos\delta)^2] / \text{sen}\delta$ (2) Onde: G-R: parâmetro *Glover-Rowe*, δ: ângulo delta.

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Este ensaio avalia a capacidade do ligante asfáltico de recuperar-se de deformações após ser submetido a diferentes níveis de tensão e temperatura, conforme a norma ASTM D7405 (2020). O teste fornece informações sobre a resistência do ligante à deformação permanente, permitindo estimativas mais precisas de seu desempenho sob condições reais de tráfego. As amostras de ligante asfáltico em duplicata foram testadas a uma temperatura de 64°C.

Análise Estatística

A análise estatística foi conduzida em duas etapas. Aplicou-se a análise de variância (ANOVA) de fator único, com nível de significância de 5% (σ = 0,05), para identificar diferenças estatísticas entre os grupos. Em seguida, realizou-se o teste de Tukey para comparações múltiplas. Diferenças superiores à diferença mínima significativa (DMS) foram consideradas estatisticamente relevantes entre os tratamentos.

A Tabela 1 apresenta dos dados obtidos nos ensaios reológicos para as amostras de ligante asfáltico após os procedimentos de envelhecimento laboratoriais, assim como da amostra de ligante recuperado (LR) do material fresado.

RESULTADOS

Avaliação Reológica

Tabela 1. Caracterização reológica das amostras de ligante asfáltico envelhecidas

Parâmetros reológicos		RTFO (85 min)	RTFO (5 h 20 min)	RTFO + Estufa (72 h)	RTFO + Estufa (120 h)	RTFO + Estufa (216 h)	RTFO + UV	LR
PG	Temp.máx. (°C)	64,00	70,00	64,00	70,00	70,00	70,00	76,00
	Temp.máx. contínua (°C)	65,00	72,40	67,20	70,10	70,00	73,00	78,10
	Classificação PG	PG 64-XX (S)	PG 70-XX (H)	PG 64-XX (S)	PG 70-XX (S)	PG 70-XX (H)	PG 70-XX (S)	PG 76-XX (H)
IE	46°C	1,72	4,77	2,48	3,74	3,92	2,10	3,51
	52°C	1,75	4,81	2,47	3,71	3,93	2,12	4,43
	58°C	1,72	4,70	2,43	3,57	3,85	2,10	5,30
	64°C	1,74	4,58	2,38	3,48	3,74	2,04	6,18
G* (kPa)	46°C	36,60	99,20	47,50	70,80	74,40	40,30	69,40
	52°C	14,50	39,50	18,80	28,10	29,70	16,10	34,80
	58°C	6,00	16,20	7,78	11,40	12,30	6,72	17,70
	64°C	2,65	6,94	3,37	4,91	5,29	2,89	9,10
G-R a 46°C		1,01	7,92	1,78	4,14	4,14	1,19	12,34
MSCR	Jnr a 3,2 kPa-1	3,40	1,71	2,98	2,20	1,83	3,34	1,42

Nota: G-R: parâmetro *Glomer-Rowe*, G*: Módulo de Cisalhamento Dinâmico, h: Hora, (H): *Heavy*, IE: Índice de Envelhecimento, Jnr: *Non-Recoverable Creep Compliance*, LR: Ligante Recuperado, Máx.: Máxima, min: Minuto, MSCR: *Multiple Stress Creep and Recovery*, NA: Não Aplicável, PG: *Performance Grade*, RTFO: *Rolling Thin Film Oven*, (S): *Standard*, Temp.: Temperatura, UV: Radiação Ultravioleta, XX: Sem valor determinado.

As amostras de ligante asfáltico envelhecidas no RTFO (5h e 20 min), RTFO + Estufa (120 h), RTFO + Estufa (216 h) e RTFO + UV apresentaram a mesma classificação de PG, com temperatura máxima de 70°C. Verificou-se que nenhum dos protocolos atingiu a classificação PG do ligante recuperado do fresado (76°C). A análise da temperatura máxima contínua do PG demonstrou aumento considerável da rigidez dos ligantes após os diferentes protocolos de envelhecimento acelerado. O ligante recuperado (LR), representando o envelhecimento de campo, atingiu 78,1°C. Dentre os protocolos laboratoriais, o RTFO (5 h 20 min) e RTFO + UV foram os que apresentaram temperatura de PG contínua mais próxima do LR com valores de 72,4°C e 73°C, indicando reduções de 5,7°C e 5,1°C, respectivamente. As amostras de ligante envelhecidas na estufa convencional RTFO + Estufa 120 h (70,1°C) e o RTFO + Estufa 216 h (70,0°C) apresentaram temperaturas equivalentes com reduções de 8°C e 8,1°C em relação ao ligante LR, podendo apontar que o aumento de 96 horas não acarretou aumento considerável de rigidez na amostra, indicando uma estagnação de envelhecimento a partir de 120 horas

em estufa, com aumentos pouco expressivos. Esses resultados indicam que, embora todos os protocolos tenham promovido endurecimento, o RTFO (5 h 20 min) e o RTFO + UV apresentaram maior eficácia na elevação da temperatura contínua do PG, aproximando-se mais das condições de campo.

O Índice de Envelhecimento (IE), calculado a diferentes temperaturas, evidenciou a suscetibilidade de cada protocolo à oxidação térmica e/ou foto-oxidativa. Tomando como referência o valor de 3,51 do LR a 46°C, observou-se que o RTFO (5 h 20 min) obteve o maior IE entre os protocolos laboratoriais (4,77), superando o valor do LR em 35,9%, indicando envelhecimento mais severo. O RTFO + Estufa 216 h apresentou 3,92, apenas 11,7% acima do LR, enquanto o RTFO + Estufa 120 h registrou 3,74, com um incremento de 6,6%. O RTFO + UV obteve um IE de 2,10, 40,2% inferior ao LR, evidenciando sua limitação na replicação do envelhecimento de campo, mesmo com o incremento de rigidez observado no PG. Esses dados indicam que, do ponto de vista de IE, os protocolos com maior tempo de exposição térmica (RTFO 5 h 20 min e RTFO + Estufa 216 h) são os que melhor simularam o envelhecimento natural.

O comportamento do módulo de cisalhamento dinâmico (G*) reforça as tendências observadas nos demais parâmetros. Na temperatura de 46°C, o ligante LR atingiu 69,4 kPa. O RTFO (5 h 20 min) alcançou 99,2 kPa, superando o LR em 42,9%, enquanto o RTFO + Estufa 216 h e o RTFO + UV registraram 74,4 kPa e 40,3 kPa, respectivamente, representando diferenças de 7,2% acima e 41,9% abaixo do LR. Considerando todas as temperaturas analisadas, o RTFO (5 h 20 min) demonstrou o maior ganho de G*, seguido do RTFO + Estufa 216 h, sugerindo maior grau de rigidez e consequentemente maior grau de envelhecimento dentre os protocolos testados. O parâmetro G-R, indicador direto de suscetibilidade à fratura térmica por envelhecimento, reforçou a tendência dos protocolos mais severos. O valor do LR foi 12,34, enquanto o RTFO (5 h 20 min) apresentou 7,92, cerca de 35,8% inferior. O RTFO + Estufa 216 h e o RTFO + Estufa 120 h alcançaram 4,14, com defasagens de 66,5% em relação ao LR. O RTFO + UV apresentou apenas 1,19, 90,4% abaixo do LR, evidenciando sua menor capacidade de reproduzir a condição oxidativa de campo no aspecto de endurecimento reológico avançado. O RTFO (5 h 20 min) foi o único protocolo que se aproximou de forma mais expressiva do G-R do ligante de campo.

A análise do Jnr mostrou redução clara da suscetibilidade à deformação permanente com o avanço do envelhecimento. O LR apresentou 1,42 kPa⁻¹, indicando maior rigidez frente a esforços repetidos. O RTFO (5 h 20 min) alcançou 1,71 kPa⁻¹, apenas 20,4% superior ao LR, enquanto o RTFO + Estufa 216 h (1,83 kPa⁻¹) e o RTFO + Estufa 120 h (2,20 kPa⁻¹) registraram valores 28,9% e 54,9% superiores, respectivamente. O RTFO + UV apresentou 3,34 kPa⁻¹, 135% acima do LR, evidenciando com-

portamento inadequado em termos de resistência à deformação. Assim, os resultados de Jnr reforçam que o RTFO (5 h 20 min) e o RTFO + Estufa 216 h foram os protocolos com maior capacidade de aproximação ao desempenho reológico de campo.

