

Impacto do aumento da temperatura na seleção de ligantes e desempenho à deformação permanente de pavimentos asfálticos

Impact of temperature increase on binder selection and rutting performance of asphalt pavements

Cléber Faccin^{✉,1} e Luciano Pivoto Specht²

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, faccin.cr@gmail.com, [0000-0003-4242-4453](tel:0000-0003-4242-4453)

²Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, luspecht@ufsm.br, [0000-0002-8709-6273](tel:0000-0002-8709-6273)

Recebido: 18 de março de 2026
Aceito: 5 de agosto de 2026
Revisão final: 24 de agosto de 2026
Publicado: 2 de outubro de 2026

Editor Associado:

[Kamilla Vasconcelos](#) 

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Palavras-chave:

Mudanças climáticas;
Temperatura;
Pavimentos asfálticos;
Seleção de ligantes;
Desempenho.

Keywords:

Climate change;
Temperature;
Asphalt pavements;
Binder selection;
Performance.

DOI: [10.58922/transportes.v34.e3218](https://doi.org/10.58922/transportes.v34.e3218)



RESUMO

Dados climáticos históricos já demonstram aumentos de temperatura em escalas global e regional, impactando o desempenho dos pavimentos asfálticos. Nesse contexto, este artigo avalia o impacto dos aumentos de temperatura devido às mudanças climáticas na seleção de ligantes e no desempenho à deformação permanente de revestimentos asfálticos, considerando dados climáticos históricos de cinco diferentes locais no Brasil. Para isso, foram avaliadas três estruturas, com diferentes materiais asfálticos e níveis de tráfego. Os resultados mostram os impactos negativos das mudanças climáticas nos pavimentos. Comparando o período mais recente (2001-2023) com o mais distante (1980-2000), observa-se um aumento de um grau no PG (Grau de Desempenho) de alta temperatura dos ligantes asfálticos para três dos cinco locais avaliados. Em relação ao impacto das mudanças climáticas na deformação permanente da camada asfáltica, foram observados comportamentos distintos para os locais avaliados, com reduções na vida útil de até 48,0% quando comparados os resultados de simulação do período mais recente (2013-2023) com os do período base (1980-1990). Pode-se verificar que a utilização de ligantes modificados é uma alternativa eficiente para lidar com os aumentos de temperatura.

ABSTRACT

Historical climate data already show temperature increases at both global and regional scales, impacting the performance of asphalt pavements. In this context, this study evaluates the impact of temperature increases associated with climate change on binder selection and rutting performance of asphalt pavements, considering historical climate data from five different locations in Brazil. Three pavement structures with different asphalt materials and traffic levels were analyzed. The results show the negative impacts of climate change on pavement performance. When comparing the most recent period (2001-2023) with the earlier period (1980-2000), an increase of one grade in the high-temperature PG (Performance Grade) of asphalt binders was observed for three of the five locations evaluated. Regarding the impact of climate change on rutting development in asphalt layers, different behaviors were observed among the evaluated locations, with reductions in service life of up to 48.0% when comparing simulation results from the most recent period (2013-2023) with those from the baseline period (1980-1990). The use of modified binders proved to be an efficient alternative to mitigate the effects of temperature increases.

1. Introdução

A mudança climática é uma alteração no sistema climático da Terra, resultante do aquecimento global, das mudanças na circulação oceânica e outros fatores [Tilio Neto \(2008\)](#). No Brasil, projeções apresentadas por [Marengo et al. \(2007\)](#) indicam que, até o final do século, a temperatura média da superfície no país poderá subir entre 1,3 °C e 3,8 °C. [Faccin & Specht \(2025\)](#), ao avaliarem 10 diferentes locais no Brasil, identificaram, de forma geral, um aumento da temperatura do ar ao longo dos anos 1961 a 2023, assim como na quantidade e intensidade dos eventos de calor extremo, especialmente após o ano 2000.

O impacto das mudanças climáticas na infraestrutura rodoviária tem se tornado cada vez mais evidente ([Liu et al., 2023](#)). O pavimento asfáltico é altamente sensível ao ambiente, especialmente à temperatura ([Gong et al., 2022](#)) e às condições de umidade ([Brondani et al., 2022](#)). Os aumentos de temperatura e a ocorrência de eventos de calor extremo podem causar efeitos importantes na durabilidade

das rodovias (especialmente na deformação permanente), na segurança do tráfego e no ambiente (Faccin & Specht, 2025; Mills *et al.*, 2009; Shamsaei, Carter & Vaillancourt, 2022; Zhang, Yang & Chen, 2024).

Essa realidade exige adaptações para estruturas de pavimentos resilientes (Underwood *et al.*, 2017). Na fase de seleção do ligante asfáltico, Sheng, Miao & Wang (2023) destacam a necessidade de considerar os aumentos de temperatura ao determinar os graus apropriados de ligante asfáltico, a fim de garantir a longevidade dos pavimentos. Underwood *et al.* (2017) observaram variações no Grau de Desempenho (PG, do inglês Performance Grade) de ligantes asfálticos nos Estados Unidos, ao considerar diferentes períodos históricos: 1966–1995 e 1985–2014. Os autores relatam que 35,0% dos 799 locais avaliados apresentaram alterações na classe PG para altas ou baixas temperaturas (6,0% para altas, 26,0% para baixas e 3,0% para ambas). Segundo os autores, a alteração no Grau de alta temperatura é uma das principais preocupações, visto que esses locais sofrerão degradação mais rápida, exigindo manutenção mais precoce ou a utilização de ligantes asfálticos de melhor qualidade. No Brasil, Schuster *et al.* (2022), ao avaliarem dados de temperatura do ar de 115 estações meteorológicas distribuídas pelo país e compararem os períodos de 1961–1990 e 1991–2020, observaram aumento de um grau no PG de alta temperatura em 14,9% dos locais analisados.

Mills *et al.* (2009) conduziram um estudo no sul do Canadá, projetando que, até 2050, 6 dos 17 locais avaliados precisarão de uma atualização para um grau de temperatura mais alto do pavimento; e 8 locais terão um aumento no grau de baixa temperatura em comparação ao período de referência (1961–1990). Na Itália, Viola & Celauro (2015), ao avaliar o impacto das mudanças climáticas projetadas para 71 locais no país, descobriram que 27,0% do país deve experimentar um aumento de um grau de alta temperatura em um futuro próximo. Em estudo semelhante realizado no Chile, Delgadillo *et al.* (2018) também identificaram um número significativo de estações que exigirão uma mudança no grau do ligante no futuro.

Além da seleção do ligante asfáltico, estudos vêm sendo conduzidos para avaliar o impacto dos aumentos de temperatura no desempenho à deformação permanente. Gudipudi, Underwood & Zalgout (2017) afirmam que os aumentos de temperatura relacionados às mudanças climáticas podem impactar o desempenho ao ATR (Afundamentos em Trilha de Roda) nas rodovias dos EUA na ordem de 9,0% a 40,0%, ao considerar cinco locais, diferentes modelos climáticos e dois cenários de emissões de gases de efeito estufa. Na China, Miao, Sheng & Ye (2022) demonstram que a formação de ATR é um defeito muito sensível ao aumento de temperatura, crescendo em média 20,7% de 1992 a 2019. Segundo os autores, anomalias globais de temperatura média da superfície de 1,5 °C e 2,0 °C aumentarão a formação de ATR no pavimento asfáltico em 18,6% e 36,7%, respectivamente, em comparação ao ano de 2019.

Alterações de temperatura induzidas por mudanças climáticas também foram investigadas na Austrália, onde se constatou que um aumento de 4 °C na temperatura resultaria em uma redução de 4 anos na vida útil do pavimento (Kumlai, Jitsangiam & Pichayapan, 2017). No estudo de Abttan *et al.* (2024), realizado nos Emirados Árabes Unidos, as projeções climáticas indicam um aumento significativo na formação de ATR no revestimento asfáltico, com percentuais de até 27,8% para cenários futuros distantes (período de 2045–2070).

Para considerar as projeções de temperatura, são utilizados modelos climáticos (Almeida & Picado-Santos, 2022), os quais fornecem suporte de dados para avaliar os potenciais efeitos das mudanças climáticas em pavimentos asfálticos. Todavia, a consideração de cenários futuros depende essencialmente do modelo utilizado, de modo que os dados apresentados podem variar com os dados reais de temperatura monitorados nas próximas décadas. Além disso, a modelagem de fenômenos climáticos globais é extremamente desafiadora. Diante disso, Underwood (2021) afirma que é preciso ter cuidado na seleção do modelo, pois diferentes resultados podem ser obtidos conforme a alternativa utilizada.

Considerando que os dados climáticos históricos já demonstram aumentos de temperatura em escalas global e regional (IPCC, 2023), é possível avaliar quantitativamente os efeitos reais das mudanças climáticas históricas em pavimentos asfálticos, subsidiando futuras estratégias de adaptação da infraestrutura e mitigação do aquecimento global. Nesse contexto, o objetivo deste artigo é avaliar o impacto das mudanças climáticas na seleção de ligantes e no desempenho à deformação permanente de revestimentos asfálticos, considerando dados climáticos históricos, cinco diferentes localidades no

Brasil, e três estruturas de pavimentos (com diferentes materiais asfálticos e níveis de tráfego).

2. Metodologia

A metodologia adotada consiste em quatro etapas principais, ilustradas na [Figura 1](#).

2.1. Dados climáticos e locais avaliados

Foram considerados dados climáticos horários da reanálise MERRA-2 ([Gelaro et al., 2017](#)), obtidos por meio do software R ([Team, 2024](#)), utilizando o pacote *nasapower* ([Sparks, 2018, 2024](#)), e diretamente no portal da NASA ([NASA, 2024](#)), para um período de 44 anos (1980–2023). As variáveis climáticas horárias consideradas são: radiação solar, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e velocidade do vento.

Avaliaram-se cinco diferentes locais no Brasil ([Figura 2](#)), representando as cinco regiões climáticas indicadas no estudo de [Faccin et al. \(2026\)](#). [Faccin & Specht \(2025\)](#) analisaram essas cidades em um estudo que buscou caracterizar eventos extremos de calor. De acordo com os autores, há uma tendência de aumento da média dos 7 dias consecutivos mais quentes anuais para esses locais ao longo do período de 1961–2023, assim como a intensidade e frequência das ondas de calor.

As tendências das séries temporais climáticas ao longo do período avaliado (1980–2023), relacionadas aos dados climáticos horários médios, foram avaliadas utilizando o teste de Mann-Kendall ([Kendall, 1975; Mann, 1945](#)), a fim de determinar se as tendências são estatisticamente significativas ou não (adotado nível de significância de 5%). Trata-se de um teste não paramétrico sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliar tendências em séries temporais de dados ambientais, permitindo verificar se os valores tendem a aumentar ou diminuir ao longo do tempo. O coeficiente Tau de Kendall (tau) varia entre -1 e $+1$: é positivo quando a tendência aumenta e negativo quando a tendência diminui.

