

Desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura de pavimento flexíveis

Development of a flexible pavement temperature profile prediction model

Cléber Faccin¹, Luciano Pivoto Specht¹, Deividi Da Silva Pereira¹, Silvio Lisboa Schuster¹, Chaveli Brondani¹, Gabriella Gaube Guex¹, Pablo Menezes Vestena²

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

²North Carolina State University, Raleigh, Carolina do Norte, Estados Unidos da América

Contato: crfaccin@gmail.com,  (CF); luspecht@ufsm.br,  (LPS); dsp@ufsm.br,  (DSP); silviolschuster@gmail.com,  (SLS); chavelib@gmail.com,  (CB); gabriellaguex@yahoo.com,  (GGG); pmvesten@ncsu.edu,  (PMV)

Recebido:

22 de janeiro de 2023

Revisado:

10 de abril de 2024

Aceito:

3 de maio de 2024

Publicado:

4 de julho de 2024

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Palavras-chave:

Modelo numérico.

Temperatura.

Pavimentos flexíveis.

Propriedades térmicas.

Keywords:

Numerical model.

Temperature.

Flexible pavement.

Thermal properties.

DOI: 10.58922/transportes.v3i2i.2984

RESUMO

A previsão do perfil e histórico de temperatura é necessária para fins de análise e projeto de pavimentos flexíveis. O desempenho dos pavimentos é influenciado pelas condições climáticas locais e a temperatura do pavimento é um aspecto importante, especialmente em um cenário de mudanças climáticas que indicam aumento das temperaturas no Brasil. Além do impacto nas propriedades mecânicas e no desempenho dos pavimentos asfálticos, a temperatura pode afetar substancialmente o meio ambiente, causando um fenômeno denominado ilha de calor urbana. Nesse contexto, o presente artigo descreve o desenvolvimento de um modelo numérico unidimensional para calcular perfis de temperatura de pavimentos flexíveis. O modelo utiliza dados climáticos de radiação solar, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e velocidade do vento; e considera as propriedades térmicas dos materiais utilizados. Ele é baseado nos fundamentos do balanço de energia entre o pavimento e seu entorno, e contempla a análise de pavimentos com até 4 camadas. Com isso, busca-se uma alternativa consistente para prever a variação da temperatura do pavimento e estudar o impacto da transferência de calor nos pavimentos asfálticos e no meio ambiente. O modelo foi comparado com uma solução analítica e validado com dados medidos em outra pesquisa disponível na literatura e dados modelados no EICM, demonstrando boa correspondência para os dados simulados. Os resultados demonstram a importância das propriedades termofísicas na temperatura dos pavimentos. Pode-se concluir que o modelo é adequado para incorporação em ferramentas de cálculo de temperatura de pavimentos flexíveis e estudos de ilhas de calor.

ABSTRACT

The prediction of temperature profile and history is necessary for the analysis and design of flexible pavements. Pavement performance is influenced by local weather conditions and pavement temperature is a crucial aspect, especially in a scenario of climate change indicating rising temperatures in Brazil. In addition to impacting the mechanical properties and performance of asphalt pavements, temperature can substantially affect the environment, causing a phenomenon known as the urban heat island. In this context, this article describes the development of a one-dimensional numerical model to calculate temperature profiles of flexible pavements. The model uses climatic data such as solar radiation, air temperature, dew point temperature, and wind speed, while considering the thermal properties of the materials used. It is based on the principles of energy balance between the pavement and its surroundings and includes the analysis of pavements with up to 4 layers. The aim is to provide a consistent alternative for predicting pavement temperature variations and studying the impact of heat transfer on asphalt pavements and the environment. The model was compared with an analytical solution and validated with data measured in another study available in the literature and data modeled in EICM, demonstrating good agreement with the simulated data. The results demonstrate the importance of thermophysical properties on pavement temperatures. It can be stated that the model is suitable for incorporation into tools for calculating flexible pavement temperatures and studying urban heat islands.



1. INTRODUÇÃO

O desempenho dos pavimentos é impactado, dentre outras causas, pelas condições climáticas locais (Medina e Motta, 2015), uma vez que as propriedades críticas dos materiais mudam com as alterações das condições de umidade e temperatura (Andrey et al., 2013; Santos et al., 2020). Nesse contexto, a temperatura do pavimento é um dos aspectos mais importantes para os pavimentos flexíveis, influenciando principalmente os materiais asfálticos (Ramadhan e Al-Abdul Wahhab, 1997; Rajapaksha et al., 2023).

Conforme Motta (1979), o estudo da temperatura dos pavimentos flexíveis é muito importante visto terem as misturas betuminosas comportamento viscoelástico e serem sensíveis ao gradiente térmico. Temperaturas mais altas podem reduzir a rigidez dos materiais, alterando a resposta do pavimento às cargas do tráfego e reduzindo a sua capacidade de resistir à deformação permanente (Sousa, Craus e Monismith, 1991; Faccin et al., 2021a). Observa-se, também, que a temperatura, assim como sua variação espacial e temporal, é um fator preponderante na previsão da vida de fadiga de pavimentos asfálticos (Moreno-Navarro et al., 2015; Santiago et al., 2018; Santos et al., 2020; Chaves, 2021).

Além do impacto da transferência de calor nas propriedades mecânicas e no desempenho dos pavimentos asfálticos, ela pode afetar substancialmente o meio ambiente, contribuindo para o fenômeno denominado ilha de calor urbana. A ilha de calor apresenta-se como uma área urbana com temperaturas mais elevadas que o seu entorno, sendo uma parte considerável desta elevação atribuída aos pavimentos asfálticos (Anand e Sailor, 2022; Shamsaei, Carter e Vaillancourt, 2022).

Conforme destacado no trabalho de Schuster et al. (2022), os resultados dos estudos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas demonstram um aumento das temperaturas no Brasil nos últimos 60 anos e projetam que as mesmas seguirão tal tendência no futuro. Esse cenário de acréscimo em temperaturas, bem como eventos extremos mais frequentes, como as ondas de calor, afeta significativamente o desempenho do ciclo de vida e os custos dos pavimentos asfálticos (Gudipudi, Underwood e Zalghout, 2017; Matini et al., 2022; Yao et al., 2024), demandando a necessidade de estudo, modelagem e análise do impacto do aumento da temperatura, a fim de que as decisões de projetos de engenharia sejam mais adequadas a essa nova realidade.

Portanto, é necessário caracterizar adequadamente as distribuições de temperatura em estruturas de pavimentos flexíveis para análise e projetos de pavimentos, processo importante para a evolução da engenharia de pavimentação. Os dados de temperatura são necessários em projetos mecanístico-empíricos como o CAP-3D e o FlexPave™, em futuras atualizações do MeDiNa, na seleção de ligantes asfálticos considerando a especificação Superpave e no estudo de ilhas de calor.