Análise Estatística

A Tabela 2 apresenta os parâmetros estatísticos obtidos nos ensaios reológicos realizados com as amostras de ligante asfáltico envelhecido nos diferentes protocolos laboratoriais. A análise estatística por meio da ANOVA de fator único indicou diferenças estatisticamente significativas entre os protocolos de envelhecimento para todos os parâmetros reológicos avaliados. Para a temperatura máxima do PG, o valor de F calculado (68,57) superou amplamente o F crítico (3,87), com um p-valor de 0,00001, confirmando a existência de diferenças significativas entre os grupos. Resultado semelhante foi observado para a temperatura máxima contínua do PG, com F calculado de 40,87, superior ao F crítico, e p-valor de 0,00004. O parâmetro *Glover-Rowe* (G-R) apresentou a maior discrepância entre os tratamentos, com F calculado de 278,10 e p-valor inferior a 0,00001, demonstrando sensibilidade elevada às diferenças entre os protocolos de envelhecimento. Para o ensaio MSCR, o parâmetro Jnr a 3,2 kPa⁻¹ também apresentou diferença estatisticamente significativa, com F calculado de 9,19, p-valor de 0,00494 e diferença mínima significativa (DMS) de 1,51455. Esses resultados indicam que, para todos os parâmetros analisados, os efeitos dos diferentes procedimentos de envelhecimento sobre as propriedades reológicas do ligante foram estatisticamente relevantes ao nível de 5% de significância.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos para os ensaios reológicos

Parâmetros reológicos		Parâmetros estatísticos				
		gl	F crítico	F calculado	p-valor	DMS
Performance Grade (PG)	Temperatura máxima (°C)	7,00	3,86597	68,57143	0,00001	2,80500
	Temperatura máxima contínua (°C)	7,00	3,86597	40,86699	0,00004	3,73030
Parâmetro G-R a 46°C		7,00	3,86597	278,10320	0,00000	1,39949
Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)	Jnr 3,2 kPa ⁻¹ a 64°C	7,00	3,86597	9,19358	0,00494	1,51455

Nota: DMS: Diferença Mínima Significativa, gl: Grau de liberdade.

DISCUSSÕES

Avaliação Reológica

As amostras envelhecidas por RTFO (5 h 20 min), RTFO + Estufa (120 h), RTFO + Estufa (216 h) e RTFO + UV apresentaram classificação PG de 70°C, inferior ao valor de 76°C do ligante recuperado (LR). Considerando a temperatura contínua de PG, o RTFO (5 h 20 min) e o RTFO + UV alcançaram os valores mais próximos do LR (72,4°C e 73,0°C, respectivamente), enquanto o RTFO + Estufa 120 h (70,1°C) e 216 h (70,0°C) indicaram possível estagnação do envelhecimento térmico após 120 horas. O Índice de Envelhecimento (IE) reforçou esse comportamento, com destaque para o RTFO (5 h 20 min) e RTFO + Estufa 216 h, que superaram o valor do LR em 35,9% e 11,7%, respectivamente, enquanto o RTFO + UV apresentou desempenho inferior (40,2% abaixo do LR).

Os resultados de G^* , *Glover-Rowe* (G-R) e Jnr corroboraram as tendências observadas. O RTFO (5 h 20 min) apresentou o maior G^* (42,9% superior ao LR) e o G-R mais próximo do ligante de campo, embora ainda 35,8% inferior. O RTFO + Estufa 216 h obteve valores intermediários, enquanto o RTFO + UV apresentou o menor desempenho em todos os parâmetros relacionados ao envelhecimento reológico. No ensaio MSCR, o RTFO (5 h 20 min) e o RTFO + Estufa 216 h mostraram os menores desvios em relação ao LR (20,4% e 28,9%, respectivamente), indicando melhor capacidade de reprodução da resistência à deformação permanente observada em campo.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram com Jiang *et al.* (2023), que relataram efeitos mais expressivos no comportamento reológico dos ligantes após o envelhecimento a longo prazo, em comparação ao envelhecimento de curto prazo. Ma *et al.* (2021) destacaram o aumento do parâmetro $G^*/\sin\delta$ após o envelhecimento, tanto em baixas quanto em altas temperaturas, com tendência de redução com o aumento da temperatura, comportamento igualmente identificado neste trabalho. Além disso, Zeng *et al.* (2015) demonstraram que temperaturas abaixo de 60°C promovem apenas efeitos limitados no envelhecimento UV, enquanto a oxidação torna-se significativamente mais inten-

sa a partir de 70°C, resultado que reforça a importância da temperatura nas condições de envelhecimento adotadas neste estudo.

De forma consistente, Cravo (2016) mostrou que o envelhecimento foto-oxidativo, mesmo em temperaturas elevadas (90°C), causou alterações reológicas significativas, evidenciando o papel dominante da temperatura no processo de envelhecimento. Xu *et al.* (2022) também confirmaram que temperaturas superiores a 65°C e tempos de exposição prolongados aceleram de forma expressiva a taxa de envelhecimento, enquanto o prolongamento excessivo do tempo (acima de 10 dias) tende a reduzir essa taxa. Qian *et al.* (2021) identificaram redução no ângulo de fase e melhoria na resistência à deformação permanente após diferentes condições de envelhecimento, com diminuição da taxa de fluência em baixas temperaturas. Complementarmente, Ma *et al.* (2021) reforçaram que o IE aumentou e as deformações permanentes diminuíram, evidenciando que os resultados desta pesquisa estão alinhados com as tendências apontadas na literatura internacional.

Análise Estatística

Os resultados estatísticos confirmaram que os diferentes protocolos de envelhecimento acelerado promoveram alterações significativas nas propriedades reológicas dos ligantes asfálticos. No ensaio de PG, o ligante recuperado (LR) apresentou diferença estatisticamente significativa em relação a todas as demais amostras. Entretanto, as amostras submetidas aos protocolos RTFO + UV, RTFO (5 h 20 min), RTFO + Estufa (120 h) e RTFO + Estufa (216 h) mostraram equivalência estatística entre si. Da mesma forma, os protocolos RTFO e RTFO + Estufa (72 h) também apresentaram comportamento estatisticamente equivalente, sendo ambos significativamente diferentes das demais amostras, o que indica menor grau de envelhecimento.

No parâmetro *Glover-Rowe* (G-R), os ligantes LR e RTFO (5 h 20 min) apresentaram diferenças estatísticas em relação a todas as demais amostras. Embora o valor de G-R do LR tenha sido superior ao do RTFO (5 h 20 min), este protocolo demonstrou valor significativamente maior que os demais, sendo o que mais se aproximou do ligante envelhecido

em campo. As amostras RTFO, RTFO + Estufa (72 h) e RTFO + UV apresentaram valores estatisticamente equivalentes entre si, caracterizando menor grau de envelhecimento. Por outro lado, as amostras RTFO + Estufa (120 h) e RTFO + Estufa (216 h) mostraram comportamento estatisticamente semelhante entre elas. Por fim, na análise do parâmetro Jnr, todos os protocolos, com exceção das amostras RTFO, RTFO + Estufa (72 h) e RTFO + UV, apresentaram comportamento estatisticamente equivalente ao LR, indicando que estas três últimas condições foram as menos representativas no que se refere à simulação do envelhecimento observado no ligante recuperado de campo.

CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa demonstram que o aumento da duração dos protocolos térmicos de envelhecimento, como o RTFO prolongado (5 h 20 min) e a combinação RTFO + Estufa por 216 horas, foi a estratégia laboratorial mais eficiente para reproduzir o envelhecimento de longo prazo observado em ligantes asfálticos de campo. Esses protocolos apresentaram comportamento reológico mais próximo ao do ligante recuperado, especialmente nos parâmetros PG, IE, G^* , G-R e Jnr, fundamentais para a previsão do desempenho e da durabilidade dos pavimentos. Embora o envelhecimento por RTFO + UV tenha promovido incremento na temperatura contínua de PG, seu desempenho inferior nos demais parâmetros indica que o processo foto-oxidativo, isoladamente, não é suficiente para simular adequadamente o envelhecimento natural em campo, nas condições avaliadas.

Do ponto de vista prático, este estudo oferece uma contribuição aplicável à engenharia de pavimentos ao apresentar alternativas laboratoriais viáveis e de fácil implementação para a simulação do envelhecimento de longo prazo, especialmente em situações nas quais a utilização do equipamento PAV não é viável. Os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos relevantes para a tomada de decisão na escolha de protocolos de envelhecimento laboratorial, orientando pesquisadores, projetistas e laboratórios na adoção de metodologias mais representativas das condições reais de serviço dos ligantes asfálticos. Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de análises quí-

micas, como a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com o objetivo de respaldar os achados deste estudo e fortalecer a viabilidade dos métodos alternativos de envelhecimento de longo prazo para ligantes asfálticos.