2.2. Cálculo dos perfis de temperatura do pavimento

Para calcular os perfis horários de temperatura do pavimento, foi utilizado o modelo numérico proposto por [Faccin et al. \(2024\)](#), baseado nos fundamentos do balanço de energia entre o pavimento e seu entorno ([Figura 3](#)).

Na superfície do pavimento, considera-se que a troca de calor é originada da radiação de ondas curtas, da radiação de ondas longas, e da convecção, e que o balanço de calor na superfície pode ser

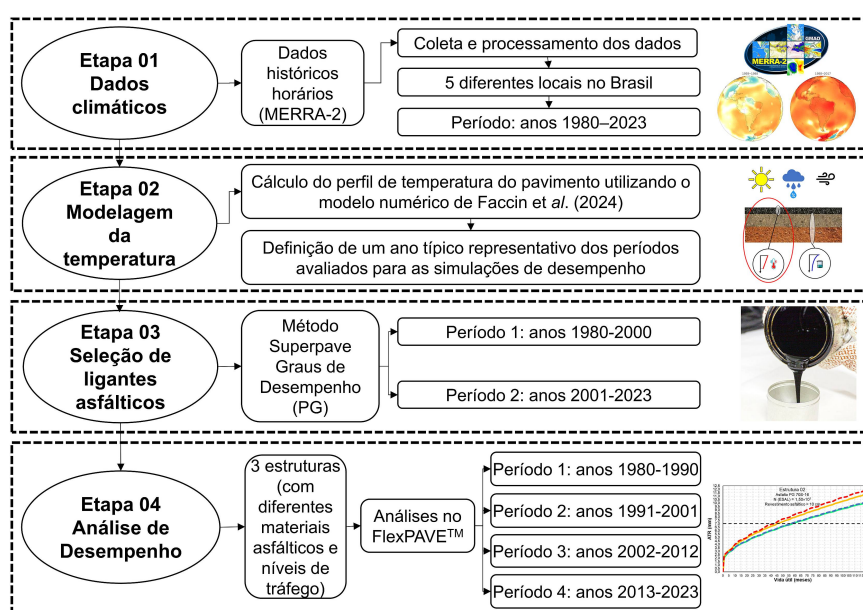


Figura 1 • Fluxograma da metodologia

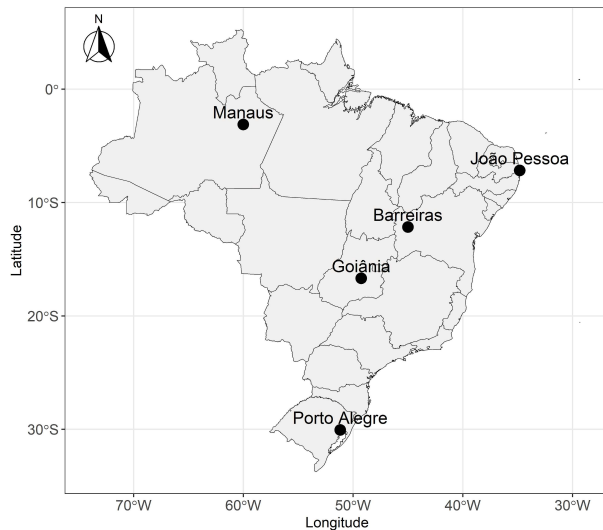


Figura 2 • Locais avaliados no estudo

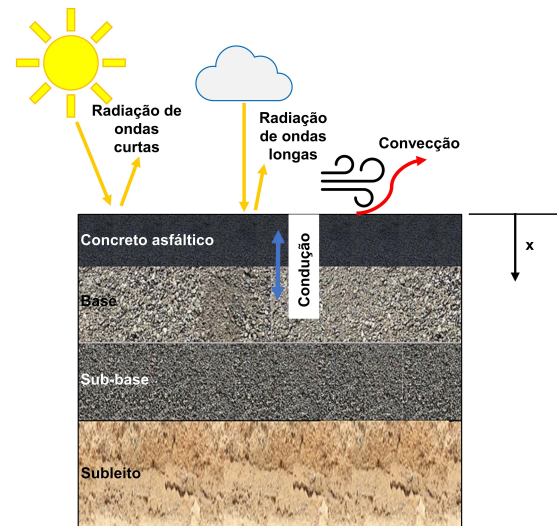


Figura 3 • Ilustração da transferência de calor no sistema pavimento-ambiente (Faccin et al., 2024)

descrito pela Equação 1:

$$k \frac{\partial T_{sup}}{\partial x} = (1 - \alpha) Q_{sol} - Q_{LW} - Q_{sens}, \quad (1)$$

em que k é a condutividade térmica; T_{sup} é a temperatura na superfície; x é a profundidade no pavimento; α é o albedo do revestimento asfáltico; Q_{sol} é a energia solar incidente na superfície do pavimento; Q_{LW} é o fluxo radiativo líquido de ondas longas que sai da superfície; e Q_{sens} é a transferência de calor convectiva da superfície do pavimento para o ar ambiente.

O calor também é trocado dentro do pavimento, através da condução de calor. A transferência de calor no pavimento é governada pela equação clássica de difusão térmica (Equação 2):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

em que ρ é a massa específica; c é a capacidade térmica do pavimento; T é a temperatura do pavimento em função do tempo (t) e da profundidade abaixo da superfície (x).

O modelo considera os dados climáticos horários de radiação solar, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e velocidade do vento; além dos parâmetros termofísicos dos materiais, adotando-se neste estudo os valores indicados em Faccin et al. (2025) (Tabela 1). A partir disso, utilizando o software MATLAB, as temperaturas do pavimento são calculadas para cada hora e ao longo de diferentes profundidades do pavimento (neste caso, a cada 2 cm). Mais informações sobre o modelo e as propriedades adotadas podem ser encontradas em Faccin et al. (2024) e Faccin et al. (2025).

Em virtude da limitação do software FlexPAVE™ (versão 1.1), que possibilita a consideração de um perfil de temperatura do pavimento de apenas 1 ano (repetido para os outros anos do período do projeto), não incorporando a variação interanual do clima, foram selecionados anos que representem os períodos avaliados: 1980–1990; 1991–2001; 2002–2012; 2013–2023.

Tabela 1 • Propriedades dos materiais consideradas no cálculo do perfil de temperatura do pavimento (Faccin et al., 2025)

Camada do pavimento	Albedo	Emissividade	Densidade (kg/m ³)	Capacidade térmica (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Concreto asfáltico	0,05	0,9	2371	921	1,16
Base granular	—	—	2200	900	1,50
Sub-base granular	—	—	2100	850	1,20
Subleito	—	—	1800	1200	1,50

2.3. Seleção de ligantes asfálticos

A seleção dos ligantes asfálticos foi orientada pelas especificações Superpave-PG. A especificação Superpave AASHTO M 323 (AASHTO, 2022) estabelece que o ligante asfáltico deve ser selecionado para atender, durante a vida útil do pavimento, às temperaturas máximas e mínimas da camada asfáltica, por meio do Grau de Desempenho (PG), de acordo com a AASHTO M 320 (AASHTO, 2023). Para a definição do PG, a norma considera as temperaturas máximas anuais do pavimento (média dos 7 dias consecutivos mais quentes, a 20 mm de profundidade) e as temperaturas mínimas anuais (mínima de 1 dia, na superfície do pavimento). Como o presente estudo tem foco na deformação permanente e nos afundamentos em trilha de roda, foram avaliados apenas os PGs de alta temperatura. Os cálculos de temperatura do pavimento foram realizados utilizando o modelo numérico de Faccin *et al.* (2024). Segundo Faccin *et al.* (2025), o modelo mostrou-se adequado para o cálculo das temperaturas extremas da classificação Superpave PG. As análises foram divididas em dois períodos passados (1980-2000 e 2001-2023), considerando cenários de pelo menos 20 anos de dados válidos (recomendação de Kennedy *et al.*, 1994) e 98% de confiabilidade (probabilidade de que, em um único ano, a temperatura mínima real ou a temperatura máxima média de sete dias não exceda as temperaturas de projeto do pavimento correspondentes).

2.4. Desempenho à deformação permanente da camada asfáltica

Para avaliar o desempenho à deformação permanente dos revestimentos asfálticos, sob condições climáticas históricas, utilizou-se o FlexPAVE™ (versão 1.1). O software utiliza análise tridimensional de elementos finitos viscoelásticos que leva em consideração cargas móveis e variações de temperatura com o tempo e a profundidade do pavimento, possibilitando prever as respostas mecânicas do pavimento, o trincamento por fadiga e os afundamentos em trilha de roda (Barros, 2022). O ensaio de varredura de tensão (SSR, do inglês *Stress Sweep Test*) e o modelo de deslocamento de deformação permanente são usados para abordar o afundamento em trilha de roda da camada asfáltica (Wang *et al.*, 2021). Neste estudo, apenas o ATR da camada asfáltica foi avaliado, desconsiderando a deformação das camadas não ligadas. De acordo com a pesquisa de Barros (2022), as simulações de ATR da camada asfáltica no FlexPAVE™ 1.1 apresentaram boa concordância com as medições reais de campo em segmentos brasileiros monitorados.

As três estruturas avaliadas nas simulações de desempenho (com diferentes materiais asfálticos e níveis de tráfego) encontram-se ilustradas na Figura 4, considerando um período de projeto de 10 anos, prática adotada no Brasil. Para todas as condições, foi adotada a carga de um eixo simples com rodas duplas de 80 kN (ESAL), com pressão de inflação dos pneus de 0,80 MPa, dispostas em uma área de contato retangular com relação comprimento/largura de 1,5714 e velocidade de 60 km/h. A taxa de crescimento do tráfego foi considerada linear e fixada em 3,0%. A distribuição do tráfego ao longo do dia foi a mesma adotada por Nascimento (2015).

As misturas asfálticas e os respectivos agregados e ligantes foram caracterizados por Barros (2022), com as propriedades resumidas na Tabela 2. Trata-se de três misturas diferentes, dosadas pela metodologia Superpave (considerando um número de giros igual a 100), com diferentes PGs de ligantes asfálticos. Os parâmetros das misturas, utilizados na modelagem no FlexPAVE™ 1.1, podem ser consultados em Barros (2022).