Os modelos de cálculo da temperatura do pavimento podem ser classificados em empíricos, analíticos e numéricos (Chen, Wang e Xie, 2019; Saliko, Ahmed e Erlingsson, 2023). Os modelos empíricos de previsão de temperatura do pavimento consistem em equações lineares ou não lineares, normalmente desenvolvidas por meio de análises estatísticas de conjuntos de dados existentes, para prever a temperatura mínima e máxima do pavimento asfáltico. A principal desvantagem é que eles não consideram os processos físicos diretamente, e conforme Alavi, Pouranian e Hajj (2014), a precisão destes modelos é estabelecida apenas no âmbito dos dados originais utilizados no desenvolvimento dos modelos de regressão. No Brasil, há alguns modelos estatísticos desenvolvidos localmente, correlacionando a temperatura do ar com a do revestimento, resumidos nos trabalhos de Chaves (2021) e Lopes (2019). Esse tipo de modelo demanda medições de temperatura em campo e exige o investimento de recursos em termos de tempo, finanças e mão de obra. Não há um modelo desenvolvido no Brasil com dados abrangendo todas as regiões, assim como realizado nos EUA, por exemplo (Terrel et al., 1994).

De acordo com Saliko, Ahmed e Erlingsson (2023), os métodos analíticos visam abordar as deficiências dos métodos empíricos, oferecendo uma solução analítica derivada de forma fechada para a equação diferencial parcial de transferência de calor. Conforme os autores, os métodos analíticos são capazes de prever com precisão as mudanças de temperatura nos pavimentos; no entanto, torna-se difícil implementá-los no projeto de pavimentos mecanístico-empíricos devido à complexidade das condições de contorno. Um exemplo de método analítico pode ser visualizado em Chong, Tramontini e Specht (2009).

Por fim, os modelos numéricos para a previsão da temperatura dos pavimentos abordam as deficiências dos métodos empíricos e analíticos, oferecendo precisão razoável, possibilidade de considerar condições de contorno complexas e flexibilidade em caso de alterações (Saliko, Ahmed e Erlingsson, 2023). Conforme Rajapaksha et al. (2023), os modelos numéricos usam métodos de diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos para prever as temperaturas do pavimento, por meio da resolução da equação diferencial parcial de transferência de calor, dentro de um domínio discretizado de computação. De acordo com Ntramah et al. (2023), tais modelos são desenvolvidos usando dados climáticos (por exemplo, temperatura do ar e radiação solar) e propriedades do pavimento (por exemplo, albedo, emissividade, capacidade térmica superficial e condutividade térmica). A mudança na temperatura do pavimento apresenta-se essencialmente como um processo físico governado pela teoria da transferência de calor (Chen, Wang e Xie, 2019), podendo assim serem utilizados em qualquer local. Tais modelos possibilitam a análise do impacto das propriedades térmicas efetivas dos materiais utilizados em campo.

Os métodos de diferenças finitas são comumente usados para a resolução da transferência de calor e previsão das temperaturas de pavimentos, como no *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) (Alavi, Pouranian e Hajj, 2014). O EICM é um programa unidimensional de fluxo de calor e umidade acoplado que simula mudanças no comportamento e características do pavimento e do subleito, considerado o estado da prática para calcular perfis de temperatura em pavimentos (Bryce et al., 2021). Ele pode ser utilizado em projetos mecanístico-empíricos de pavimentos ou para o cálculo das temperaturas máximas e mínimas na determinação do PG, conforme demonstrado no estudo de Swarna e Hossain (2022). Todavia, de acordo com Durham et al. (2021), os atuais modelos de radiação incorporados no EICM podem ser inconsistentes com a física atmosférica fundamental, podendo resultar em erros consideráveis na previsão do perfil e histórico de temperatura dos pavimentos. Além disso, Bryce e Ihnat (2022) relatam erros no coeficiente de convecção usado no EICM, levando a subestimar significativamente o termo de convecção livre, prevendo assim altas temperaturas durante condições sem vento e durante períodos quentes. Nesse contexto, pesquisadores de outros países vêm desenvolvendo modelos para o cálculo de perfis de temperatura de pavimentos considerando a teoria de transferência de calor e melhorias em relação ao modelo utilizado no EICM (Gui et al., 2007; Han et al., 2011; Durham et al., 2021).

No Brasil, a prática de modelagem dos perfis de temperatura dos pavimentos vem sendo adotada em algumas etapas dos projetos. Estudos relacionados à seleção de ligantes utilizaram fórmulas empíricas desenvolvidas nos EUA (Leite e Tonial, 1994; Cunha, Escalante Zegarra e Fernandes, 2007; Faccin et al., 2021b), todavia sem avaliação da adequabilidade delas para o Brasil. Já estudos relacionados à etapa de dimensionamento vêm utilizando fórmulas empíricas, como é caso do CAP-3D (Santos et al., 2020), ou modelagem por meio do EICM (Nascimento, 2015; Schuster, 2018; Barros et al., 2022). Diante disso, percebe-se a necessidade de uma abordagem alternativa sólida e precisa para a previsão do perfil e histórico das temperaturas dos pavimentos asfálticos no país, sendo os modelos numéricos uma alternativa viável.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura para estruturas de pavimentos flexíveis, usando uma abordagem numérica baseada nas condições climáticas locais e nas propriedades dos materiais. Com isso, busca-se colaborar com o avanço da área de pavimentação brasileira na consideração das condições climáticas nos projetos de pavimentação, seleção de materiais e estudos de ilhas de calor.

2. MODELO NUMÉRICO PROPOSTO

2.1. Modelo unidimensional de fluxo de calor

Um modelo unidimensional, semelhante ao apresentado nos trabalhos de Gui et al. (2007) e Anand e Sailor (2022) foi desenvolvido, com base nos fundamentos do balanço de energia entre o pavimento e seu entorno, representado na Figura 1. Conforme demonstrado na Figura 1, o modelo contempla a análise de pavimentos com até 4 camadas.