Referências bibliográficas

- ASTM D2172. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. 2017.
- ASTM D2872. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) Section 8 Instructional Video. 2019.
- ASTM D6373. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. 2021. ASTM D6521. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). 2022.
- ASTM D7405. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. 2020.
- CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos. 2016.
- DING, Heyang; WANG, Hainian; QU, Xin; VARVERI, Aikaterini; GAO, Junfeng; and YOU, Zhanping. Towards an understanding of diffusion mechanism of bio-rejuvenators in aged asphalt binder through molecular dynamics simulation. *Journal of Cleaner Production*, v. 299, p. 126927, 2021.
- DNIT ME 193. Bituminous materials - Determination of density and specific gravity. 1996.
- ELKASHEF, Mohamed; WILLIAMS, R. Christopher; and COCHRAN, Eric. Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures. *International Journal of Fatigue*, v. 108, p. 90–95, 2018.
- HU, Yongping; SREERAM, Anand; AIREY, Gordon D.; LI, Bo; SI, Wei; and WANG, Haopeng. Comparative analysis of time sweep testing evaluation methods for the fatigue characterisation of aged bitumen. *Construction and Building Materials*, v. 432, p. 136698, 2024.
- JIANG, Wei et al. Aging effects on rheological properties of high viscosity modified asphalt. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 10, n. 2, p. 304–319, 2023.
- LIU, Li; LIU, Zhaohui; HONG, Lingling; and HUANG, You. Effect of ultraviolet absorber (UV-531) on the properties of SBS-modified asphalt with different block ratios. *Construction and Building Materials*, v. 234, p. 117388, 20 feb. 2020. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.117388.
- LOPES, Albaniza Maria da Silva; SILVA, Ingridy Minervina; MEDEIROS MELO NETO, Osires DE; LUCENA, Leda Christiane de Figueiredo Lopes; SOUSA, Talita Miranda DE; and

NASCIMENTO, Maria das Vitorias DO. Assessment of the Effects of Temperature, Ultraviolet Radiation, and Moisture on the Properties of Asphalt Mixtures. Transportation Research Record, p. 03611981251327220, 2025. ISSN 0361-1981. DOI 10.1177/03611981251327220.

MA, Lixing; WANG, Feng; CUI, Peide; YUNUSA, Majaheed; and XIAO, Yue. Effect of aging on the constitutive models of asphalt and their mixtures. Construction and Building Materials, v. 272, p. 121611, 2021. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.121611.

MAKOWSKA, Michalina; AROMAA, Kalle; and PELLINEN, Terhi. The rheological transformation of bitumen during the recycling of repetitively aged asphalt pavement. Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. sup2, p. 50–65, 2017. ISSN 1468-0629. DOI 10.1080/14680629.2017.1304266.

MAZZONI, Laura Nascimento; TAKAHASHI, Marcia Midori; VASCONCELOS, Kamilla Lima; and BERNUCCI, Liedi. Avaliação da influência do envelhecimento e da temperatura nas características viscoelásticas de ligantes asfálticos. TRANSPORTES, v. 28, n. 1, p. 135–146, 30 apr. 2020. ISSN 2237-1346. DOI 10.14295/transportes.v28i1.1897.

MEDEIROS MELO NETO, Osires DE; MINERVINA SILVA, Ingridy; FIGUEIREDO LOPES LUCENA, Leda Christiane DE; FIGUEIREDO LOPES LUCENA, Luciana DE;

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte; and LIMA, Robson Kel Batista DE. Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid. Construction and Building Materials, v. 349, p. 128728, 2022. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128728.

MELO NETO, Osires de Medeiros. Abordagem multidimensional de misturas asfálticas com elevado teor de rap rejuvenescidas com óleo de babaçu. 2025. Universidade Federal de Campina Grande.

MENAPACE, Ilaria; and MASAD, Eyad. Evolution of the Microstructure of Warm Mix Asphalt Binders with Aging in an Accelerated Weathering Tester. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 10, p. 04017162, 2017. ISSN 1943-5533. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001998.

MENAPACE, Ilaria; and MASAD, Eyad. The influence of moisture on the evolution of the microstructure of asphalt binders with aging. Road Materials and Pavement Design, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 331–346, 2020. ISSN 1468-0629. DOI 10.1080/14680629.2018.1491882.

NASCIMENTO, Thalita Cristina Brito; and FAXINA, Adalberto Leandro. Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR. TRANSPORTES, v. 25, n. 1, p. 73–81, 2017. ISSN 2237-1346. DOI 10.14295/transportes.v25i1.1100.

OGBO, Chibuike; KASEER, Fawaz; OSHONE, Mirkat; SIAS, Jo E.; and MARTIN, Amy Epps. Mixture-based rheological evaluation tool for cracking in asphalt pavements. Road Materials and Pavement Design, v. 20, n. sup1, p. S299–S314, 2019. ISSN

1468-0629. DOI 10.1080/14680629.2019.1592010.

OLDHAM, Daniel J.; OBANDO, Carlos J.; MOUSAVI, Masoumeh; KALOUSH, Kamil E.; and FINI, Elham H. Introducing the critical aging point (CAP) of asphalt based on its restoration capacity. Construction and Building Materials, v. 278, p. 122379, 2021. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122379.

OSMARI, Patrícia Hennig; and ARAGÃO, Francisco Thiago Sacramento. Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenecedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície. TRANSPORTES, v. 24, n. 3, p. 48–54, 2016. ISSN 2237-1346. DOI 10.14295/transportes.v24i3.1147.

QIAN, Guoping; YU, Huanan; JIN, Dazhong; BAI, Xianping; and GONG, Xiangbing. Different water environment coupled with ultraviolet radiation on ageing of asphalt binder. Road Materials and Pavement Design, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 2410–2423, 2021. ISSN 1468-0629. DOI 10.1080/14680629.2020.1760920.

ROWE, G.; KING, G.; and ANDERSON, M. The Influence of Binder Rheology on the Cracking of Asphalt Mixes in Airport and Highway Projects. Journal of Testing and Evaluation, [s. l.], v. 42, n. 5, p. 1063–1072, 2014. ISSN 0090-3973. DOI 10.1520/JTE20130245.

SILVA LOPES, Albaniza Maria da et al. Impact of aging protocols on asphalt binder behavior: A laboratory and field study. Case Studies in Construction Materials, v. 19, p. e02629, 1 dec. 2023. ISSN 2214-5095. DOI 10.1016/j.cscm.2023.e02629.

SUBBARAO NAGABHUSHANARAO, Suresha; and VIJAYAKUMAR, A. S. Chemical and rheological characteristics of accelerate aged asphalt binders using rolling thin film oven. Construction and Building Materials, v. 272, p. 121995, 22 feb. 2021. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.121995.

WEI, Hui et al. Aging Mechanism and Properties of SBS Modified Bitumen under Complex Environmental Conditions. Materials (Basel, Switzerland), v. 12, n. 7, p. 1189, 11 apr. 2019. ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma12071189.

XU, Jing; PEI, Jianzhong; YAN, Chuanqi; ZHANG, Yuan; and BAHIA, Hussain U. Rheology measurements of recycling oils and their aging resistance in asphalt binders. International Journal of Pavement Engineering, v. 23, n. 6, p. 1707–1722, 12 may 2022. ISSN 1029-8436. DOI 10.1080/10298436.2020.1821024.

YIN, Fan; ARÁMBULA-MERCADO, Edith; EPPS MARTIN, Amy; NEWCOMB, David; and TRAN, Nam. Long-term ageing of asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. sup1, p. 2–27, 27 jan. 2017. ISSN 1468-0629. DOI 10.1080/14680629.2016.1266739.

ZENG, Wenbo; WU, Shaopeng; WEN, Jin; and CHEN, Zongwu. The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process. Construction and Building Materials, v. 93, p. 1125–1131, 15 sep. 2015. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.022.



ANÁLISE DA PERCEPÇÃO DOS USUÁRIOS DA PISTA REVERSÍVEL DA RODOVIA DF-095 NO DISTRITO FEDERAL

**ANALYSIS OF THE PERCEPTION OF
USERS OF THE REVERSIBLE LANE
IMPLEMENTED ON DF-095, IN THE FEDERAL
DISTRICT, FOCUSING ON THE VARIABLES
OF SATISFACTION, SAFETY, TRAFFIC
FLOW, INFRASTRUCTURE QUALITY AND
OPERATIONAL ASPECTS**

*Raphael Augusto Vasconcelos de Sousa¹
Pastor Willy Gonzales Taco¹*

¹ Universidade de Brasília, UnB, raphael.sousa@der.df.gov.br; pastor@unb.br.

DOI: W10.21526/abpv.v54.5

RESUMO

Este artigo analisa a percepção dos usuários da pista reversível implantada na DF-095, no Distrito Federal, com foco nas variáveis de satisfação, segurança, fluidez do trânsito, qualidade da infraestrutura e aspectos operacionais. A pesquisa foi conduzida por meio de um questionário estruturado, aplicado a uma amostra de 452 participantes, composta majoritariamente por usuários frequentes dessa pista. Os dados coletados foram submetidos a análises quantitativas, incluindo estatísticas descritivas, cálculo do coeficiente alfa de Cronbach ($\alpha=0,78$) confirmando a robustez das escalas utilizadas, e testes de correlação de Pearson para identificar relações entre as principais variáveis de interesse. Os resultados apontam predominância de avaliações positivas quanto à satisfação geral, sensação de segurança e percepção da qualidade da infraestrutura, com médias próximas ou superiores a quatro, em escala de cinco pontos. As análises de correlação de Pearson revelaram associações moderadas e estatisticamente significativas entre satisfação, segurança e fluidez do trânsito, além de relação positiva entre satisfação e avaliação da sinalização. Entretanto, não foi observada correlação significativa entre satisfação geral e o efeito da fiscalização, sugerindo que este aspecto, isoladamente, não influencia de forma relevante a avaliação dos usuários. Os resultados reforçam a importância de políticas integradas de melhoria da infraestrutura, sinalização e comunicação com os usuários para maximizar os benefícios das pistas reversíveis. Recomenda-se o monitoramento contínuo da satisfação e segurança dos usuários, além de estudos complementares para aprofundar a compreensão sobre suas expectativas e experiências no contexto da mobilidade urbana do Distrito Federal.