Tabela 2 • Propriedades das misturas consideradas nas análises (adaptado de Barros, 2022)

Mistura	Tipo de Agregado	TMN ¹ (mm)	Ligante asfáltico	PG ligante	Jnr PG	Jnr 64 °C	Teor ligante	Flow Number (ciclos)
MF	Basalto	19,1	CAP ² 50/70	64S-16	3,91	3,91	4,3%	391
MC	Basalto	19,1	CAP ² 30/45	70S-16	3,49	1,31	4,3%	1670
ME	Basalto	19,1	HiMA ³	76E-22	0,09	0,03	4,1%	7200

Notas: ¹ Tamanho máximo nominal; ² Cimento asfáltico de petróleo;

³ *High modified asphalt*: asfalto com alta porcentagem de polímeros.

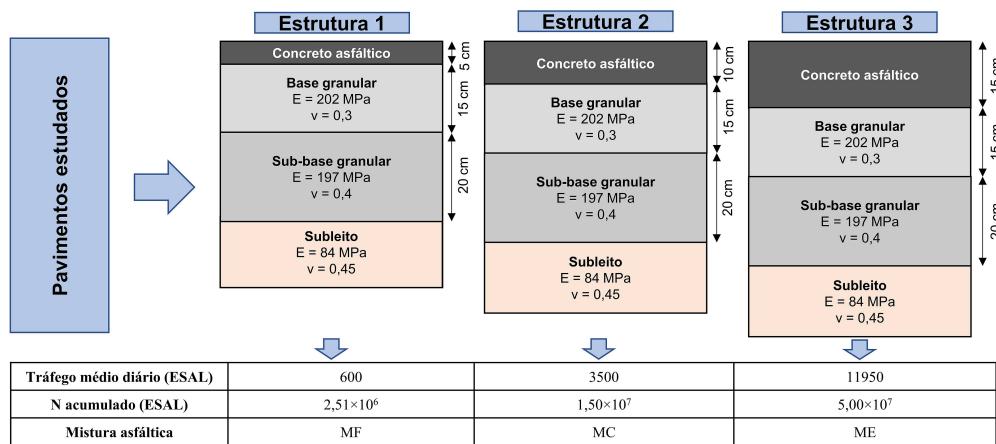


Figura 4 • Estruturas e condições avaliadas

As estruturas e misturas asfálticas foram definidas para representar condições típicas de projeto associadas a diferentes níveis de tráfego, contemplando distintas espessuras de revestimento e ligantes asfálticos com diferentes Graus de Desempenho (PG) e comportamentos mecânicos frente à deformação permanente.

Os valores de ATR simulados no software são então considerados para calcular os valores previstos de ATR da camada asfáltica, considerando 95% de confiabilidade (Equações 3 e 4). Esta função de transferência foi desenvolvida por Barros (2022), considerando dados de campo e materiais brasileiros, onde a autora obteve um coeficiente de correlação $R^2 = 0,81$. Conforme demonstrado pela autora, a metodologia apresentou boa capacidade de representar a evolução da deformação permanente e diferenciar o desempenho entre misturas com distintos ligantes asfálticos, embora ainda existam limitações relacionadas à base experimental utilizada na calibração da função, especialmente para misturas com ligantes modificados.

$$ATR_C = C_1 \times ATR_{FlexPAVE}^2 + C_2 \times ATR_{FlexPAVE} \quad (3)$$

$$ATR_P = ATR_C + Erro \times Z_P, \quad (4)$$

em que ATR_C é o afundamento de trilha de roda calibrado da camada asfáltica (mm); C_1 é um coeficiente de calibração ($C_1 = 0,0820 \text{ mm}^{-1}$); C_2 é outro coeficiente de calibração ($C_2 = 0,3997$, adimensional); $ATR_{FlexPAVE}$ é o afundamento de trilha de roda (mm) da camada asfáltica previsto no FlexPAVE™ 1.1; ATR_P é o afundamento de trilha de roda previsto (mm) para um nível de confiabilidade P (camada asfáltica); $Erro$ é o erro padrão da média obtida da calibração final de campo (0,70 mm); Z_P é o desvio padrão normal, dependente do nível de confiabilidade desejada.

As análises foram realizadas para quatro períodos climáticos históricos (1980–1990; 1991–2001; 2002–2012 e 2013–2023), totalizando 60 simulações no FlexPAVE™: 4 períodos climáticos, 3 estruturas e 5 locais. Ainda, para avaliar o impacto das mudanças climáticas na vida útil dos pavimentos asfálticos, foi adotada uma função de diferença percentual (Equação 5), considerando os valores previstos de ATR para 95% de confiabilidade. Para tanto, adotou-se o limite de ATR na camada asfáltica de 7 mm, valor máximo admissível para diversas concessões e contratos de rodovias no Brasil.

$$ATR_{Impacto} = \frac{T_{Recente} - T_{Base}}{T_{Base}} \times 100, \quad (5)$$

em que $ATR_{Impacto}$ é a diferença na vida útil considerando o limite de 7 mm de ATR para a camada asfáltica (%); $T_{Recente}$ é o tráfego para o limite de 7 mm de ATR da camada asfáltica, considerando os períodos mais recentes (1991–2001; 2002–2012 e 2013–2023); T_{Base} é o tráfego para o limite de 7 mm de ATR da camada asfáltica, considerando o período base (1980–1990).

3. Resultados

3.1. Dados climáticos históricos

A presente seção apresenta os resultados das análises dos dados climáticos históricos. Ressalta-se que, devido às diferenças de magnitude entre os locais avaliados, alguns gráficos apresentam escalas distintas no eixo Y, visando melhor visualização das tendências e dos valores extremos. A Figura 5 apresenta os boxplots com os dados horários da temperatura do ar a 2 metros dos locais avaliados, juntamente com a tendência linear dos dados médios horários anuais ao longo do período de 1980-2023.

Analisando a Figura 5, é possível observar características distintas entre as localidades avaliadas. Em Manaus, a temperatura horária do ar variou entre 18 °C e 41 °C, registrando os maiores valores médios anuais dentre os locais analisados; João Pessoa se caracteriza por uma menor amplitude térmica, com temperatura do ar entre 20 °C e 35 °C; Barreiras registra valores na faixa de 12 °C a 42 °C; Goiânia

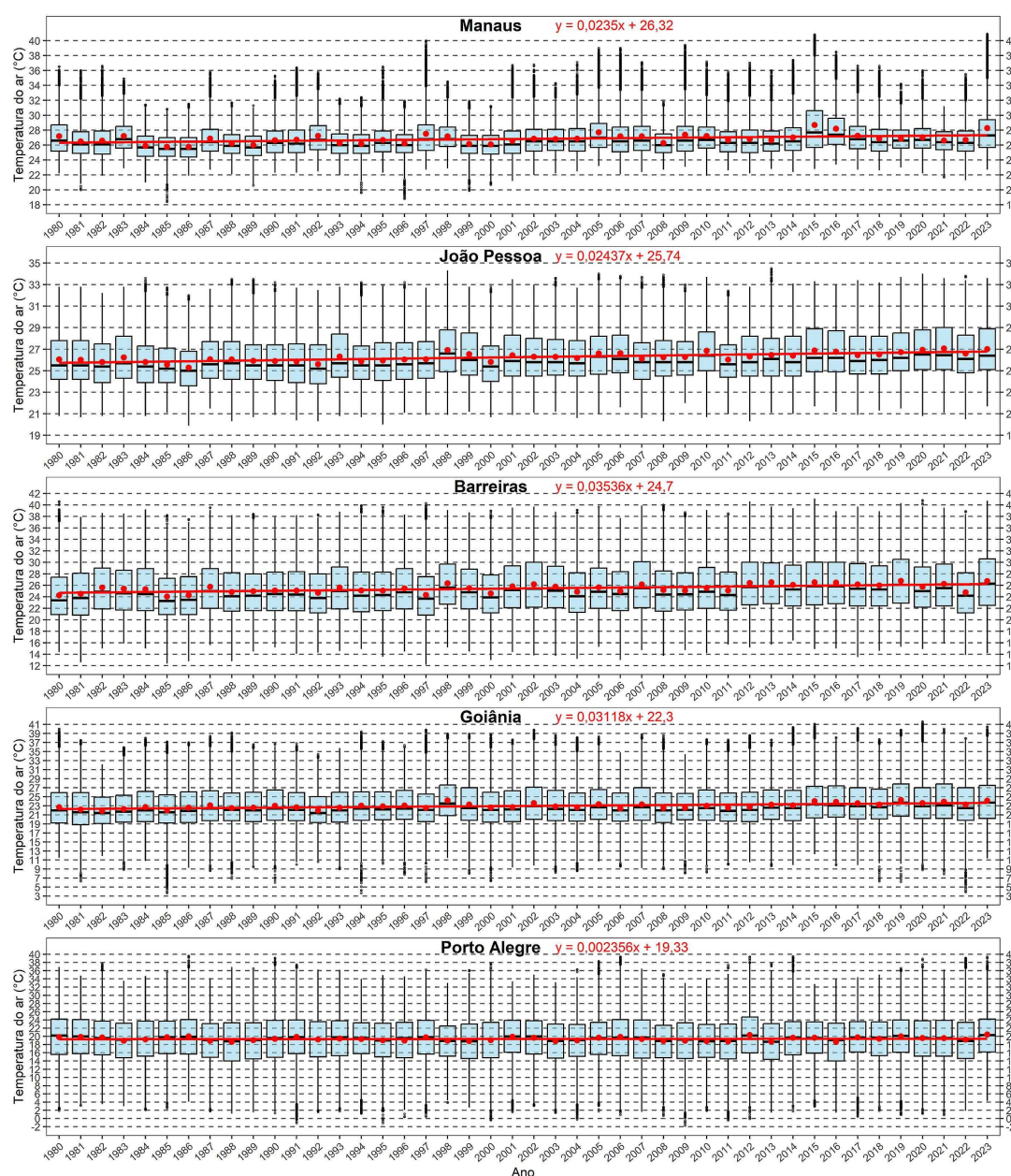


Figura 5 • Dados horários de temperatura do ar a 2 metros: boxplots e tendências lineares

apresenta alta amplitude térmica (temperatura do ar variando de 3 °C a 42 °C); e Porto Alegre apresenta os menores valores de temperatura (com valores negativos), porém com alta amplitude térmica, atingindo máximas de até 40 °C.