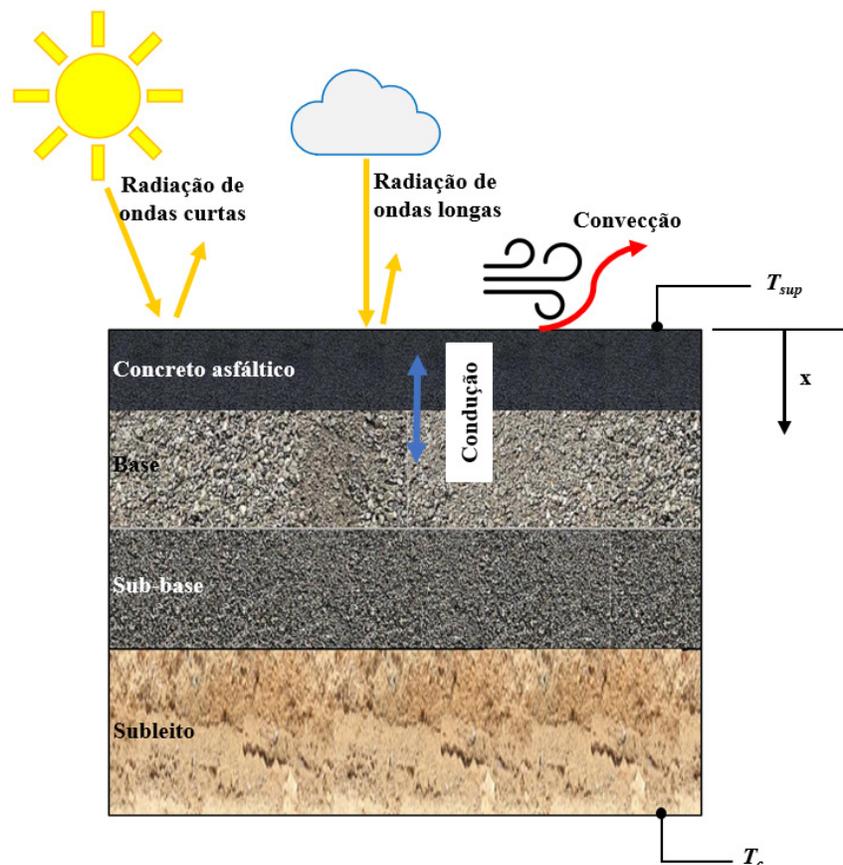


Figura 1. Ilustração da transferência de calor no sistema pavimento-ambiente.

Conforme Wood (1998), devido às grandes extensões da maioria dos pavimentos, a análise da transferência de calor nessas estruturas geralmente pode ser simplificada para um problema unidimensional, com o fluxo de calor ocorrendo em uma direção vertical normal à superfície do pavimento. Na superfície do pavimento, assume-se que a troca de calor surge da radiação de ondas curtas, da radiação de ondas longas e da convecção. Adotando a suposição unidimensional, o balanço de energia na superfície pode ser descrito pela Equação 1:

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

Onde κ é a condutividade térmica, T_{sup} é a temperatura na superfície; x é a profundidade no pavimento; α é o albedo; 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.

Quando a radiação solar atinge a superfície do pavimento, uma parte é refletida e o restante é absorvida pelo pavimento. A porção refletida é igual ao albedo (α) da superfície do pavimento, que é considerado igual para radiação de ondas curtas difusa e direta (Hermansson, 2004). A radiação solar líquida absorvida pela superfície do pavimento é calculada usando a Equação 2:

$$q_{sol} = (1 - \alpha) Q_{sol} \quad (2)$$

onde α é o albedo, que representa a porcentagem de energia solar radiação refletida de volta para o céu; e Q_{sol} é a intensidade da radiação solar na superfície do pavimento.

Conforme Chen, Wang e Xie (2019), em alguns modelos, utilizam-se os valores medidos de radiação solar (Q_{sol}); enquanto em outros a radiação solar é estimada através de equações empíricas, como realizado no EICM, por exemplo. Este trabalho seguiu as recomendações de Durham et al. (2021), para que se dê preferência ao uso de valores medidos de radiação, e não equações empíricas.

O comprimento de onda da radiação térmica emitida pelo pavimento e pelo meio circundante (céu) apresenta-se significativamente maior que o da radiação solar. Assim, esta parte da radiação térmica denomina-se radiação de ondas longas (Chen, Wang e Xie, 2019). De acordo com Zheng, Tian e He (2019), o pavimento asfáltico pode absorver até 95% da radiação solar devido a menor refletividade, resultando em sua temperatura muito superior à temperatura ambiente. Diante disso, já que as temperaturas do céu são geralmente mais baixas do que as estruturas urbanas circundantes, o céu serve como um dissipador de calor e, portanto, resulta na saída de radiação infravermelha do pavimento para o céu (Gui et al., 2007). Assim, o fluxo radiativo líquido de ondas longas na superfície pode ser obtido pela Equação 3 (Gui et al., 2007; Mammeri et al., 2015; Zheng et al., 2019; Anand e Sailor, 2022).

$$Q_{LW} = \epsilon \sigma (T_{sup}^4 - T_{sky}^4) \quad (3)$$

onde σ é a Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$); ϵ é a emissividade da superfície do pavimento; T_{sup} é a temperatura do pavimento na superfície; e T_{sky} é a temperatura do céu, calculada pela Equação 4:

$$T_{sky} = T_{air} \times (0,004 T_{dew} + 0,8)^{1/4} \quad (4)$$

onde T_{air} é a temperatura do ar; e T_{dew} é a temperatura do ponto de orvalho.

A convecção consiste na transferência de calor entre o ar e a superfície do pavimento, causada pelo fluxo de ar (Chen, Wang e Xie, 2019). Em função das incoerências relatadas para os coeficientes de convecção usados no EICM (Bryce e Ilnat, 2022), adotou-se o fluxo de calor induzido por convecção calculado usando a Equação 5 e a Equação 6:

$$Q_{sens} = h \times (T_{sup} - T_{air}) \quad (5)$$

onde T_{sup} e T_{air} são a temperatura na superfície e do ar, respectivamente; e h é o coeficiente de transferência de calor convectivo, que pode ser calculado conforme a Equação 6 (Zhao, Shen e Ma, 2018; Kang et al., 2022; Yang et al., 2023):

$$h = \begin{cases} 5,6 + 4,0U & \text{para } U \leq 5 \text{ m/s} \\ 7,2U^{0,78} & \text{para } U > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (6)$$

onde U é a velocidade do vento (m/s).

As equações anteriores fornecem a energia absorvida e emitida pela superfície do pavimento. O calor também é trocado dentro do pavimento, através da condução. Uma aproximação por diferenças finitas da equação para condução de calor pode ser utilizada. A transferência de calor no pavimento é governada pela equação clássica de difusão térmica – Equação 7:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

onde ρ é a massa específica; k é a condutividade térmica; 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).

Comumente, uma condição de contorno de temperatura constante é adotada, a alguma distância abaixo da superfície (Saliko, Ahmed e Erlingsson, 2023). Com base em um estudo experimental conduzido em Phoenix, AZ (Gui et al., 2007), definiu-se que a condição de limite inferior do modelo é definida para uma temperatura fixa $T_c = 38,5$ °C, a uma profundidade de 1 m. A condição inicial de temperatura dos nós deve ser informada, podendo-se considerar a temperatura do ar, critério adotado em Alavi, Pouranian e Hajj (2014) e Saliko, Ahmed e Erlingsson (2023).

O passo de tempo da simulação pode ser ajustado, sendo adotado nas análises deste trabalho o valor de 1 segundo. Então, a Equação 7 é resolvida numericamente usando um esquema implícito de diferenças finitas, por meio do *software* MATLAB. Empregou-se uma grade uniforme, com pontos de grade a cada 1 cm, podendo ser ajustada conforme a necessidade das análises. A resistência de contato entre camadas é negligenciada, pois não se espera que seu papel no impacto da temperatura da superfície seja significativo, de acordo com estudos anteriores (Gui et al., 2007; Hall et al., 2011; Anand e Sailor, 2022). A continuidade do fluxo de calor é mantida nas interseções entre as camadas, conforme a Equação 8. O modelo permite o cálculo da temperatura (T) a qualquer profundidade (x) e tempo (t), com a saída dos dados em formato de planilha eletrônica.