Palavras-chave: pistas reversíveis; satisfação do usuário; mobilidade urbana; segurança viária; Distrito Federal.

ABSTRACT

This article analyzes the perception of users of the reversible lane implemented on DF-095, in the Federal District, focusing on the variables of satisfaction, safety, traffic flow, infrastructure quality and operational aspects. The research was conducted through a structured questionnaire, applied to a sample of 452 participants, composed mostly of frequent users of this lane. The collected data were subjected to quantitative analyses, including descriptive statistics, calculation of Cronbach's alpha coefficient ($\alpha=0.78$) confirming the robustness of the scales used, and Pearson correlation tests to identify relationships between the main variables of interest. The results indicate a predominance of positive evaluations regarding overall satisfaction, feeling of safety and perception of infrastructure quality, with averages close to or greater than four, on a five-point scale. Pearson correlation analyses revealed moderate and statistically significant associations between satisfaction, safety and traffic flow, in addition to a positive relationship between satisfaction and evaluation of signage. However, no significant correlation was observed between overall satisfaction and the effect of monitoring, suggesting that this aspect, in isolation, does not significantly influence user evaluations. The results reinforce the importance of integrated policies to improve infrastructure, signage and communication with users to maximize the benefits of reversible lanes. Continuous monitoring of user satisfaction and safety is recommended, as well as complementary studies to deepen the understanding of their expectations and experiences in the context of urban mobility in the Federal District.

Keywords: reversible lanes; user satisfaction; urban mobility; road safety; Federal District.

INTRODUÇÃO

A demanda por soluções que aperfeiçoem o uso da infraestrutura viária, especialmente em horários de pico, vem crescendo e tem impulsionado a adoção de pistas e faixas reversíveis em diversas cidades brasileiras. No entanto, apesar de seu potencial para redução de congestionamentos e reorganização de fluxos viários, esses sistemas ainda enfrentam desafios significativos relacionados à segurança viária, previsibilidade operacional e aceitação por parte dos usuários. Soma-se a isso a carência de processos automatizados que possam garantir uma gestão mais dinâmica e responsiva dessas faixas, em tempo real, a partir de dados confiáveis e integrados.

No contexto do Distrito Federal (DF), a problemática ganha relevância diante da existência de múltiplas pistas e faixas reversíveis implantadas, abrangendo cinco importantes trechos viários. Dentre eles, destaca-se a DF-095 (Via Estrutural), que representa a mais antiga operação desse tipo de sistema na região. A diversidade topográfica, a variação dos horários de funcionamento e o intenso volume de tráfego tornam a Via Estrutural um cenário particularmente propício para investigar como os aspectos técnicos da operação se relacionam com a percepção dos usuários.

Nesse sentido, a presente pesquisa delimita-se à análise da percepção dos usuários desses sistemas de pistas reversíveis, com o objetivo de avaliar a aceitação por parte dos usuários da DF-095 de forma aprofundada analisando a experiência, opinião e expectativas dos condutores em relação à dinamicidade, usabilidade e segurança da operação, utilizando um questionário online, com foco na realidade local do DF.

O estudo contribui ao articular dados de percepção dos usuários com fundamentos técnicos extraídos da literatura nacional e internacional, buscando subsidiar o aprimoramento da gestão das pistas e faixas reversíveis na região. A análise dos níveis de satisfação, usabilidade e segurança percebida oferece subsídios relevantes para a tomada de decisão dos gestores públicos, especialmente quanto à adoção de barreiras físicas, intensificação da fiscalização, aprimoramento da sinalização dinâmica e comunicação eficiente com os condutores.

Este artigo está organizado em cinco partes: após esta introdução, apresenta-se o referencial teórico; os materiais e método empregados na coleta e análise dos dados; em seguida, são discutidos os principais resultados obtidos, acompanhados de tabelas e gráficos; posteriormente, são expostas as conclusões e recomendações para o aprimoramento das pistas e faixas reversíveis no DF; e, por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do estudo.

REFERENCIAL TEÓRICO

As pistas ou faixas reversíveis são intervenções operacionais de gerenciamento da infraestrutura viária que permitem a inversão do sentido de uma ou mais faixas de rolamento conforme a variação da demanda ao longo do dia. Seu uso é comum em grandes centros urbanos como forma de atenuar os efeitos da concentração direcional do tráfego, especialmente em horários de pico (Wolshon; Lambert, 2006; Machado, 2012). Segundo a *Transportation Association of Canada* (Guebert, 2010), o planejamento e operação de faixas reversíveis deve considerar fatores como volume de tráfego, segurança, sinalização e impacto sobre os usuários. A correta comunicação com os condutores e a previsibilidade do sistema são fundamentais para sua eficácia e aceitação. Estudos recentes, como o de Wollenstein-Betech; Paschalidis e Cassandras (2022), utilizaram abordagens de otimização global para planejar reversões de faixa com base em dados de congestionamento, demonstrando que a eficácia do sistema depende da sintonia entre o projeto e o comportamento da demanda.

Embora as pistas ou faixas reversíveis proporcionem ganhos em fluidez, o aspecto da segurança viária ainda é debatido. Segundo Manuel; Barros e Tay (2020), embora estudos de meta-análise indiquem que faixas reversíveis não necessariamente aumentem a taxa de sinistros, sua implementação sem sinalização clara ou barreiras físicas pode gerar insegurança entre os usuários. Fu; Abdel-Aty e Mahmoud (2023) desenvolveram modelos hierárquicos específicos para faixas reversíveis e faixas para veículos de alta ocupação (HOV), observando diferenças significativas nos padrões de sinistralidade. Os resultados indicam que a probabilidade de sinistros pode ser reduzida quando há controle

específico por horário e separação física entre os fluxos contrários.

No contexto brasileiro, Santos *et al.*, (2020) destacam que a percepção de segurança dos usuários está fortemente relacionada à clareza da sinalização, fiscalização visível e controle físico das vias. Esses aspectos são particularmente relevantes para a operação da DF-095, rodovia que possui reversão consolidada, mas também desafios em termos de comunicação visual e monitoramento.

A satisfação dos usuários com os sistemas de transporte está ligada não apenas ao desempenho técnico da solução, mas também à experiência individual quanto à usabilidade, previsibilidade e conforto (Terwee *et al.*, 2007; Krosnick; Presser, 2009). A avaliação subjetiva é especialmente importante em intervenções com impacto direto no cotidiano dos condutores, como as pistas e faixas reversíveis. A pesquisa de Furtado e Neto (2024), ao avaliar faixas reversíveis em contextos urbanos brasileiros, reforça a importância de indicadores de desempenho percebidos pelo usuário, como tempo de deslocamento, fluidez e sensação de controle. Tais evidências sustentam a necessidade de considerar a percepção dos usuários como componente-chave no planejamento e operação dessas infraestruturas.

MATERIAIS E MÉTODO

Delineamento do Estudo e Caracterização do Local

Trata-se de um estudo descritivo de abordagem quantitativa, fundamentado na aplicação de um questionário, com o objetivo de analisar a percep-

ção dos usuários sobre a operação, satisfação, segurança, usabilidade e eficácia da pista reversível na Via Estrutural (DF-095). A população-alvo foi composta por usuários dessa pista reversível. A amostra foi definida por conveniência e foram coletadas 452 respostas válidas, contemplando 415 respondentes que utilizam o sistema. Não foi possível estimar com precisão o total de usuários da pista reversível da DF-095, de modo que se assumiu, para fins de cálculo amostral, a condição de população infinita. Nessa configuração, e considerando um nível de confiança de 95%, o erro amostral máximo associado à amostra de 452 respondentes é de aproximadamente 4,6 pontos percentuais. Esse valor representa o erro máximo para estimativas de proporções próximas a 50%, sendo que para proporções mais distantes desse valor a margem de erro tende a ser menor. O cálculo adotou a fórmula tradicional para amostras em populações grandes, sem fator de correção para população finita (Washington *et al.*, 2020).

A DF-095, mais conhecida como Via Estrutural, é uma das principais rodovias do Distrito Federal, Brasil. Com extensão de 12,6 quilômetros (Figura 1), conecta regiões administrativas, como Ceilândia, Taguatinga, Vicente Pires e Estrutural (SCIA), ao centro administrativo do DF, o Plano Piloto. A rodovia é essencial para o deslocamento diário de trabalhadores e estudantes, sendo considerada uma das vias de maior fluxo veicular do DF. A DF-095 possui três faixas por sentido, sendo que, nos horários de pico (6h-9h e 17h30-19h45), opera um sistema de reversão de pista para otimizar a capacidade conforme a direção predominante do fluxo.