A série histórica demonstra a variação interanual dos dados e tendências de aumento dos valores da temperatura do ar ao longo do período. As maiores tendências são observadas em Barreiras e Goiânia, respectivamente; enquanto a menor na cidade de Porto Alegre. Considerando os dados anuais médios horários, as regressões lineares indicam que no período de 1980–2023 ocorreu um aumento das temperaturas do ar em aproximadamente 1,03 °C para Manaus (0,0235 °C/ano; Tau de Kendall +0,309); 1,07 °C para João Pessoa (0,0244 °C/ano; Tau de Kendall +0,567); 1,56 °C para Barreiras (0,0354 °C/ano; Tau de Kendall +0,455); 1,37 °C para Goiânia (0,0312 °C/ano; Tau de Kendall +0,465); e 0,11 °C para Porto Alegre (0,0023 °C/ano; Tau de Kendall –0,042). Com exceção de Porto Alegre, essas tendências são confirmadas pelo teste de Mann-Kendall, com significância estatística de 5%.

A [Figura 6](#) apresenta os boxplots com os dados horários de radiação solar incidente, juntamente com a tendência linear dos dados médios horários anuais ao longo do período de 1980–2023. Os dados de radiação solar apresentados na [Figura 6](#) também demonstram características distintas entre os locais avaliados. Manaus registrou os menores valores médios entre as cidades avaliadas (202 W/m²), e valores máximos de aproximadamente 1000 W/m²; João Pessoa se caracteriza pelos maiores valores médios horários (272,1 W/m²) e máximos de aproximadamente 1100 W/m²; Barreiras e Goiânia apresentam valores horários de radiação solar semelhantes (245,3 W/m² para Barreiras e 232,3 W/m² para Goiânia), com registros de até 1100 W/m² em ambas as cidades; e Porto Alegre registrou valores médios anuais próximos a 210 W/m², com picos de radiação acima de 1100 W/m².

Os dados históricos mostram uma leve tendência de aumento nos valores de radiação solar ao longo do tempo para Barreiras (Tau de Kendall +0,336), Goiânia (Tau de Kendall +0,230) e Porto Alegre (Tau de Kendall +0,104); e uma leve tendência de diminuição para Manaus (Tau de Kendall –0,211) e João Pessoa (Tau de Kendall –0,095). Observa-se que os maiores aumentos são observados em Barreiras, Goiânia e Porto Alegre, respectivamente; enquanto a tendência decrescente mais expressiva é observada em Manaus. Os testes de Mann-Kendall, com significância de 5%, confirmam as tendências crescentes para Barreiras e Goiânia, e a tendência decrescente em Manaus. As tendências observadas em João Pessoa e Porto Alegre não são confirmadas no teste.

A [Figura 7](#) apresenta os boxplots com os dados horários de velocidade do vento a 2 metros, juntamente com a tendência linear dos dados médios horários anuais ao longo do período de 1980–2023.

Os dados da [Figura 7](#) também demonstram características distintas entre os locais avaliados para a velocidade do vento. Manaus registrou os menores valores médios de velocidade do vento entre as cidades avaliadas; João Pessoa se caracteriza pelos maiores valores médios, com máximos de até 8 m/s; Barreiras registra a maioria dos valores entre 1 e 3 m/s, com extremos de até 7 m/s; Goiânia apresenta dados semelhantes aos da cidade de Barreiras, com máximas de até mais de 8 m/s; e Porto Alegre registrou, ao longo do período avaliado, valores médios horários anuais de velocidade do vento entre 2 e 3 m/s e valores extremos de quase 11 m/s.

A série histórica demonstra uma tendência crescente nos valores de velocidade do vento ao longo do tempo, com exceção de Goiânia (Tau de Kendall –0,383), onde se observa uma tendência decrescente. Verifica-se que as maiores tendências de aumento são observadas em João Pessoa (Tau de Kendall +0,161) e Porto Alegre (Tau de Kendall +0,177), respectivamente. Os testes de Mann-Kendall, com significância de 5%, confirmam a tendência observada apenas para a cidade de Goiânia.

Os dados reforçam a importância da consideração do impacto do clima em projetos de pavimentação no Brasil, um país de grande extensão territorial e considerável variabilidade climática. Ainda, as variações climáticas que ocorrem ao longo do tempo impactam as temperaturas do pavimento e, consequentemente, o desempenho das estruturas. Aumentos na temperatura do ar e na radiação solar ocasionam temperaturas mais altas no pavimento, tornando o concreto asfáltico mais suscetível à deformação plástica; enquanto velocidades do vento mais altas causam o efeito oposto, devido ao aumento da perda de calor por convecção, causando uma redução nas temperaturas do pavimento (Faccin *et al.*, 2026).

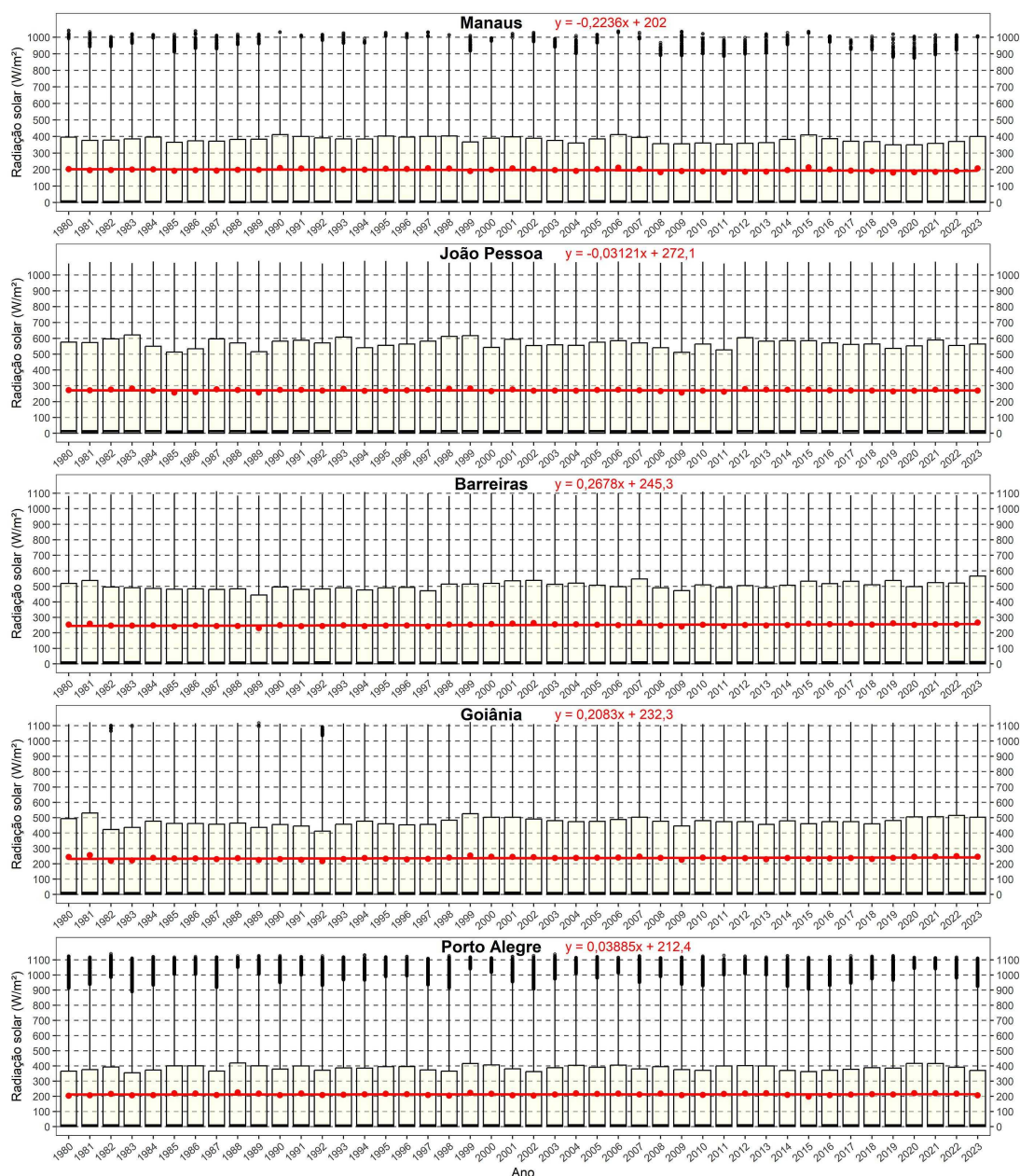


Figura 6 • Dados horários de radiação solar incidente: boxplots e tendências lineares

Não obstante a importância destes três indicadores climáticos, o clima de uma região e os efeitos do aquecimento global são muito complexos e envolvem outros mecanismos de escala global. Além do aquecimento do pavimento, fenômenos como congelamento e degelo, elevação do nível dos oceanos e chuvas extremas podem impactar o desempenho em serviço de uma malha pavimentada. Exemplo disso foi a enchente histórica que atingiu o Estado do Rio Grande do Sul no ano de 2024.

3.2. Perfis de temperatura do pavimento

A [Figura 8](#) mostra os boxplots com os valores horários de temperatura do pavimento a 2 cm de profundidade, bem como a tendência linear dos dados horários médios anuais ao longo do período de 1980–2023. Os valores apresentados confirmam as características climáticas distintas dos locais avaliados. Em Manaus, as temperaturas horárias do pavimento a 2 cm variam entre 21 °C e 74 °C, apresentando os maiores valores médios anuais entre as cidades avaliadas; João Pessoa se caracteriza por uma menor amplitude térmica, com valores entre 21 °C e 65 °C; Barreiras registra valores na faixa de 15 °C a 71 °C;