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{camadai} = \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{camadai+1} \quad (8)$$

2.2. Parâmetros climáticos

Para o cálculo do perfil de temperatura, conforme já demonstrado na seção 2.1, são necessários dados climáticos horários, apresentados na Tabela 1. Esses dados podem ser obtidos de diferentes fontes, como os dados medidos em estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil - INMET (2024), por exemplo, disponíveis no portal do Instituto; e de reanálises atmosféricas como o MERRA-2 (Gelaro et al., 2017), elaborado pelo *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) da NASA, e disponível em Faccin et al. (2023).

Tabela 1: Variáveis climáticas de entrada no modelo.

Variável climática	Unidade
Radiação solar	W/m ²
Temperatura do ar a 2 metros de altura	°C
Temperatura do ponto de orvalho a 2 metros de altura	°C
Velocidade do vento a 2 metros de altura	m/s

2.3. Propriedades dos materiais

Além dos dados horários climáticos, o modelo requer vários outros parâmetros de entrada, como as propriedades dos materiais do pavimento. O campo de temperatura do pavimento é afetado por fatores internos, como os parâmetros termofísicos. Esses parâmetros incluem o albedo (α) e a emissividade da camada superficial do pavimento; e a condutividade térmica, capacidade térmica e massa específica. As propriedades térmicas dos materiais do pavimento podem ser obtidas a partir de experimentos ou simulações e uma ampla gama de valores está relatada na literatura existente. Chen, Wang e Xie (2019) destacam que uma estimativa inadequada destes valores pode levar a erros inesperados nos resultados de previsão das temperaturas do pavimento.

A troca de fluxo de calor na superfície do pavimento não é afetada apenas por fatores climáticos, mas também influenciada pelo albedo e emissividade da superfície do pavimento. O albedo da superfície do pavimento é definido como a razão entre a radiação refletida e a radiação recebida por uma superfície. Por outro lado, a emissividade da superfície, outro parâmetro físico, representa a razão entre a radiação emitida pela superfície a uma determinada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura (Chen, Wang e Xie, 2019).

O valor da emissividade e do albedo da superfície do pavimento variam com os diferentes materiais do revestimento. A estimativa precisa desses parâmetros torna-se relevante para a confiabilidade dos modelos de previsão de temperatura. Chen, Wang e Xie (2019) realizaram uma extensa revisão bibliográfica, apresentando valores típicos de emissividade e albedo de concretos asfálticos, com base na literatura existente (Tabela 2).

Além do albedo superficial e da emissividade, a temperatura da superfície do pavimento depende da condutividade térmica e da capacidade térmica específica. A condutividade térmica define a capacidade do material de conduzir calor. Com a maior condutividade térmica, o fluxo de calor é transferido para a subcamada de forma mais eficiente. Conforme Aletba et. al. (2021), a condutividade térmica de uma mistura asfáltica pode ser determinada utilizando um método padrão da ASTM C177-04, existindo instrumentos que podem ser usados para medir diretamente a propriedade.

A capacidade térmica específica é definida como a energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa da substância em um grau. Isto significa que a menor capacidade de calor específico pode aumentar a temperatura do pavimento com a mesma quantidade de entrada de calor. A propriedade para os materiais de pavimentação pode ser medida de acordo com norma ASTM C351-92b (Aletba et. al., 2021).

Na literatura, encontram-se valores das propriedades térmicas para alguns materiais típicos de pavimentação, mostrados na Tabela 2. Cabe destacar que, nas últimas décadas, diversas tecnologias vêm sendo estudadas a fim de reduzir a temperatura superficial dos pavimentos asfálticos, incluindo revestimentos reflexivos solares, materiais de mudança de fase, pavimentos permeáveis ou vegetação urbana (Wang et al., 2022).

Tabela 2: Valores típicos de propriedades termofísicas de materiais de pavimentação.

Propriedades	Concreto asfáltico	Base granular	Subleito
Albedo	Novo	-	-
	0,04-0,15 (Chen, Wang e Xie, 2019)		
Emissividade	Envelhecido		
	0,09-0,18 (Chen, Wang e Xie, 2019)		
Capacidade Térmica (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	0,8-0,90 (Wood, 1998)	-	-
	0,81-0,97 (Chen, Wang e Xie, 2019)		
	837-1047 (Dempsey, 1969)	750-1200 (Wood, 1998)	900-1600 (Wood, 1998)
	700-1000 (Wood, 1998)	1900 (Gui et al., 2007)	1900 (Gui et al., 2007)
Conductividade Térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	902,27-1162,08 (Specht, Borges e Hellmann, 2008)		800-1100 (Hall et al., 2011)
	900-2100 (Hall et al., 2011)		
	0,94-1,48 (Dempsey, 1969)	1,80-2,0 (Wood, 1998)	1,30-2,50 (Wood, 1998)
	1,20-2,90 (Wood, 1998)		1,00 (Gui et al., 2007)
Conductividade Térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	1,14-1,34 (Specht, Borges e Hellmann, 2008)		0,30-2,0 (Hall et al., 2011)
	0,50-2,50 (Hall et al., 2011)		

3. VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PROPOSTO

Assim como realizado no trabalho de Bryce et al. (2021), para verificar a solução numérica obtida a partir do modelo desenvolvido, uma solução exata para o caso linear (condutividade térmica constante) da Equação 7 foi utilizada, com as condições de contorno das Equações 9-11 e um pavimento com $L = 1$ m. Para simplificar a solução, a condição de contorno do fluxo é assumida como constante, representando uma radiação solar constante (q_{sol}). Assim, a solução analítica é obtida pelo método de separação de variáveis, mesmo critério adotado em Bryce et al. (2021), utilizando o *software* MATLAB.

$$T(x, 0) = T_i \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{sol} \quad (10)$$

$$T(L, t) = T_c \quad (11)$$

onde T_i é a temperatura inicial do pavimento; T_c é a temperatura constante na profundidade de 1m; k é a condutividade térmica; e q_{sol} é o fluxo da radiação solar absorvida pelo pavimento.

Para verificar o modelo proposto, as soluções analítica e numérica foram comparadas em diferentes tempos de simulação, usando os seguintes critérios: temperatura constante (T_c) e inicial (T_i) de 33,5 °C; fluxo radiativo constante (q_{sol}) de 536 W/m²; uma constante k de 1,21 Wm⁻¹K⁻¹; capacidade térmica (c) de 921 Jkg⁻¹K⁻¹; e massa específica (ρ) de 2238 kg/m³. Conforme também adotado por Bryce et al. (2021), a transferência de calor convectiva da superfície do pavimento para o ar ambiente (Q_{sens}) e o fluxo radiativo líquido de ondas longas que sai da superfície (Q_{LW}) foram assumidos como zero.