Figura 1. Mapa da região abrangida pela pista reversível da DF-095 (Google Maps, 2025)

Procedimentos de Coleta de Dados e Instrumento de Pesquisa

Os participantes foram convidados por meio de abordagens aleatórias, ocorridas em diversos pontos e horários de pleno funcionamento da operação de pista reversível, recebendo panfletos com o *QR Code* para acessar a pesquisa, além de poderem ter acesso por meio de links divulgados em redes sociais, para responder a um questionário online. A coleta foi realizada durante 45 dias, entre 06 de maio e 19 de junho de 2025, via questionário online hospedado na plataforma *Google Forms*. A participação foi voluntária e o anonimato garantido. Os critérios de inclusão foram: ter utilizado ao menos uma vez a pista reversível da DF-095 e ter consentido em participar da pesquisa.

O referido questionário é composto por questões fechadas e escalas do tipo Likert (5 pontos), estruturado em 31 questões, abrangendo os seguintes blocos: Frequência de uso e perfil de deslocamento; Nível de dificuldade percebida; Satisfação geral com a operação da pista reversível; Avaliação da fluidez e qualidade do trecho (pavimento, largura, visibilidade, rampa de acesso e saída); Percepção de segurança e monitoramento; Avaliação de sinalização, fiscalização, horários de funcionamento e opiniões sobre automação e expansão das pistas ou faixas reversíveis; e Perfil sociodemográfico. As questões de percepção foram majoritariamente escalas do tipo Likert de 5 pontos (1 = avaliação mais negativa; 5 = avaliação mais positiva), com exceção das perguntas de múltipla escolha e respostas abertas para comentários adicionais.

Processamento e Estatística

Após o término da coleta, os dados foram exportados para planilha eletrônica no Microsoft Excel 365 e submetidos a etapa de pré-processamento. As respostas textuais às questões de escala Likert foram convertidas para valores numéricos conforme a ordem de favorabilidade (Krosnick; Presser, 2009). Esse processo envolveu ainda, a remoção de colunas e respostas incompletas ou duplicadas e a consolidação das respostas e categorização de variáveis abertas, quando necessário.

Para as análises quantitativas, calcularam-se médias, desvios padrão e frequências para cada

item. A elaboração de tabelas dinâmicas permitiu calcular frequências absolutas e relativas das variáveis de interesse, além da construção de tabelas cruzadas para análise bivariada. Foram gerados gráficos de pizza e de colunas para visualização das principais tendências do perfil da amostra, uso da pista, satisfação e percepção de segurança.

A consistência interna do instrumento foi avaliada pelo coeficiente alfa (σ) de Cronbach, aplicando-se a fórmula padrão e considerando o conjunto de 13 itens representativos das variáveis de satisfação, segurança e avaliação operacional. Valores baixos de σ revelam que não há correlação entre os itens de uma escala, ao passo que valores excessivamente altos podem refletir redundância entre os itens. Assim, entende-se que coeficientes de σ situados entre 0,70 e 0,95 são considerados adequados para avaliar a consistência interna de uma escala (Terwee *et al.*, 2007). Também, foi calculado o coeficiente de Pearson entre as principais variáveis de percepção, a fim de investigar se as relações entre satisfação, segurança, avaliação operacional e frequência de uso da pista reversível na Via Estrutural são estatisticamente significativas. A escolha destas variáveis se justifica pelo objetivo central do estudo, que visa compreender de que maneira fatores operacionais e subjetivos influenciam a satisfação e a segurança percebida pelos usuários. Correlacionar essas variáveis permite identificar relações diretas e indiretas entre aspectos práticos do uso da via e a experiência do usuário, apontando potenciais caminhos para intervenções de melhoria (Santos *et al.*, 2020; Krosnick; Presser, 2009). Todas as análises foram realizadas no Microsoft Excel 365, com o apoio de fórmulas e tabelas dinâmicas. As análises estatísticas foram descritivas, apresentando medidas de frequência e distribuição das respostas, considerando sempre o número total de respondentes válidos por item.

RESULTADOS

A pesquisa contou com a participação de 452 respondentes, sendo 415 usuários da pista reversível da Via Estrutural, com predominância de respondentes residentes em Taguatinga (26,17%), Ceilândia (17,45%) e Vicente Pires (13,65%), conforme ilustrado na Figura 2, com destaque no gráfico para as 10 Regiões Administrativas de moradia com

mais usuários respondentes. A maioria dos respondentes declarou se deslocar habitualmente para o Plano Piloto (62,64%) e SIA (5,59%). Outros 32 respondentes disseram que não utilizam a pista rever-

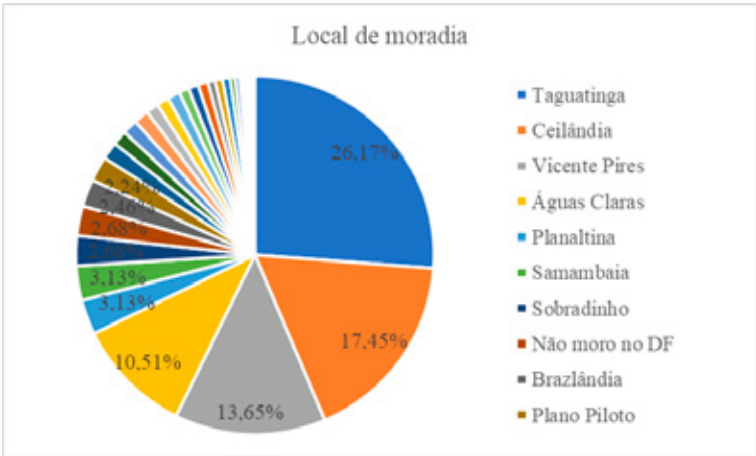


Figura 2. Destaque para as 10 RAs de moradia com mais Usuários Respondentes (Elaborada pelo Autor)

Em relação ao perfil sociodemográfico, observou-se predominância de indivíduos do sexo masculino (64,88%), seguidos pelo sexo feminino (34,45%) e outros/prefiro não responder (0,67%). Quanto à faixa etária, o grupo de 35 a 44 anos foi o mais representativo (33,56%), seguido pelas faixas de 45 a 54 anos (25,5%) e 25 a 34 anos (20,58%). O nível de escolaridade mais frequente foi a pós-graduação (50,56%), seguido pelo ensino superior

sível. 5 respondentes não foram considerados para análise por marcarem a opção de não concordar em participar da pesquisa.

completo ou incompleto (36,24%).

A utilização da Pista Reversível da DF-095 reflete a concentração de respostas de moradores das regiões administrativas vizinhas a essa via (Figura 1). A pergunta relacionada à necessidade desta pista reversível continuar ativa no local, retornou 97,83% para a resposta “sim, ainda é útil e necessária”.

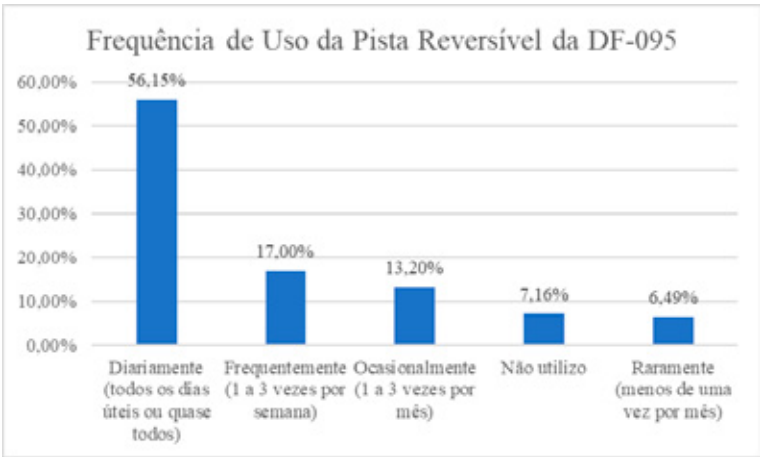


Figura 3. Frequência de uso da pista reversível entre os respondentes (Elaborada pelo Autor)

Quanto à frequência de uso, 56,15% utilizam a pista reversível diariamente, 13,2% ocasionalmente (1 a 3 vezes por mês), 6,49% raramente (menos de uma vez por mês) e 17% frequentemente (1 a 3 vezes por semana), conforme detalhado na Figura 3.

Das opções como usuários em tipo de veículo, o automóvel, especificamente na condição de condutor, foi o principal tipo apontado (88,67%) como mais utilizado.

A maioria dos participantes manifestou-se

muito satisfeita (43,86%) ou satisfeita (43,37%) com a operação da pista reversível na Estrutural, enquanto 8,19% apresentaram opinião neutra e

apenas 4,58% declararam-se insatisfeitos ou muito insatisfeitos. A distribuição pode ser observada no Gráfico de Colunas (Figura 4).