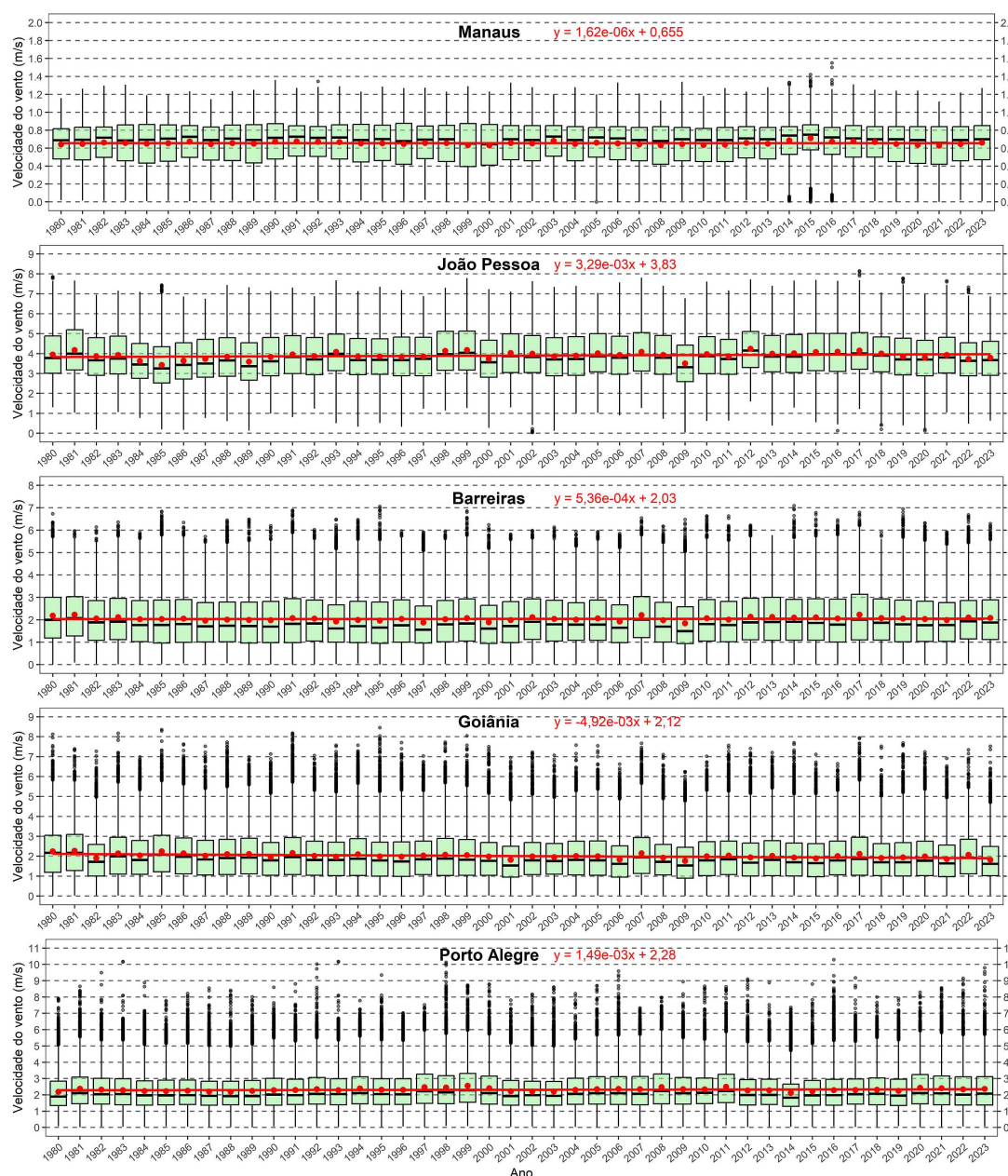


Figura 7 • Dados horários de velocidade do vento a 2 metros: boxplots e tendências lineares

Goiânia apresenta uma alta amplitude térmica (temperatura do pavimento variando entre 7 °C e 71 °C); e Porto Alegre apresenta os menores valores de temperatura do pavimento (até 2 °C), mas com uma alta amplitude térmica, atingindo valores significativos de até 71 °C, e os menores valores médios anuais.

Os dados históricos mostram uma tendência de aumento da temperatura do pavimento ao longo do tempo para as cidades de Manaus, João Pessoa, Barreiras e Goiânia; e uma pequena tendência de diminuição para a cidade de Porto Alegre. Considerando os dados anuais médios horários, as regressões lineares indicam que no período de 1980–2023 ocorreu um aumento das temperaturas do pavimento em aproximadamente 0,35 °C para Manaus (0,008 °C/ano; Tau de Kendall +0,034); 0,7 °C para João Pessoa (0,016 °C/ano; Tau de Kendall +0,368); 2,55 °C para Barreiras (0,058 °C/ano; Tau de Kendall +0,584); 2,64 °C para Goiânia (0,06 °C/ano; Tau de Kendall +0,615) e; uma redução de 0,09 °C para Porto Alegre (−0,002 °C/ano; Tau de Kendall −0,046). Os maiores aumentos no período são observados, nesta ordem, para as cidades de Goiânia, Barreiras, João Pessoa e Manaus, respectivamente. Os testes de Mann-Kendall, com significância de 5%, confirmam as tendências apenas para as cidades de Goiânia e

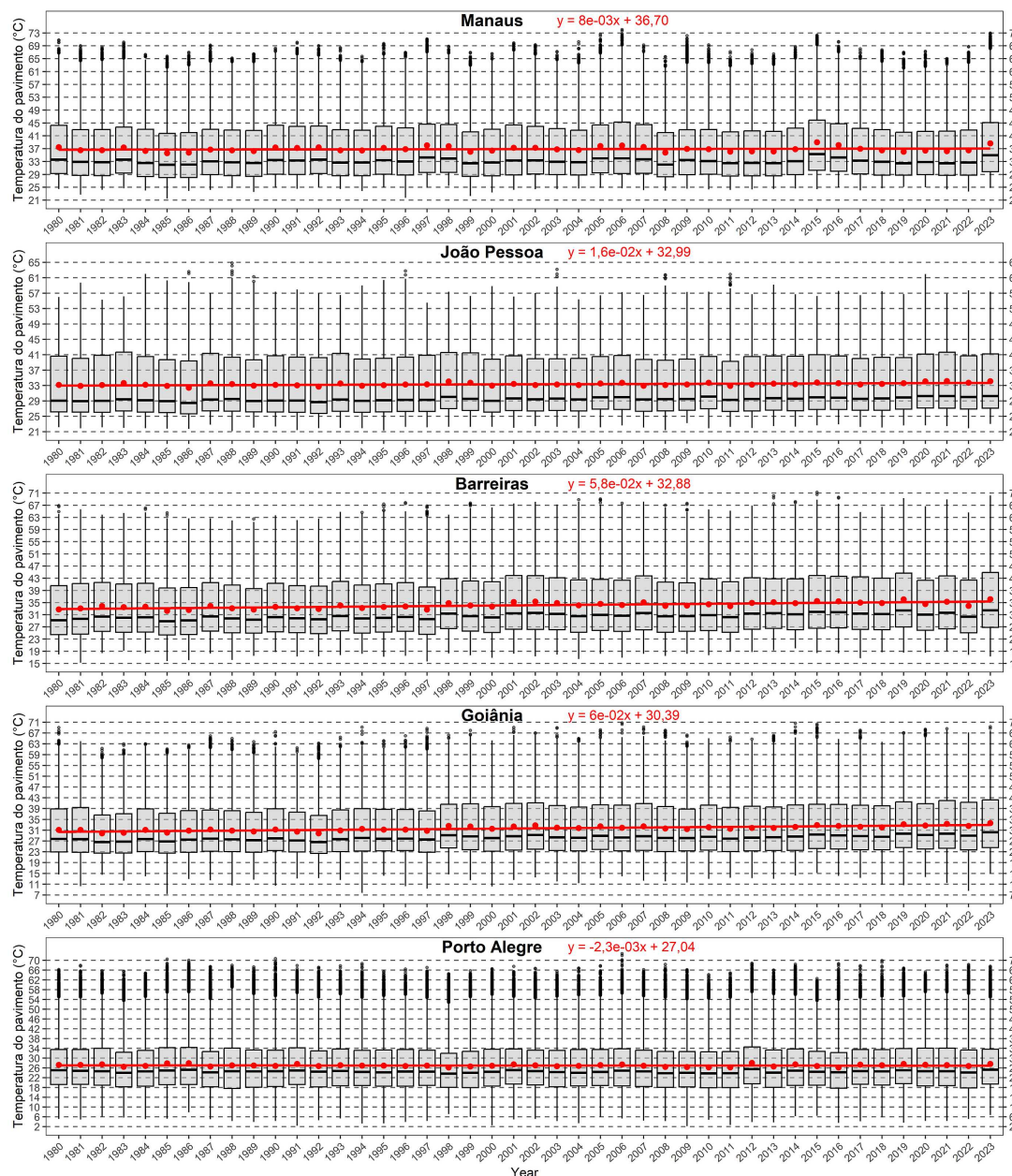


Figura 8 • Temperaturas horárias do pavimento a 2 cm: boxplots e tendências lineares

Barreiras e João Pessoa.

Para a cidade de Manaus, apesar da tendência de queda da radiação solar no período, o aumento da temperatura do ar ocasionou, de forma geral, um pequeno aumento nos valores de temperatura do pavimento ao longo do avaliado, o que não foi confirmado pelo teste de Mann-Kendall. Em João Pessoa, considerando que não houve variação estatística na radiação solar e na velocidade do vento, a tendência de aumento da temperatura do ar ocasionou uma projeção de temperaturas mais elevadas no pavimento no período de 1980 a 2023, confirmada pelo teste de Mann-Kendall. Para Barreiras, os dados e o teste de Mann-Kendall indicam aumentos nas temperaturas do pavimento no período, devido às tendências de aumento dos valores de temperatura do ar e radiação solar. Goiânia foi a cidade que apresentou a maior taxa de aumento nas temperaturas do pavimento, devido à combinação do aumento da temperatura do ar e da radiação, bem como da redução da velocidade do vento no período. Em Porto Alegre, observa-se que não há tendência estatística de aumento ou diminuição nas temperaturas do pavimento, devido ao comportamento semelhante dos dados climáticos.

É importante notar que as análises de tendência consideram dados horários médios anuais para todo o período de 1980–2023, representando o comportamento geral destes. Todavia, de acordo com [Faccin & Specht \(2025\)](#), houve um aumento no número e na frequência de eventos extremos de calor no Brasil nos últimos anos, especialmente após a década de 2000, o que também tem impacto na durabilidade dos pavimentos e justifica medidas mitigatórias.

3.3. Impacto das mudanças do clima na seleção de ligantes asfálticos

A [Figura 9](#) mostra a distribuição dos dados de temperatura do pavimento para os 7 dias consecutivos mais quentes de cada ano, para 2 cm de profundidade, separados em dois períodos: 1980–2000 e 2001–2023, juntamente com o limite de confiabilidade de 98%. Pode-se observar que os valores de temperatura do pavimento aumentaram nas cidades de Manaus, Barreiras e Goiânia, quando comparado o período mais recente (2001–2023) com o mais distante (1980–2000).