A Figura 2 mostra a comparação das soluções analítica e numérica. Pode-se observar que os resultados do modelo numérico estão muito próximos aos da solução analítica, mostrando que o modelo proposto é considerado válido. Após a verificação mostrada, o modelo numérico foi utilizado para simular temperaturas de pavimentos e comparar com dados medidos e dados calculados por meio do EICM.

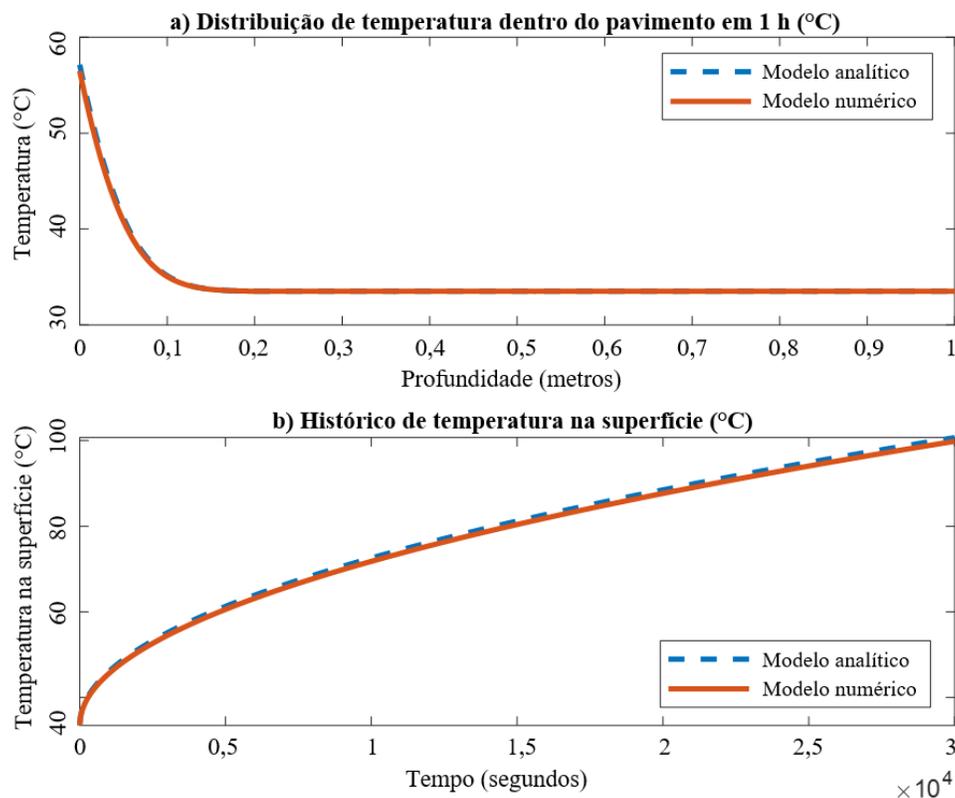


Figura 2. Comparação das soluções numérica e analítica para a condução de calor no pavimento: (a) dentro; e (b) na superfície.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PROPOSTO

4.1. Comparação com dados medidos em Gui et al. (2007) e disponíveis em Anand e Sailor (2022)

O modelo numérico foi validado usando resultados experimentais de um estudo realizado em junho de 2004 no Laboratório de Testes de Pavimentos Externos do Departamento de Transportes

do Arizona, em Phoenix, AZ (33.44, - 112.07), disponíveis em Anand e Sailor, (2022), onde foram medidas temperaturas do pavimento a 12,7 mm de profundidade, durante 3 dias. Conforme Anand e Sailor (2022), o pavimento está localizado em uma região extremamente quente e árida (Classificação Climática Köppen – Bwh (Köppen, Volken e Brönnimann, 2011)).

As propriedades térmicas dos materiais e seus valores de condutividade térmica, capacidade térmica específica e massa específica foram os mesmos adotados no estudo anterior conduzido por Anand e Sailor (2022) (Tabela 3), assim como o albedo (0,10) e a emissividade (0,90) do concreto asfáltico. Os valores foram definidos por Anand e Sailor (2022) com base em referências bibliográficas, representando valores típicos para pavimentos asfálticos. A temperatura inicial dos nós foi a mesma adotada pelos autores citados: 40°C.

As espessuras e as propriedades térmicas selecionadas para cada camada são fornecidas na Tabela 3, considerando as camadas do estudo conduzido por Gui et al. (2007) e avaliado posteriormente em Anand e Sailor (2022).

Tabela 3: Propriedades dos materiais consideradas na análise.

Camada do pavimento	Massa específica (kg/m ³)	Capacidade térmica (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Espessura (cm)
Concreto asfáltico	2238	921	1,21	10
Base asfáltica	2238	921	1,21	15
Subleito	1500	1900	1,00	75

Os dados climáticos horários utilizados para o cálculo das temperaturas foram coletados da estação meteorológica “Phoenix Encanto”, da Rede Meteorológica do Arizona (AZMET: The Arizona Meteorological Network, 2023), utilizando-se os valores de radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, conforme Anand e Sailor (2022). Na Figura 3 são apresentados os dados climáticos considerados.

A Figura 4 mostra a comparação entre os dados de temperatura medidos em campo e as temperaturas simuladas com o modelo proposto, durante um período de dois dias. Pode-se observar, de maneira geral, uma boa previsão, com ligeiro desfasamento de tempo entre o modelo e os dados reais durante o ciclo de resfriamento do pavimento. Conforme Anand e Sailor (2022), isto possivelmente se deve ao resfriamento adicional por evapotranspiração, que não é contabilizado nessa modelagem.

Cabe destacar que os parâmetros termofísicos considerados no modelo são baseados na literatura, assim como adotado em um dos estudos que embasaram este trabalho (Anand e Sailor, 2022). Os valores adotados podem não estar retratando adequadamente os materiais utilizados em campo. Todavia, o modelo demonstra ser capaz de prever as variações horárias de temperatura do pavimento em qualquer profundidade e com boa precisão.