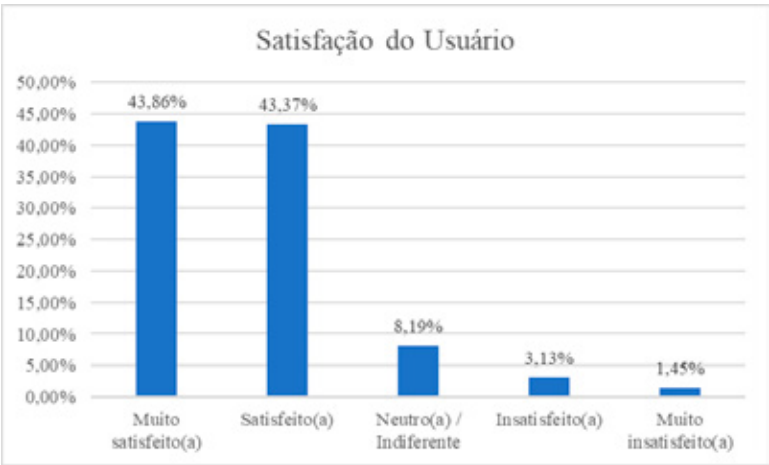


Figura 4. Nível de satisfação dos respondentes em relação à operação da pista reversível (Elaborada pelo Autor)

Em relação à segurança, 52,05% dos respondentes declararam sentir-se seguros e 27,95% muito seguros ao transitar na pista reversível, enquanto

3,13% relataram sensação de insegurança e 16,87% mostraram-se neutros quanto a esse aspecto (Figura 5).

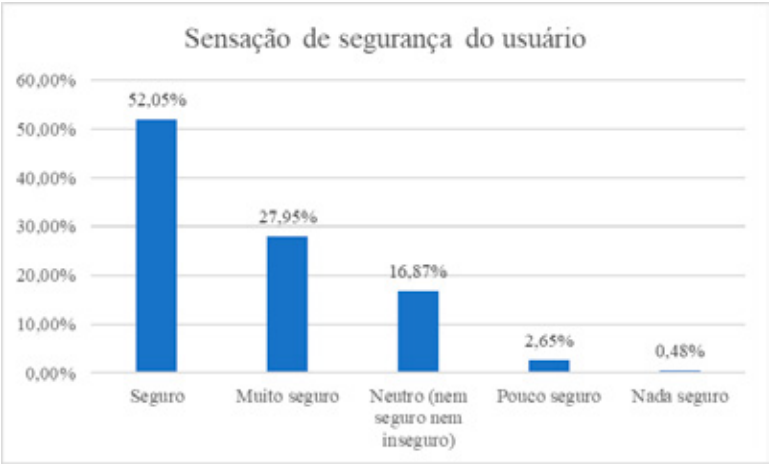


Figura 5. Percepção de segurança dos respondentes ao utilizar pista reversível (Elaborada pelo Autor)

Observou-se que usuários do sexo masculino tendem a relatar maior sensação de segurança, ao

passo que mulheres apresentaram uma percepção levemente mais cautelosa (Tabela 1).

Tabela 1. Cruzamento entre percepção de segurança e gênero dos respondentes (Elaborada pelo Autor)

Gênero / Nível de segurança	Nada seguro	Pouco seguro	Neutro (nem seguro nem inseguro)	Seguro	Muito seguro	Total Geral
Feminino		6	25	78	36	145
Masculino	1	5	43	138	80	267
Outro/prefiro não responder	1		2			3
Total Geral	2	11	70	216	116	415

Grande parte dos respondentes não relatou dificuldades, tendo 62,41% escolhido a opção “Nenhuma dificuldade”. Outros 37,59% relataram ter algum nível de dificuldade ao usar a pista reversível e dentre eles destacaram-se a falta de informações em tempo real, insegurança quanto ao comporta-

mento de outros motoristas, falta de informações sobre horários de funcionamento, confusão quanto ao acesso e sinalização, além de ausência de fiscalização e mudanças frequentes na operação (Tabela 2).

Tabela 2. Principais dificuldades relatadas na utilização da pista reversível (Elaborada pelo Autor)

Dificuldades mais relatadas	Quantidade de relatos
Ausência de informações em tempo real (ex: painéis, aplicativos)	72
Insegurança com o comportamento de outros motoristas	71
Falta de informações sobre os horários de funcionamento	62
Falta de sinalização adequada	58
Dificuldade de identificar por onde entrar ou sair da pista	54
Pouca fiscalização ou orientação no local	43
Mudanças frequentes na operação da pista	7

Quando à avaliação da fluidez do trânsito na pista reversível da DF-095, as respostas se concentraram nos níveis “boa”, 41,45% e “muito boa”, 36,14% (Tabela 3). Cerca de 18,8% consideram a fluidez

“regular”, enquanto 3,61% avaliaram como “ruim” e “muito ruim”. A sinalização da pista foi avaliada como “Regular – compreensível, mas poderia melhorar” por 42,41% dos respondentes (Tabela 3).

Tabela 3. Avaliação da Fluidez e da Sinalização pelo Usuário (Elaborada pelo Autor)

Avaliação da Fluidez	Respondentes	Avaliação da Sinalização	Respondentes
Muito boa	150	Excelente – muito clara, visível e confiável	65
Boa	172	Boa – clara e geralmente bem posicionada	145
Regular	78	Regular – compreensível, mas poderia melhorar	176
Ruim	10	Ruim – difícil de entender ou mal posicionada	23
Muito ruim	5	Muito ruim – confusa e insuficiente	6

A maioria dos usuários considera a fiscalização (67,47%) e o monitoramento por câmeras (92,29%) como medidas positivas para a organização e segurança do trânsito. Em relação à possibilidade de expansão das pistas ou faixas reversíveis para outros horários e locais, 83,61% manifestaram-se favoráveis.

O cruzamento entre frequência de uso e nível de satisfação revelou que os usuários mais frequentes (diários ou semanais) tendem a relatar maior satisfação com a operação da pista reversível (Tabela 4). Os dados demonstram, ainda, que até aqueles que utilizam esporadicamente também apresentaram boa satisfação com o uso da pista.

Tabela 4. Cruzamento entre frequência de uso e nível de satisfação dos respondentes (Elaborada pelo Autor)

Frequência / Satisfação	Muito insatisfeito(a)	Insatisfeito(a)	Neutro(a) / Indiferente	Satisfeito(a)	Muito satisfeito(a)	Não utiliza	Total Geral
Diariamente (todos os dias úteis ou quase todos)	3	5	13	104	126	-	251
Frequentemente (1 a 3 vezes por semana)	1	4	3	34	34	-	76
Ocasionalmente (1 a 3 vezes por mês)	2	4	11	28	14	-	59
Raramente (menos de uma vez por mês)	-	-	7	14	8	-	29
Não utilizo	-	-	-	-	-	32	32
Total Geral	6	13	34	180	182	32	447

A análise conjunta entre percepção de segurança e gênero indicou que homens relataram sensação de segurança (Seguro ou Muito seguro) em maior proporção (acima de 52%) do que mulheres (em torno de 27%) conforme apresentado na Figura 6. Quanto à sensação de insegurança (Pouco segu-

ro ou Nada seguro) na operação da pista reversível da Via Estrutural, os gêneros Masculino e Feminino apresentaram resultado similar, 1,45% cada, enquanto os que se declararam como Outro/Prefiro não responder, 0,24%.

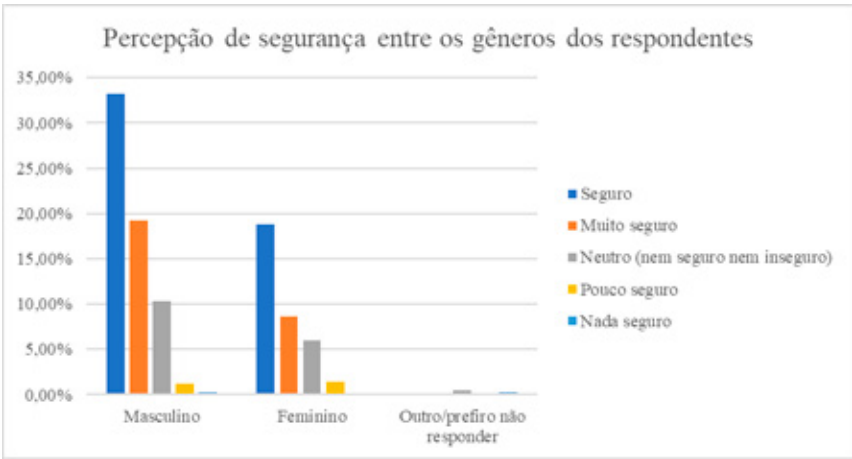


Figura 6. comparativo da percepção de segurança entre os gêneros dos respondentes (Elaborada pelo Autor)

De modo geral, os resultados indicam que a maioria dos usuários reconhece a importância e a efetividade das pistas ou faixas reversíveis, apontando ganhos em fluidez e satisfação (Figura 4). Todavia, persistem desafios relacionados à comunicação, fiscalização e segurança operacional, que podem ser minimizados com maior integração tecnológica e expansão dos canais de informação.

Após a conversão das respostas das questões do tipo Likert para valores numéricos, foram conduzidas análises estatísticas descritivas. O conjunto de itens analisados abrangeu as seguintes variáveis: frequência de uso da pista reversível, nível de dificuldade percebida, satisfação com a operação, avaliação da fluidez do trânsito, qualidade do trecho (pavimento, largura, visibilidade e rampa de acesso), percepção de segurança, efeito da fiscalização, presença de barreiras físicas, avaliação da sinalização e adequação dos horários de funcionamento.