Em João Pessoa e Porto Alegre, não houve aumentos da temperatura do pavimento, ao longo dos períodos avaliados (1980–2000 e 2001–2023), capazes de alterar o grau de alta temperatura dos ligantes asfálticos. João Pessoa demanda um PG de alta temperatura de pelo menos 64 °C; e Porto Alegre, um PG de alta de 70 °C para 98% de confiabilidade, independentemente do período considerado. Em João Pessoa, a temperatura máxima para 98% de confiabilidade passou de 58,38 °C no período de 1980–2000

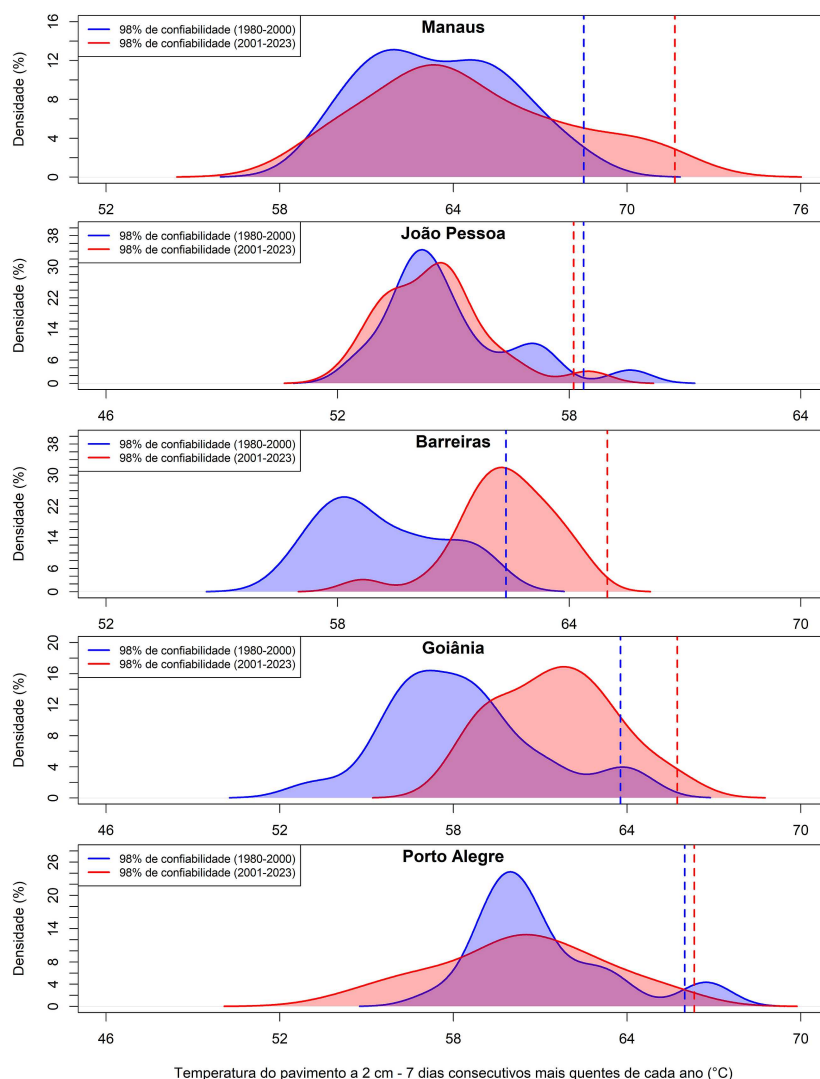


Figura 9 • Distribuição dos dados de temperatura do pavimento para os 7 dias consecutivos mais quentes de cada ano (1980–2000 e 2001–2023), confiabilidade de 98%

para 58,11 °C no período de 2001–2023; e em Porto Alegre, de 65,99 °C para 66,32 °C.

Os resultados são consistentes com estudos realizados em diversos países, inclusive no Brasil, apresentados na introdução deste artigo, que também identificaram aumentos do PG de alta temperatura associados à elevação das temperaturas decorrente das mudanças climáticas. O aumento na temperatura dos pavimentos, causado pelas mudanças climáticas, pode estar levando à seleção inadequada do tipo de ligante asfáltico, além de impor maiores exigências aos materiais asfálticos em termos de desempenho. Para mitigar os efeitos da perda de desempenho do material com o aumento da temperatura, a modificação com polímeros/borracha ou outros agentes pode ser necessária (Underwood, 2021; Schuster *et al.*, 2022). Diante disso, espera-se um aumento nos custos de infraestrutura rodoviária, dadas as condições climáticas mais severas em que os materiais asfálticos estão e estarão inseridos, além da necessidade de novas especificações que desafiarão as áreas de pesquisa em ligantes e materiais asfálticos. Os resultados também evidenciam a importância de adotar metodologias que considerem o clima na etapa de seleção do ligante, como a especificação Superpave, permitindo a incorporação dos efeitos das mudanças climáticas nesse processo.

3.4. Impacto das mudanças do clima na deformação permanente da camada asfáltica

Com o objetivo de explorar os impactos das mudanças climáticas nos afundamentos em trilha de roda na camada asfáltica, a Figura 10 apresenta os valores de ATR ao longo de 120 meses para a cidade de Goiânia, como exemplo, considerando 4 períodos climáticos históricos (1980–1990; 1991–2001; 2002–2012 e 2013–2023), para as 3 estruturas e condições avaliadas. A Figura 10a mostra os resultados de ATR da camada asfáltica simulados no FlexPAVE™ 1.1, e a Figura 10b os valores previstos usando a função de transferência proposta por Barros (2022), para 95% de confiabilidade. Pode-se observar que, de maneira geral, à medida que se consideram dados climáticos mais recentes, o pavimento atinge o limite de ATR de 7 mm mais rapidamente. Essa redução na vida útil é causada pelo aumento da temperatura do pavimento, principalmente para a estrutura 1, onde foi utilizada uma mistura asfáltica com ligante asfáltico convencional (PG 64S-16).

A Tabela 3 apresenta os valores previstos de ATR na camada asfáltica simulados no FlexPAVE™ 1.1, considerando a função de transferência proposta por Barros (2022), para 95% de confiabilidade. Os resultados incluem as cidades de Manaus, João Pessoa, Barreiras, Goiânia e Porto Alegre, adotando quatro períodos climáticos passados (1980–1990, 1991–2001, 2002–2012 e 2013–2023) e as condições estabelecidas na Figura 4. A tabela apresenta os valores de ATR da camada asfáltica considerando o tráfego total analisado; os valores de tráfego (ESAL) e a vida útil (meses) para o limite de ATR de 7 mm; além do impacto na vida útil em comparação ao período base (1980–1990).

Conforme pode-se observar na Tabela 3, o desempenho à deformação permanente reflete as diferenças do clima para os locais avaliados, reforçando a importância da consideração das condições climáticas nos projetos de pavimentação no Brasil. Os maiores valores de ATR foram identificados em Manaus; enquanto os menores, em Porto Alegre.

Em Manaus, o impacto negativo no desempenho à deformação permanente da camada asfáltica foi observado após a década de 2000, especialmente no período mais recente (2013–2023). Neste período, ao comparar os valores simulados de ATR com os do período base (1980–1990), pode-se observar uma redução na vida útil de até 9,7% para a estrutura 1, com ligante PG 64S-16; 6,1% para a estrutura 2, com ligante PG 70S-16; e 3,3% para a estrutura 3, com ligante PG 76E-22. Os resultados são consistentes com os dados climáticos, uma vez que é perceptível que, de forma geral, após o ano 2000, foram registrados valores mais elevados de temperatura do ar. Faccin & Specht (2025) destacam um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de calor na cidade, especialmente após o ano 2000.

Para João Pessoa, os dados climáticos simulados ao longo do tempo resultam em pequenas variações dos valores de ATR. O maior impacto é observado para o período mais recente (2013–2023), onde observa-se uma redução de vida útil de 9,2% para a estrutura 2 e 2,7% para a estrutura 3. Para a estrutura 1, apesar do aumento da formação de ATR no período mais recente, o limite de 7 mm não foi atingido. De acordo com Faccin e Specht (2025), a cidade vem registrando um aumento expressivo das quantidades e intensidade das ondas de calor nos últimos anos, especialmente após o ano 2015. Todavia, apesar da leve

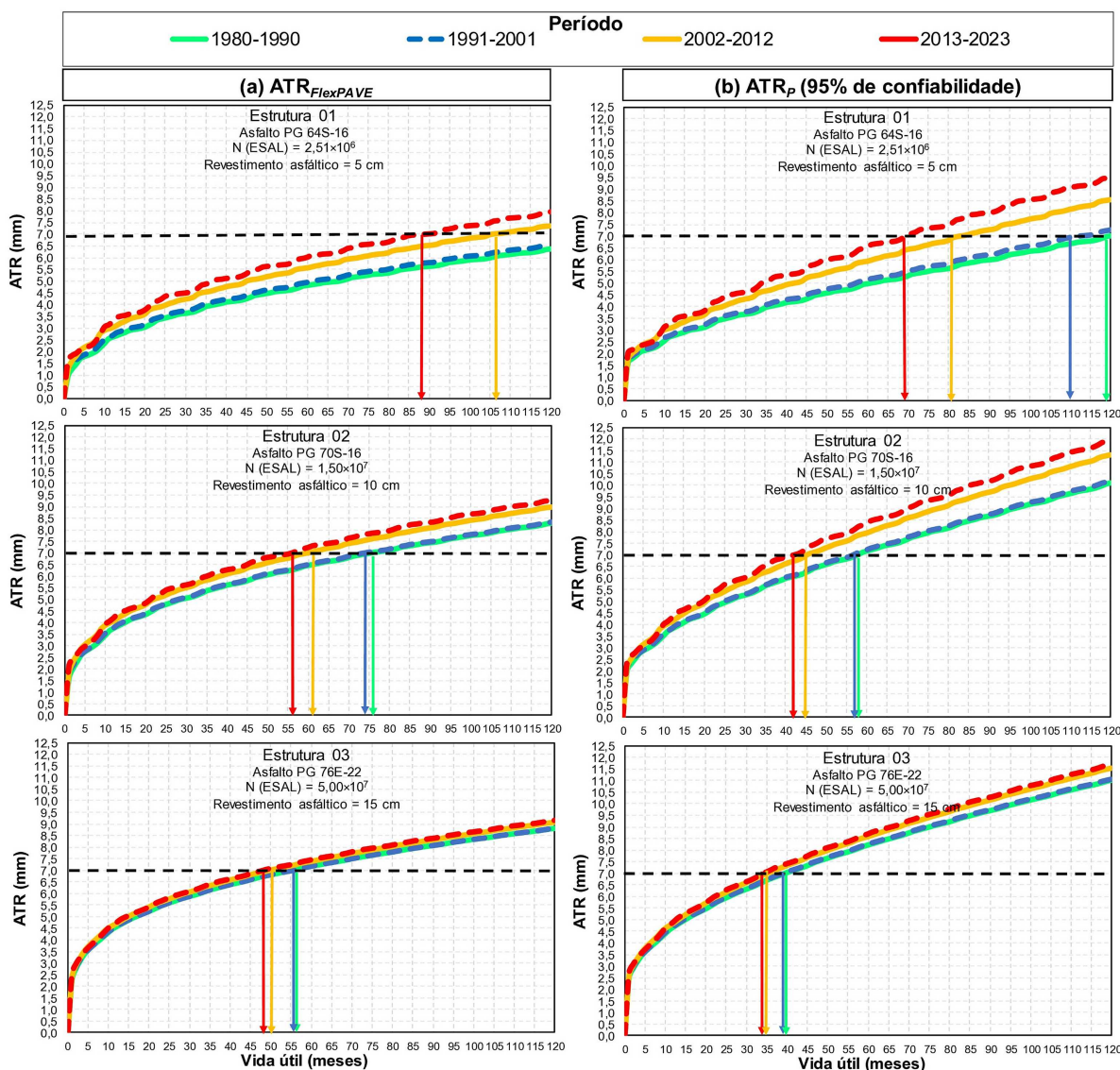


Figura 10 • Valores de ATR da camada asfáltica em Goiânia: (a) resultados previstos no FlexPAVE 1.1; (b) valores previstos usando a função de transferência de Barros (2022)

tendência de aumento nos valores de temperatura do pavimento (Figura 8), as variações climáticas não foram suficientes para causar impactos significativos no desempenho da deformação permanente. Essa situação pode ser explicada pela menor amplitude térmica no local, sem temperaturas muito extremas, que são as principais causas do aumento de ATR.