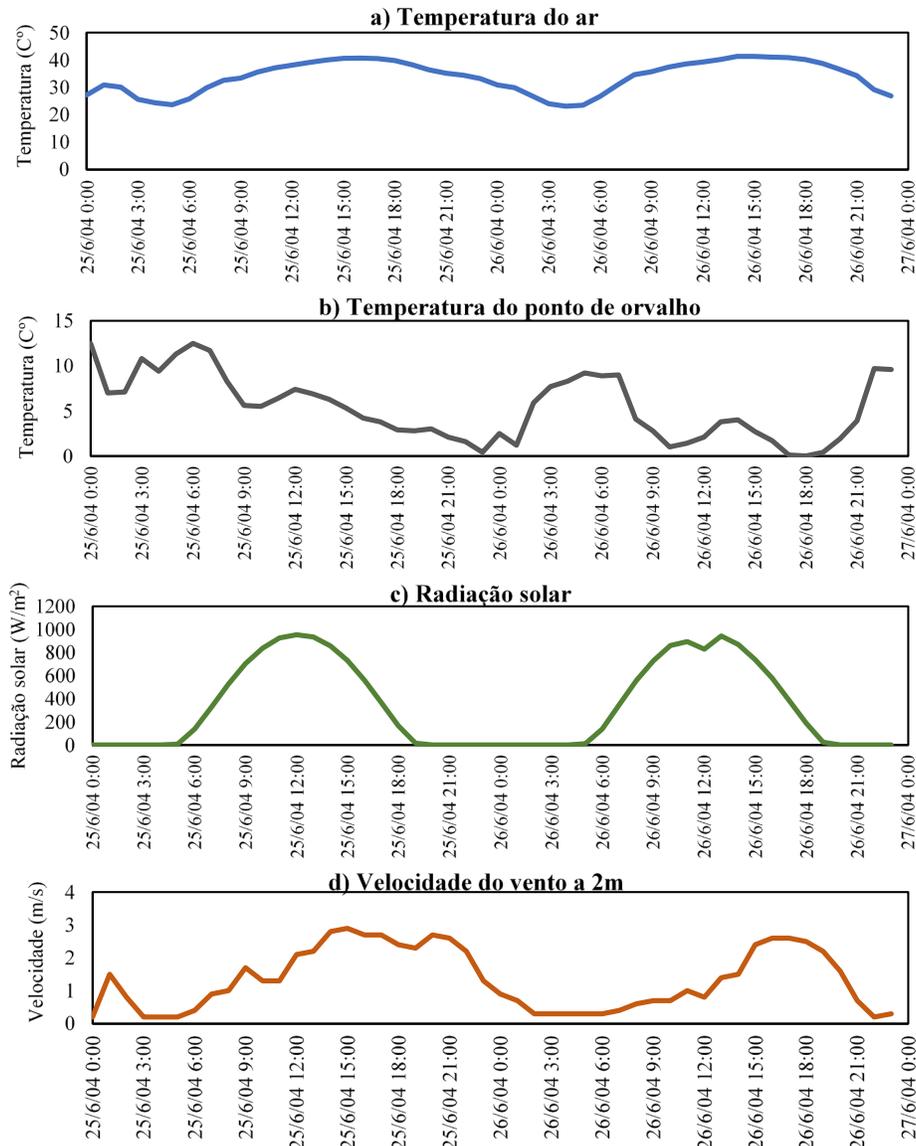


Figura 3. Dados climáticos do local do teste: (a) temperatura do ar; (b) temperatura do ponto de orvalho; (c) radiação solar; e (d) velocidade do vento a 2m.

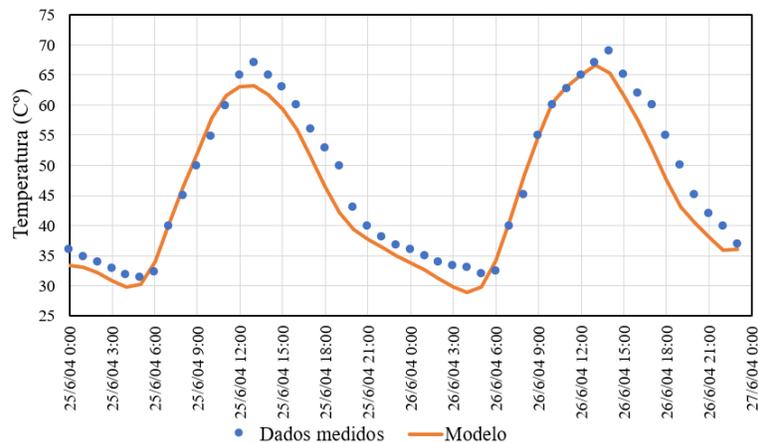


Figura 4. Validação do modelo usando observações de Phoenix AZ em 25 e 26 de junho de 2004, disponíveis em Gui et al. (2007) e Anand e Sailor (2022).

4.2. Comparação com o modelo EICM

De acordo com Hall et al. (2011), outra forma de validar modelos de cálculo de temperatura de pavimentos é compará-los com outras ferramentas bem estabelecidas e já disponíveis para a indústria e a comunidade científica, como é o caso do EICM. Apesar dos problemas relatados para o EICM na literatura, destacados na seção 1 deste documento, ele é considerado o estado da prática para calcular os perfis de temperatura em pavimentos (Bryce et al., 2021).

Diante disso, realizou-se a comparação dos dados de temperatura do pavimento para 2cm de profundidade, calculados no EICM, versão 3.2, e no modelo numérico proposto no presente trabalho. Avaliou-se o período de 2002-2021, totalizando 175320 horas, para a cidade de Santa Maria-RS. Considerou-se uma estrutura com 10 cm de revestimento asfáltico, 15 de base e 20 de sub-base em material granular. Para as propriedades termofísicas do revestimento asfáltico, foram considerados os valores padrões do software EICM: capacidade térmica=921 Jkg⁻¹K⁻¹; condutividade térmica=1,16 Wm⁻¹K⁻¹; e massa específica de 2371 kg/m³. Conforme outras pesquisas, tratam-se de valores coerentes para materiais de pavimentação (Dempsey, 1969; Specht, Borges e Hellmann, 2008; Hall et al., 2011). Utilizou-se para a camada de revestimento asfáltico um albedo de 0,05, recomendado para concretos asfálticos novos (Rose e Levinson, 2013) e uma emissividade de 0,9, valor representativo de misturas asfálticas (Chen, Wang e Xie, 2019).

Foram considerados os dados climáticos da estação A803 do INMET (2024), e de maneira complementar os dados da reanálise MERRA-2 da NASA (Gelaro et al., 2017) para substituir os dados climáticos faltantes nas estações do INMET. Os dados de velocidade do vento medidos a 10 metros de altura nas estações do INMET foram convertidos para 2 metros, utilizando a equação proposta em Allen et al. (2006) e adotada no trabalho de Siefert et al. (2021) – Equação 12. A percentagem de luz solar horária foi obtida por meio da plataforma disponibilizada no trabalho de Faccin et al. (2023), no qual os autores utilizam dados de radiação da reanálise MERRA-2 e a metodologia proposta em Gopiseti et al. (2019). O local de estudo é caracterizado por um clima subtropical com verão quente (classificação Cfa de Köppen (Alvares et al., 2013).

$$u_2 = u_{10} \frac{4,87}{\ln(67.8 \times 10) - 5,42} \quad (12)$$

Onde u_2 é a velocidade do vento na altura de 2 metros; e u_{10} é a velocidade do vento na altura de 10 metros.

A Figura 5 mostra a comparação entre a estimativa da temperatura horária para a profundidade de 2 cm realizada utilizando o EICM e o modelo proposto neste trabalho, para o período de 2002-2021.