As médias das respostas indicaram avaliações predominantemente positivas nos quesitos satisfação e segurança, além de percepção favorável

quanto à qualidade da infraestrutura e à operação das pistas ou faixas reversíveis. As maiores médias foram observadas para nível de dificuldade (4,47), indicando facilidade de uso, e para satisfação geral (4,25). A avaliação da infraestrutura, qualidade do pavimento (4,10), largura (4,11) e visibilidade (4,10), também apresentou médias elevadas. O item com menor avaliação foi sinalização (média = 3,58), seguido pela qualidade das rampas de acesso (3,70), sugerindo espaço para melhorias nestes aspectos. A análise dos desvios padrão revela que, apesar da avaliação globalmente positiva, determinados itens, como fiscalização e sinalização, suscitam maior debate ou divisão entre os respondentes, sinalizando pontos que podem demandar estratégias específicas de comunicação e melhoria operacional (Tabela 5).

Tabela 5. Estatísticas descritivas das variáveis de percepção analisadas (Elaborada pelo Autor)

Variável	Média	Desvio Padrão	Mín.	Máx.	n
Frequência de uso	4,09	1,26	1	5	415
Nível de dificuldade percebida	4,47	0,82	1	5	415
Satisfação com a operação	4,25	0,85	1	5	415
Fluidez do trânsito	4,09	0,86	1	5	415
Qualidade do pavimento	4,10	0,81	1	5	415
Qualidade da largura	4,11	0,81	1	5	415
Qualidade da visibilidade	4,10	0,80	1	5	415
Qualidade da rampa de acesso	3,70	0,93	1	5	415
Segurança ao transitar	4,04	0,77	1	5	415
Efeito da fiscalização	3,94	1,02	1	5	415
Barreiras físicas aumentariam a segurança	4,05	0,99	1	5	415
Avaliação da sinalização	3,58	0,87	1	5	415
Avaliação dos horários de funcionamento	4,02	0,78	1	5	415

A avaliação da infraestrutura, sinalização e fiscalização foi, em geral, positiva, com sugestões pontuais para aprimoramento de comunicação de horários, intensificação da fiscalização e expansão do uso de tecnologias de monitoramento.

Para aferir a confiabilidade do instrumento, foi calculado o coeficiente alfa de Cronbach para o conjunto de 13 variáveis avaliadas. O procedimento considerou as respostas já convertidas em escala numérica. O resultado obtido, $\alpha = 0,78$, indica boa consistência interna entre os itens analisados, conforme Terwee *et al.* (2007). Esse resultado valida o uso das médias, somatórios e outras análises

quantitativas com o instrumento, assegurando que os itens avaliados mensuram de modo coerente a percepção dos usuários sobre a pista reversível.

Foram realizados testes de correlação de Pearson entre as principais variáveis de percepção, convertidas para escala numérica e os resultados são apresentados na Tabela 6. As análises evidenciaram correlações positivas e estatisticamente significativas entre diversas variáveis avaliadas. Destaca-se uma correlação moderada entre satisfação geral e segurança ao transitar ($r = 0,48$, $p < 0,05$), sugerindo que usuários mais satisfeitos tendem a se sentir mais seguros ao utilizar a pista reversível.

Tabela 6. Resultados de correlação de Pearson (Elaborada pelo Autor)

Par de Variáveis	Coefficiente de Pearson (r)	n	p-valor	Significativo? (p<0,05)
Satisfação geral × Segurança ao transitar	0,48	415	<0,001	Sim
Satisfação geral × Avaliação da sinalização	0,40	415	<0,001	Sim
Satisfação geral × Fluidez do trânsito	0,49	415	<0,001	Sim
Segurança ao transitar × Barreiras físicas aumentam segurança	0,15	415	0,002	Sim
Satisfação geral × Efeito da fiscalização	0,09	415	0,059	Não
Segurança ao transitar × Efeito da fiscalização	0,10	415	0,038	Sim
Fluidez do trânsito × Qualidade do pavimento	0,29	415	<0,001	Sim
Satisfação geral × Frequência de uso	0,21	415	<0,001	Sim
Segurança ao transitar × Frequência de uso	0,21	415	<0,001	Sim
Satisfação geral × Horários de funcionamento	0,34	415	<0,001	Sim
Segurança ao transitar × Horários de funcionamento	0,34	415	<0,001	Sim
Frequência de uso × Horários de funcionamento	0,18	415	<0,001	Sim

Foi observada também correlação positiva entre satisfação geral e avaliação da sinalização ($r = 0,40$, $p < 0,05$), indicando a relevância da sinalização para a percepção global dos usuários. A relação entre satisfação geral e fluidez do trânsito foi moderada e significativa ($r = 0,49$, $p < 0,05$), sugerindo que maior percepção de fluidez está associada a níveis mais altos de satisfação. Outros achados incluem a associação positiva, embora mais fraca, entre segurança ao transitar e concordância com a implantação de barreiras físicas ($r = 0,15$, $p < 0,05$).

As correlações entre segurança ao transitar e efeito da fiscalização ($r = 0,10$, $p < 0,05$), bem como entre fluidez do trânsito e qualidade do pavimento ($r = 0,29$, $p < 0,05$), mostraram-se positivas, embora de menor magnitude, indicando que esses fatores contribuem, mas não são determinantes isolados para a percepção de segurança ou experiência de trânsito. Por outro lado, a análise revelou que a correlação entre satisfação geral e o efeito da fiscalização ($r = 0,09$, $p = 0,059$) não atingiu significância estatística, sugerindo que, para este público, a avaliação da fiscalização não está diretamente associada à satisfação global com a operação da pista reversível.

Por fim, tanto a satisfação geral quanto a segurança ao transitar apresentaram correlações positivas, porém baixas, com a frequência de uso da pista reversível ($r = 0,21$ e $r = 0,21$, respectivamente; $p < 0,05$), sugerindo que usuários mais frequentes tendem a relatar percepções um pouco mais favoráveis. Os resultados desta pesquisa dialogam com a literatura internacional e nacional, especialmente com estudos como os de Ampountolas *et al.* (2020), Furtado e Neto (2024) e Santos *et al.* (2020), ao identificar que a satisfação dos usuários de pistas reversíveis está fortemente relacionada à percepção de segurança, clareza operacional e frequência de uso. A necessidade de melhorias em sinalização e fiscalização, apontada por parte dos usuários da Via Estrutural, também é recorrente em investigações prévias sobre sistemas de reversão de fluxo, como discutido por Di e Yang (2020). Tais convergências evidenciam a relevância de uma abordagem integrada, que combine engenharia, comunicação e gestão operacional, para o aprimoramento da experiência dos usuários e a eficácia das intervenções viárias. Os achados desta pesquisa demonstram a

interdependência entre fatores operacionais, qualidade da infraestrutura, segurança e níveis de satisfação, sugerindo que melhorias coordenadas em sinalização, fiscalização e nas condições da via têm potencial para elevar significativamente a percepção positiva sobre as pistas ou faixas reversíveis.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Buscando analisar a aceitação e percepção dos usuários sobre a pista reversível na rodovia DF-095, utilizou-se um questionário estruturado onde foi possível obter um panorama quantitativo sobre a experiência do público que utiliza a pista. É possível afirmar que a operação da pista reversível é, de modo geral, bem avaliada pelos respondentes, sobretudo quanto à facilidade de uso e à qualidade da infraestrutura. No entanto, foram identificadas questões relacionadas à sinalização e à fiscalização que ainda dividem opiniões, indicando espaço para aprimoramentos. Outros estudos já indicavam que a clareza da sinalização e a efetividade das ações de fiscalização são fatores críticos para a aceitação e segurança em sistemas de pistas reversíveis (Ampountolas *et al.*, 2020; Di e Yang, 2020). No presente estudo, a dispersão maior nas respostas sobre a fiscalização pode estar associada a dúvidas ou insatisfações com os critérios e práticas adotadas, ao passo que a sinalização, ao apresentar média positiva, mas dispersa, destaca a necessidade de comunicação visual mais eficaz e padronizada.

Estes achados dialogam com o problema proposto ao evidenciar que, embora haja aceitação do sistema, aspectos operacionais como clareza da sinalização, estratégias de fiscalização e comunicação com o usuário permanecem como desafios para consolidar a percepção positiva de todos os segmentos de usuários. Ao atingir os objetivos do trabalho, a pesquisa destaca a interdependência entre engenharia viária, gestão operacional e experiência do usuário como fundamentos essenciais para políticas públicas mais eficazes.

Como recomendação, sugere-se o investimento em sistemas inteligentes de sinalização dinâmica para que as políticas públicas de mobilidade priorizem não apenas a manutenção da infraestrutura, mas também a padronização e o aprimoramento da sinalização e das ações de fiscalização, bem

como estratégias para ampliar a comunicação com públicos diversos. Tais medidas podem contribuir para uma experiência mais segura e satisfatória aos usuários, ampliando a aceitação e a eficácia do sistema de pistas reversíveis.