Em Porto Alegre, os dados climáticos simulados resultam em uma pequena variação dos valores simulados de ATR ao longo do período avaliado. As variações climáticas ocorridas no período de 1980-2023 não foram suficientes para causar impactos significativos no desempenho à deformação permanente da camada asfáltica. Ao comparar os valores de ATR simulados para o período mais recente (2013–2023) com os do período base (1980–1990), pode-se observar uma redução na vida útil de 3,0% para a estrutura 2, com ligante PG 70S-16. Para a estrutura 1, apesar do aumento da formação de ATR no período mais recente, o limite de 7 mm não foi atingido. Todavia, cabe registrar que os valores representam um ano típico mediano, e segundo Faccin & Specht (2025), a cidade vem sofrendo com eventos extremos de calor mais intensos nos últimos anos. Para Porto Alegre, por exemplo, se considerarmos o clima do ano de 2014, onde, conforme Faccin & Specht (2025), foi registrada a onda de calor mais severa e elevadas temperaturas do pavimento, observa-se uma redução na vida útil de 15,0% para a estrutura 2, com ligante PG 70S-16; e de 5,4% para a estrutura 3 ao comparar com o período base (1980–1990).

Tabela 3 • Resumo dos resultados de ATR considerando os dados climáticos históricos avaliados, para 95% de confiabilidade

Cidade	Período	ATR da camada asfáltica para tráfego total (mm)			Tráfego para ATR máximo de 7 mm (ESAL)			Vida útil ATR 7 mm (meses)			ATR _{Impacto} (%) ¹		
		Estruturas											
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Manaus, AM	1980-1990	10,72	13,13	12,05	1,07E+06	3,77E+06	1,16E+07	56	34	32	—	—	—
	1991-2001	10,71	13,21	12,10	1,07E+06	3,77E+06	1,16E+07	56	34	32	0,0	0,0	0,0
	2002-2012	11,04	13,42	12,18	1,01E+06	3,66E+06	1,12E+07	53	33	31	-5,8	-3,1	-3,3
	2013-2023	11,37	13,54	12,18	9,64E+05	3,54E+06	1,12E+07	51	32	31	-9,7	-6,1	-3,3
João Pessoa, PB	1980-1990	6,56	10,01	10,85	2,51E+06 ²	6,64E+06	1,48E+07	120	58	40	—	—	—
	1991-2001	6,74	10,15	10,92	2,51E+06 ²	6,51E+06	1,48E+07	120	57	40	— ²	-1,8	0,0
	2002-2012	6,65	10,07	10,88	2,51E+06 ²	6,64E+06	1,48E+07	120	58	40	— ²	0,0	0,0
	2013-2023	7,05	10,41	11,02	2,51E+06 ²	6,03E+06	1,44E+07	118	53	39	— ²	-9,2	-2,7
Barreiras, BA	1980-1990	7,98	11,01	11,32	1,90E+06	5,42E+06	1,36E+07	94	48	37	—	—	—
	1991-2001	8,78	11,57	11,52	1,58E+06	4,95E+06	1,28E+07	80	44	35	-16,6	-8,8	-5,8
	2002-2012	10,33	12,70	11,94	1,13E+06	4,01E+06	1,20E+07	59	36	33	-40,4	-26,1	-11,5
	2013-2023	11,05	13,24	12,14	9,85E+05	3,66E+06	1,12E+07	52	33	31	-48,0	-32,5	-17,3
Goiânia, GO	1980-1990	7,00	10,11	11,02	2,48E+06	6,64E+06	1,44E+07	119	58	39	—	—	—
	1991-2001	7,28	10,20	11,05	2,27E+06	6,51E+06	1,44E+07	110	57	39	-8,7	-1,8	0,0
	2002-2012	8,54	11,33	11,52	1,63E+06	5,06E+06	1,28E+07	82	45	35	-34,6	-23,7	-11,0
	2013-2023	9,53	11,96	11,72	1,36E+06	4,71E+06	1,24E+07	70	42	34	-45,1	-29,0	-13,7
Porto Alegre, RS	1980-1990	6,11	9,01	10,84	2,51E+06 ²	8,39E+06	1,48E+07	120	72	40	—	—	—
	1991-2001	6,38	9,14	10,84	2,51E+06 ²	8,13E+06	1,48E+07	120	70	40	— ²	-3,0	0,0
	2002-2012	6,21	9,07	10,83	2,51E+06 ²	8,26E+06	1,48E+07	120	71	40	— ²	-1,5	0,0
	2013-2023	6,28	9,52	11,01	2,51E+06 ²	8,13E+06	1,48E+07	120	70	40	— ²	-3,0	0,0

Notas:

¹ Impacto na vida útil comparado ao período de referência de 1980-1990 utilizando a [Equação 5](#)² Não atingiu o limite de 7 mm para o ATR

Ao encontro dos achados para a seleção de ligantes asfálticos ([Figura 9](#)), as cidades com os impactos negativos mais expressivos nos valores de ATR são Barreiras e Goiânia. Os resultados são consistentes com as variações nos dados climáticos observados para essas duas cidades, nas quais foram observadas as maiores tendências de aumento da temperatura do ar e da radiação solar, causando, assim, os maiores aumentos na temperatura do pavimento ao longo do tempo. No período mais recente (2013–2023), ao comparar os valores de ATR simulados com os do período base (1980–1990), é possível observar para Barreiras uma redução na vida útil de até 48,0% para a estrutura 1, com ligante PG 64S-16; 32,5% para a estrutura 2, com ligante PG 70S-16; e 17,3% para a estrutura 3, com ligante PG 76E-22. No mesmo período, em Goiânia, obteve-se uma redução na vida útil de até 45,1% para a estrutura 1, com ligante PG 64S-16; 29,0% para a estrutura 2, com ligante PG 70S-16; e 13,7% para a estrutura 3, com ligante PG 76E-22. Essas cidades estão localizadas em regiões muito vulneráveis às mudanças climáticas ([Darela Filho et al., 2016](#)), sofrendo com o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de calor ([Faccin & Specht, 2025](#)).

Ainda, verificou-se que o desempenho à deformação permanente foi influenciado não apenas pelo tipo de ligante asfáltico, mas também pelas características estruturais adotadas. As estruturas 2 e 3, além de utilizarem ligantes com maior grau PG, apresentam maiores espessuras de revestimento asfáltico e foram concebidas para níveis mais elevados de tráfego em comparação à estrutura 1. Assim, o comportamento mais crítico observado na estrutura 1 está associado ao efeito combinado de menor espessura da camada asfáltica, utilização de ligante convencional e maior susceptibilidade aos aumentos de temperatura. Mesmo considerando essas diferenças, observou-se que misturas produzidas com ligantes de maior desempenho apresentaram menor suscetibilidade às elevações de temperatura, especialmente aquela modificada com alta concentração de polímeros. Os resultados indicam que o uso de ligantes

modificados é uma estratégia tangível e eficiente para enfrentar os efeitos dos aumentos de temperatura, ao encontro das recomendações de [Underwood \(2021\)](#) e [Schuster *et al.* \(2022\)](#).

4. Conclusões

O impacto das mudanças climáticas na seleção de ligantes e no desempenho à deformação permanente de revestimentos asfálticos, considerando séries históricas de clima (1980 a 2023), foi avaliado em cinco diferentes locais no Brasil, para três níveis de tráfego, diferentes estruturas e materiais asfálticos. Pode-se concluir que:

- a) Os dados climáticos históricos demonstram que o impacto das mudanças climáticas em pavimentos asfálticos é uma realidade no Brasil, especialmente para algumas regiões, alterando as classes de ligantes asfálticos e reduzindo a vida útil em relação à formação de trilhas de roda na camada asfáltica.
- b) A consideração de um clima estacionário pode levar à seleção inadequada de ligantes asfálticos e ao subdimensionamento das estruturas de pavimentos, impactando os custos da infraestrutura brasileira.
- c) Comparando o período mais recente (2001–2023) com o mais distante (1980–2000), observa-se um aumento de um grau na PG de alta temperatura dos ligantes asfálticos para as cidades de Manaus, Barreiras e Goiânia. Esses aumentos de temperatura demandam materiais asfálticos de melhor qualidade e, em alguns casos, ligantes modificados.
- d) Em relação ao impacto das mudanças climáticas nos valores de ATR da camada asfáltica, foram observados comportamentos distintos para os locais avaliados, com os maiores impactos registrados nas cidades de Barreiras e Goiânia, com reduções na vida útil de até 48,0% quando comparados os resultados simulados de ATR do período mais recente (2013–2023) com os do período base (1980–1990), considerando um limite de 7 mm para os afundamentos.

Os resultados, em conjunto com a literatura apresentada, sugerem que a utilização de ligantes modificados pode ser uma alternativa para mitigar os efeitos do aumento das temperaturas, devido à menor susceptibilidade desses materiais às variações climáticas. Ainda, as mudanças do clima podem ocasionar custos adicionais não previstos inicialmente nos planos de negócios e no planejamento estratégico de concessionárias de rodovias e órgãos públicos, impactando a rentabilidade dos investimentos e os custos da infraestrutura brasileira, especialmente para algumas regiões do país. Devido aos impactos negativos já configurados para o passado, e considerando as projeções de aumento de temperatura para o futuro, torna-se urgente a implementação de medidas para mitigar o aquecimento global, bem como estratégias de adaptação, a fim de construir uma infraestrutura rodoviária mais resiliente no Brasil. Ademais, entende-se pela urgência na implementação de metodologias de projeto e seleção de materiais que possibilitem a consideração das condições climáticas.