Conforme pode-se observar na Figura 5, o coeficiente de determinação para as temperaturas do EICM e o modelo proposto é 0,8645, indicando que as previsões de temperatura destes dois modelos são semelhantes. Ongel e Harvey (2004), ao comparar valores de temperatura do pavimento obtidas no EICM com o modelo BELLS2 (Lukanen, Stubstad e Briggs, 2000), obtiveram valores variando de 0,7526 a 0,9027.

A Figura 6 apresenta os valores para os dois modelos, a uma profundidade de 2cm, para dois diferentes meses: um no verão (a) e outro no inverno (b) de 2002. Os resultados também demonstram similaridade dos dois modelos, com maiores diferenças ocorrendo no mês mais frio. Pode-se observar que o modelo proposto apresenta, de maneira geral, maiores valores de temperatura máxima e menores valores para as temperaturas mínimas. Essas diferenças entre os modelos podem ser explicadas especialmente em função das formas de consideração da convecção e radiação solar.

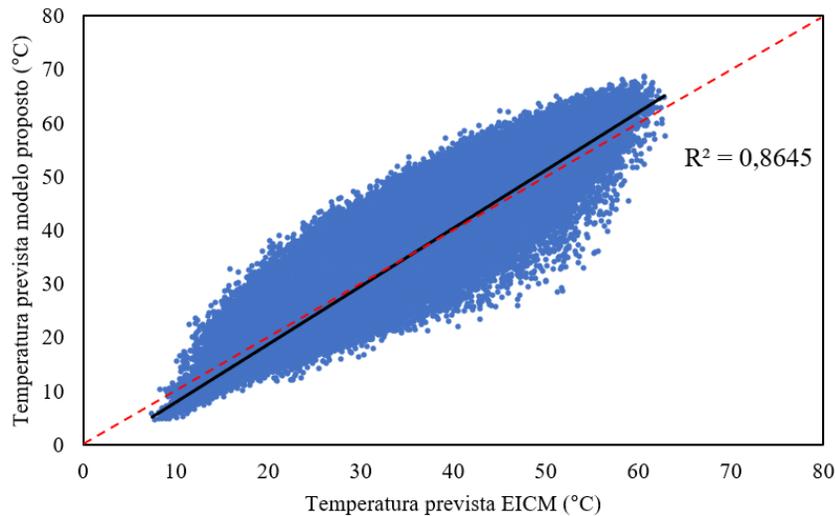


Figura 5. Comparação das temperaturas horárias do pavimento (2 cm) no período de 2002-2021 considerando o EICM e o modelo proposto.

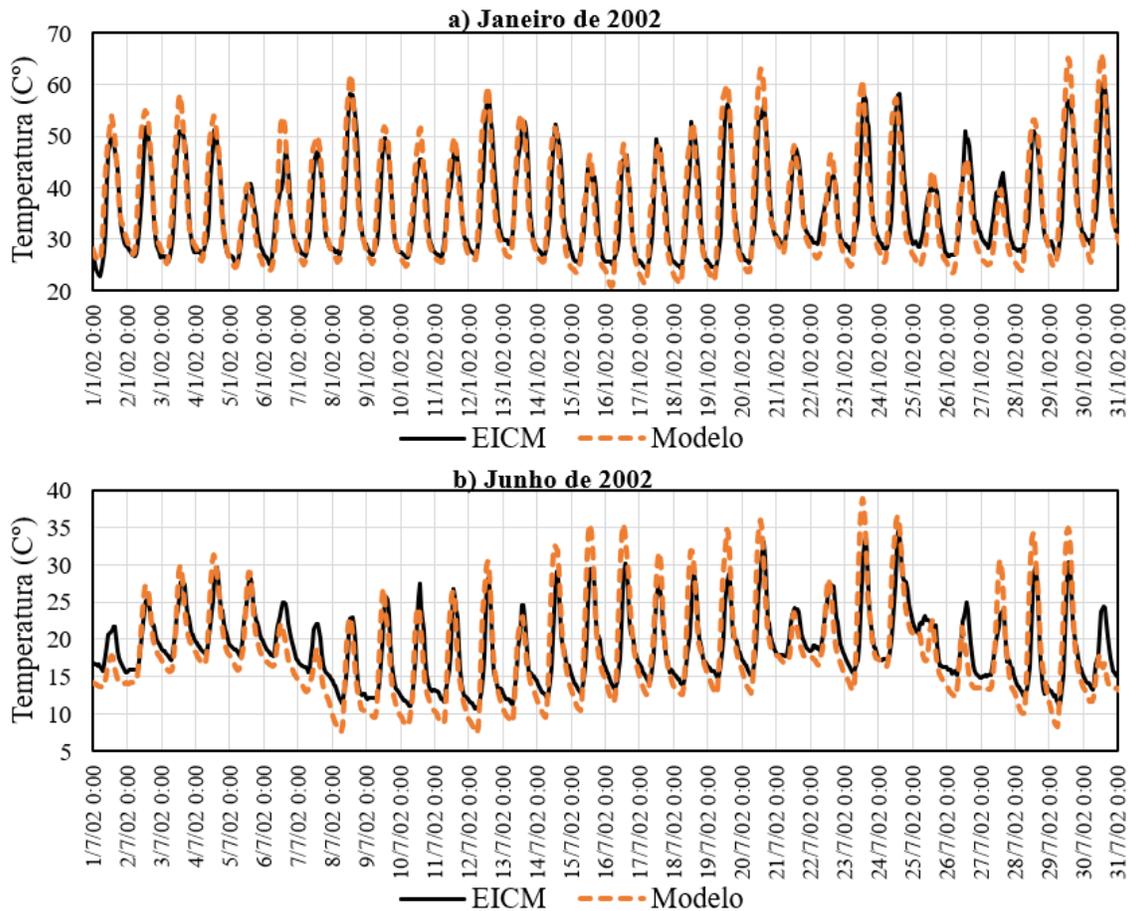


Figura 6. Comparação das temperaturas horárias do pavimento (2cm) para os meses de janeiro (a) e junho (b) de 2002.

5. EFEITOS DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS NAS TEMPERATURAS DOS PAVIMENTOS

Em virtude das temperaturas do pavimento dependerem das propriedades termofísicas dos materiais, avaliaram-se os efeitos do albedo, da emissividade, da condutividade térmica e da

capacidade térmica da camada de revestimento asfáltico (Figura 7), considerando as mesmas condições de análise da seção 4.1. A Tabela 4 apresenta valores típicos das propriedades avaliadas para os concretos asfálticos e os valores considerados nas análises.

Tabela 4: Valores avaliados das propriedades térmicas do revestimento asfáltico.