Como limitações do estudo, reconhece-se que a amostra definida por conveniência, contemplando todos os usuários da pista reversível da DF-095 que aceitaram participar da pesquisa durante o período de coleta, por meio de convites presenciais e divulgação digital do questionário, não garante a representatividade estatística do universo total de usuários, configurando-se como uma limitação metodológica, principalmente em razão de os dados terem sido obtidos somente por meio de questionário online, sujeito a vieses de autoapresentação, entendimento das perguntas e acesso à internet. As informações sobre a frequência de uso e percepção são autodeclaradas, podendo haver distorções em relação ao comportamento real. Por fim, a ausência de um levantamento probabilístico e de informações detalhadas sobre o total de usuários das faixas reversíveis impede o cálculo preciso da margem de erro para todo o universo da pesquisa, restringindo as conclusões à amostra analisada. Sugere-se que estudos futuros adotem métodos amostrais probabilísticos e incorporem dados objetivos de fluxo para aprimorar a robustez dos resultados. Apesar da tentativa de abranger outros tipos de usuários, percebe-se também a limitação de os alcançar pelas abordagens, recomendando-se o aprofundamento de pesquisas com outros segmentos de público, como motociclistas, pedestres e usuários de transporte coletivo, além de investigações institucionais junto aos gestores das pistas e faixas reversíveis.

Este artigo integra um estudo mais amplo, ainda em desenvolvimento, com parceria entre o Programa de Pós-Graduação em Transportes da Universidade de Brasília (PPGT-UnB) e o Departamento de Estradas de Rodagem do DF (DER-DF), cujo objetivo é realizar um levantamento abrangente do estado da arte sobre a implementação e gestão de pistas e faixas reversíveis no Brasil. O projeto contempla tanto a análise das instituições responsáveis pela operação desses sistemas, quanto a investigação específica sobre a experiência e percepção dos usuários no contexto do Distrito Federal. Os resultados apresentados aqui representam a

etapa voltada à análise dos usuários da Via Estrutural, mas serão posteriormente complementados por informações relativas à atuação institucional e boas práticas nacionais, além de outros trechos estudados. Para fins de transparência e aprofundamento metodológico, o instrumento de pesquisa utilizado neste estudo está disponível para consulta no seguinte link: <https://bit.ly/Reversivel>.

Referências bibliográficas

AMPOUNTOLAS, K.; SANTOS, J. A. dos; CARLSON, R. C. *Motorway tidal flow lane control*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 21, n. 4, p. 1687–1696, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.046>.

DI, Z.; YANG, L. Reversible lane network design for maximizing the coupling measure between demand structure and network structure. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 141, 102021, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102021>.

FREJO, J. R. D. *et al.* Macroscopic modeling and control of reversible lanes on freeways. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 17, n. 4, p. 948–959, 2015. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2493127>.

FU, J.; ABDEL-ATY, M.; MAHMOUD, N. Time-specific hierarchical models for predicting crash frequency of reversible and high-occupancy vehicle lanes. Accident Analysis & Prevention, v. 181, 106953, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106953>.

FU, Q.; TIAN, Y.; SUN, J. Modeling and simulation of dynamic lane reversal using a cell transmission model. Journal of Intelligent Transportation Systems, v. 26, n. 6, p. 717–729, 2022. <https://doi.org/10.1080/15472450.2021.1973898>.

FURTADO, I. G.; NETO, A. D. Contribuição para a avaliação de performance de faixas reversíveis. Transportes, v. 32, n. 3, e2919, 2024. <https://doi.org/10.58922/transportes.v32i3.2919>.

GUEBERT, A. A. Guidelines for the planning, design, operation and evaluation of reversible lane systems. Ottawa: Transportation Association of Canada, 2010.

KROSNICK, J.; PRESSER, S. Question and questionnaire design. In: WRIGHT, J. D. (ed.). Handbook of Survey Research. San Diego: Elsevier, p. 263–313. 2009.

LI, W.; JIANQING, L.; DI, H. Dynamic lane reversal strategy in intelligent transportation systems in smart cities. Sensors, v. 23, n. 17, 7402, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23177402>.

MACHADO, C. L. Procedimentos para implantação de faixas reversíveis urbanas. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2012. http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/ChristianoLimaMachado.pdf.

MANUEL, A.; BARROS, A. de; TAY, R. Traffic safety meta-analysis of reversible lanes. Accident Analysis & Prevention, v.

148, 105751, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105751>.

SILVA, O. H. DA . *et al.* Proposta de Instrumento Para Avaliação da Caminhabilidade em Campi Universitários. RPER, (54), 93–103, 2021. <https://doi.org/10.59072/rper.vi54.177>

SANTOS, D. V. *et al.* Análise da percepção de segurança no trânsito urbano com apoio de método multicritério. Brazilian Journal of Production Engineering, v. 6, n. 2, p. 205–226, Edição Especial “Gestão Pública”, 2020.

TERWEE, C. B. *et al.* Quality criteria were proposed for measurement properties of health status questionnaires. Journal of Clinical Epidemiology, v. 60, p. 34–42, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2006.03.012>.

WASHINGTON, S. P. *et al.* Statistical and econometric methods for transportation data analysis. 3. ed. New York: CRC Press, 2020. <https://doi.org/10.1201/9780429244018>.

WOLSHON, B.; LAMBERT, L. Reversible lane systems: synthesis of practice. Journal of Transportation Engineering, v. 132, n. 12, p. 933–944, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)-0733-947X\(2006\)132:12\(933\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)-0733-947X(2006)132:12(933)).

WOLLENSTEIN-BETECH, S.; PASCHALIDIS, I. Ch.; CASSANDRAS, C. G. Optimizing lane reversals in transportation networks to reduce traffic congestion: a global optimization approach. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 143, 103840, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103840>.

Engenharia de PAVIMENTAÇÃO

A Revista PAVIMENTAÇÃO é um periódico técnico-científico editado e publicado pela ABPv – Associação Brasileira de Pavimentação, desde 2006. Atualmente, é disponibilizada exclusivamente no formato eletrônico através dos sites:

- www.abpv.org.br
- www.revistapavimentacao.org.br

MISSÃO DA ABPv

A ABPv tem como missão promover e incentivar o estudo, a pesquisa e a divulgação de temas relacionados à área da engenharia rodoviária, aeroportuária e ferroviária.

ARTIGOS TÉCNICOS

Na Revista PAVIMENTAÇÃO são veiculados artigos científicos, ensaios e estudos de caso de caráter exclusivamente técnico, inéditos, com temáticas pertinentes.

Os trabalhos enviados para publicação são encaminhados ao Comitê Técnico Científico da ABPv, onde serão submetidos a rigorosos critérios de avaliação, garantindo segurança e credibilidade aos conteúdos disponibilizados aos leitores.



03 > 05
MAR 2027
SALVADOR | BAHIA

INFRANE
EXPO
A Nova Plataforma de
Infraestrutura do Nordeste



**PARTICIPE
COMO EXPOSITOR**
INFRANE.COM.BR

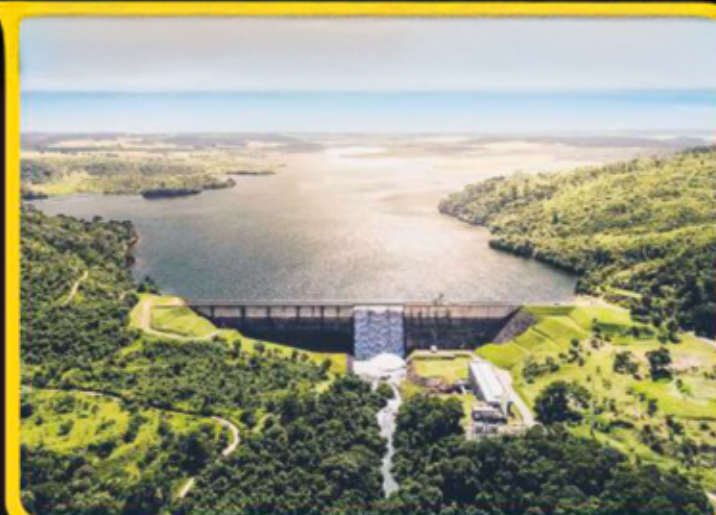


CENTRO DE CONVENÇÕES
SALVADOR
BAHIA - BRASIL



TECPAV[®]

ENGENHARIA



A EVOLUÇÃO
PASSA
POR AQUI.



MELHOR PREÇO - EFICIÊNCIA



CONFIANÇA - CREDIBILIDADE - SEGURANÇA



QUALIDADE



ENTREGA - PRAZO



FAZ SENTIDO PRA VOCÊ?

CONHEÇA TODOS NOSSOS SERVIÇOS EM:

tec pav.com.br



Rua 23, nº 420, Jardim Goiás, Goiânia-GO



(62) 3239-1500 / 3237-3900



PAVING EXPO

22 > 24
SET. 2026

Conectando pessoas,
Construindo oportunidades.

EDIÇÃO 2027, SEMANA DA
INFRAESTRUTURA NO BRASIL

PAVING
EXPO

52ª RAPv
Reunião Anual de Pavimentação
29ª ENACOR
Encontro Nacional de Conservação Rodoviária

28 > 30
set. 2027
DISTRITO
ANHEMBI

Apoio:



ACESSE O SITE: PAVING.COM.BR