Por fim, é importante ressaltar que este estudo avaliou apenas o impacto das mudanças climáticas na temperatura do pavimento e, conseqüentemente, na seleção de ligantes asfálticos e na formação de trilhas de roda da camada asfáltica. No entanto, as mudanças no perfil de temperatura também podem impactar o desempenho à deformação permanente de outras camadas do pavimento, bem como o trincamento da camada asfáltica, o envelhecimento do ligante e os resultados de irregularidade longitudinal. Ademais, a infraestrutura rodoviária é fortemente afetada por outras condições climáticas impactadas pelas mudanças do clima, como precipitações extremas, elevação do lençol freático e inundações.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro: à ANP e PETROBRAS; ao DNIT; à CAPES; e ao CNPq pelas bolsas na modalidade Produtividade em Pesquisa (PQ).

Declaração de contribuição de autoria CRediT

Cléber Faccin: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização, Escrita — versão inicial, Escrita — revisão e edição. *Luciano Pivoto Specht*: Conceitualização, Supervisão, Validação, Escrita — revisão e edição.

Uso de tecnologia assistida por inteligência artificial

Os autores declaram que nenhuma ferramenta de inteligência artificial foi usada na pesquisa aqui relatada ou na preparação deste artigo.

Declaração de conflitos de interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesses relacionado a este artigo e seu conteúdo.

Declaração de disponibilidade de dados

Os dados, modelos e códigos que suportam os resultados deste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente, Cléber Faccin.

Referências

- AASHTO (2022). *AASHTO M 323: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2023). *AASHTO M 320: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abttan, A. A., W. Zeida, T. Merabtene, A. Gamal, & S. Mirou (2024). Implication of future temperature changes on asphalt binder selection and simulated pavement performance in Sharjah. *Innovative Infrastructure Solutions* 9(4), 88. DOI: [10.1007/s41062-024-01408-6](https://doi.org/10.1007/s41062-024-01408-6).
- Almeida, A. & L. Picado-Santos (2022). Asphalt road pavements to address climate change challenges – An overview. *Applied Sciences* 12(24), 12515. DOI: [10.3390/app122412515](https://doi.org/10.3390/app122412515).
- Barros, L. M. (2022). *Implementação do ensaio Stress Sweep Rutting e do Shift Model para a previsão da deformação permanente de misturas asfálticas brasileiras*. Doutorado (tese), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. URL: <https://coc.ufrj.br/lista-teses-de-doutorado/implementacao-do-ensaio-stress-sweep-rutting-e-do-shift-model-para-a-previsao-da-deformacao-permanente-de-misturas-asfalticas-brasileiras/> [visitado 22/9/2026].
- Brondani, C., C. Faccin, L. P. Specht, A. V. Nummer, D. S. Pereira, P. M. Vestena, & M. Baroni (2022). Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures: influence of aggregates, visual analysis, and mechanical tests. *Journal of Materials in Civil Engineering* 35(2), 04022433. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004603](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004603).
- Darela Filho, J. P., D. M. Lapola, R. R. Torres, & M. C. Lemos (2016). Socio-climatic hotspots in Brazil: how do changes driven by the new set of IPCC climatic projections affect their relevance for policy. *Climatic Change* 136(3-4), 413–425. DOI: [10.1007/s10584-016-1635-z](https://doi.org/10.1007/s10584-016-1635-z).
- Delgadillo, R., L. Arteaga, C. Wahr, & R. Alcaful (2018). The influence of climate change in Superpave binder selection for Chile. *Road Materials and Pavement Design* 21(3), 607–622. DOI: [10.1080/14680629.2018.1509803](https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1509803).
- Faccin, C. & L. P. Specht (2025). Caracterização de eventos extremos de calor: análises com foco no impacto na pavimentação asfáltica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 40, 1–16. DOI: [10.1590/0102-778640250004](https://doi.org/10.1590/0102-778640250004).
- Faccin, C., L. P. Specht, P. O. B. Almeida Jr., S. L. Schuster, P. M. Vestena, L. D. Bueno, & D. S. Pereira (2026). Application of the K-Means method to classify climatic regions of asphalt pavements in Brazil. *Ciência e Natura* 48, e87741. DOI: [10.5902/2179460X87741](https://doi.org/10.5902/2179460X87741).
- Faccin, C., L. P. Specht, L. M. Barros, S. L. Schuster, & P. O. B. Almeida Jr. (2026). Impact of climate data sources on the rutting performance of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*. DOI: [10.1007/s42947-025-00696-0](https://doi.org/10.1007/s42947-025-00696-0).
- Faccin, C., L. P. Specht, D. S. Pereira, & P. O. B. Almeida Jr. (2025). Seleção de ligantes asfálticos com base na metodologia SUPERPAVE-PG para o estado do Rio Grande do Sul. *Revista ENINFRA* 4(4), 72–94. DOI: [10.70859/2764-9539.v4.n4.108](https://doi.org/10.70859/2764-9539.v4.n4.108).
- Faccin, C., L. P. Specht, D. S. Pereira, S. L. Schuster, C. Brondani, G. G. Guex, & P. M. Vestena (2024). Desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura de pavimento flexíveis. *Transportes* 32(2), e2984. DOI: [10.58922/transportes.v32i2.2984](https://doi.org/10.58922/transportes.v32i2.2984).
- Gelaro, R., W. Mccarty, M. J. Suárez, R. Todling, A. Molod, L. Takacs, C. A. Randles, A. Darmanov, M. G. Bosilovich, R. Reichle, K. Wargan, L. Coy, R. Cullather, C. Draper, S. Akella, V. Buchard, A. Conaty, A. M. da Silva, W. Gu, G.-K. Kim, R. Koster, R. Lucchesi, D. Merkova, J. E. Nielsen, G. Partyka, S. Pawson, W. Putman, M. Rienecker, S. D. Schubert, M. Sienkiewicz, & B. Zhao (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* 30(14), 5419–5454. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0758.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1).
- Gong, Z., L. Zhang, J. Wu, Z. Xiu, J. Wang, & Y. Miao (2022). Review of regulation techniques of asphalt pavement high temperature for climate change adaptation. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* 3(1), 9. DOI: [10.1186/s43065-022-00054-5](https://doi.org/10.1186/s43065-022-00054-5).
- Gudipudi, P. P., B. S. Underwood, & A. Zalgout (2017). Impact of climate change on pavement structural performance in the United States. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 57, 172–184. DOI: [10.1016/j.trd.2017.09.022](https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.022).

- IPCC (2023). Climate change 2023: Synthesis report. summary for policymakers. Synthesis report, Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> [visitado 21/09/2026].
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Measures*. London: Charles Griffin & Co Ltd.
- Kennedy, T. W., G. A. Huber, E. T. Harrigan, R. J. Cominsky, C. S. Hughes, H. Von Quintus, & J. S. Moulthrop (1994). *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Kumlai, S., P. Jitsangiam, & P. Pichayapan (2017). The implications of increasing temperature due to climate change for asphalt concrete performance and pavement design. *KSCE Journal of Civil Engineering* 21(4), 1222–1234. DOI:10.1007/s12205-016-1080-6.
- Liu, T., S. Yang, L. Zhu, B. Liao, & Q. Zhang (2023). Influence of climate change on asphalt binder selection in China. *The International Journal of Pavement Engineering* 24(1), 2252145. DOI:10.1080/10298436.2023.2252145.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13(3), 245–259. DOI:10.2307/1907187.
- Marengo, J. A., C. A. Nobre, E. Salati, & T. Ambrizzi (2007). *Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século XXI*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- Miao, Y., J. Sheng, & J. Ye (2022). An assessment of the impact of temperature rise due to climate change on asphalt pavement in China. *Sustainability* 14(15), 9044. DOI:10.3390/su14159044.
- Mills, B. N., S. L. Tighe, J. Andrey, J. T. Smith, & K. Huen (2009). Climate change implications for flexible pavement design and performance in Southern Canada. *Journal of Transportation Engineering* 135(10), 773–782. DOI:10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:10(773).
- NASA (2024). *NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources*. National Aeronautics and Space Administration. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> [visitado 15/04/2025].
- Nascimento, L. A. H. (2015). *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Doutorado (tese), North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Schuster, S. L., C. Faccin, P. O. B. Almeida Jr., P. M. Vestena, L. D. Bueno, P. S. Ilha, L. P. Specht, D. S. Pereira, & L. A. Hermann (2022). Impacto das mudanças climáticas na seleção de ligantes asfálticos no Brasil considerando o grau de desempenho (PG). In *Anais da Rio Oil & Gas Expo and Conference*, Rio de Janeiro. IBP. DOI:10.48072/2525-7579.rog.2022.089.
- Shamsaei, M., A. Carter, & M. Vaillancourt (2022). A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods. *Construction & Building Materials* 359, 129350. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.129350.
- Sheng, J., Y. Miao, & L. Wang (2023). An assessment of the impact of climate change on asphalt binder selection in east China based on the ARIMA model. *Sustainability* 15(21), 15667. DOI:10.3390/su152115667.
- Sparks, A. (2018). nasapower: A NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. *Journal of Open Source Software* 3(30), 1035. DOI:10.21105/joss.01035.
- Sparks, A. (2024). nasapower: NASA POWER API Client. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/nasapower/index.html> [visitado 15/04/2025].
- Team, R. C. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. URL: <https://www.r-project.org/> [visitado 13/11/2025].
- Tilio Neto, P. (2008). *Ecopolítica das Mudanças Climáticas: O IPCC e o Ecologismo dos Pobres*. Doutorado (tese), Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI:10.11606/T.8.2008.tde-09102008-175152.
- Underwood, B. S. (2021). A method to select general circulation models for pavement performance evaluation. *The International Journal of Pavement Engineering* 22(2), 134–146. DOI:10.1080/10298436.2019.1580365.
- Underwood, B. S., Z. Guido, P. Gudipudi, & Y. Feinberg (2017). Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. *Nature Climate Change* 7(10), 704–707. DOI:10.1038/nclimate3390.
- Viola, F. & C. Celauro (2015). Effect of climate change on asphalt binder selection for road construction in Italy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 37, 40–47. DOI:10.1016/j.trd.2015.04.012.
- Wang, Y. D., Y. Xie, M. Um, & Y. R. K. Richard (2021). Development of preliminary transfer functions for performance predictions in FlexPAVE™. *Construction & Building Materials* 266, 121182. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121182.
- Zhang, Q., S. Yang, & G. Chen (2024). Regional variations of climate change impacts on asphalt pavement rutting distress. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 126, 103968. DOI:10.1016/j.trd.2023.103968.