Propriedades térmicas	Intervalo de valores (bibliografia)	Valor base	Demais valores avaliados
Albedo	0,04-0,18	0,10	0,04; 0,18
Emissividade	0,80-0,97	0,90	0,80; 0,97
Capacidade Térmica ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	837-2100	921	837; 2100
Condutividade térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0,50-2,50	1,21	0,50; 2,50

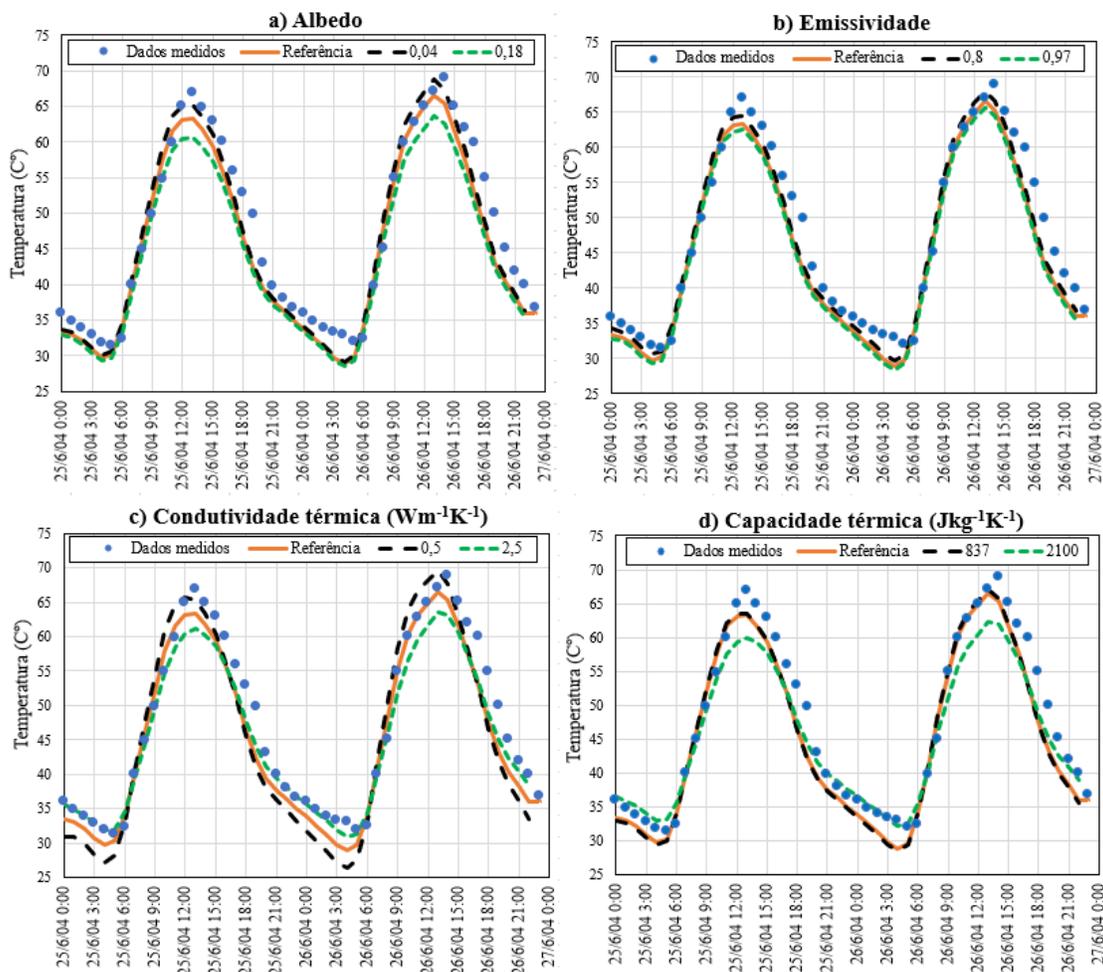


Figura 7. Efeito das propriedades térmicas nas temperaturas horárias do pavimento comparando com observações de Phoenix AZ em 25 e 26 de junho de 2004, disponíveis em Gui et al. (2007) e Anand e Sailor (2022) para: (a) albedo; (b) emissividade; (c) condutividade térmica; e (d) capacidade térmica.

Conforme a Figura 7a, pode-se observar que o albedo (α) do revestimento asfáltico tem influência importante nas temperaturas do pavimento, sendo que o valor de 0,04 apresentou elevada concordância com os dados medidos em campo para as temperaturas máximas. Conforme Gui et al. (2007), quanto maior o albedo, maior a energia refletida de volta ao seu entorno, o que significa

que menos energia é absorvida pelo pavimento, ocasionando uma redução das temperaturas da camada. Também pode-se visualizar que as temperaturas máximas são mais afetadas que as mínimas, em virtude do fator albedo, que depende unicamente da presença do sol, afetar as temperaturas máximas, que ocorrem durante o dia.

A Figura 7b mostra que o aumento da emissividade (ϵ) ocasiona a diminuição das temperaturas máximas e mínimas do pavimento, assim como também relatado em Gui et al. (2007). De acordo com Aletba et al. (2021), a propriedade é considerada um dos fatores importantes que contribuem para o albedo, que tem impacto direto nos pavimentos. A Figura 7 demonstra que a variação da emissividade, mantendo os demais parâmetros constantes, ocasiona pequenas diferenças ao avaliar valores típicos relatados na bibliografia.

De acordo com a Figura 7c, observa-se que as temperaturas máximas, que ocorrem durante o dia, diminuem com o aumento da condutividade térmica (k). Conforme Gui et al. (2007), isto pode ser explicado pelo fato de que a alta condutividade permite que o ganho de calor da radiação solar na superfície seja transferido rapidamente e conseqüentemente absorvido pelo solo, que atua como dissipador de calor. Por outro lado, as temperaturas mínimas, que ocorrem durante a noite, aumentam com a condutividade pela mesma razão.

Para a variação da capacidade térmica (c), mantendo os demais parâmetros constantes, verifica-se na Figura 7d que as temperaturas máximas diminuem enquanto as temperaturas mínimas aumentam com o aumento de c . Semelhante ao efeito da condutividade térmica, o aumento do armazenamento de energia causado pelos maiores valores de c aumenta a massa térmica, o que retarda a taxa de elevação da temperatura durante o dia, levando à diminuição das temperaturas máximas. Mas, ao mesmo tempo, a maior massa térmica provoca temperaturas noturnas (mínimas) mais elevadas, devido a maior dificuldade em perder esse calor durante a noite.

Os resultados apresentados confirmam a importância das propriedades termofísicas na modelagem numérica da temperatura dos pavimentos flexíveis.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, um modelo unidimensional de fluxo de calor capaz de prever as mudanças de temperatura dentro das estruturas do pavimento foi desenvolvido. O modelo utiliza dados meteorológicos históricos disponíveis (temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento) para prever a variação da temperatura do pavimento de hora em hora. Um esquema implícito de integração de tempo foi usado para fornecer uma solução estável, independentemente do intervalo de tempo selecionado. Outras informações necessárias são as propriedades relacionadas à superfície, como a emissividade e o albedo. Finalmente, as espessuras das camadas e as propriedades termofísicas (condutividade térmica, capacidade térmica específica e massa específica) de cada camada do pavimento são parâmetros de entrada necessários.

O modelo numérico proposto foi verificado por meio da comparação com uma solução analítica da equação de calor, em diferentes tempos de simulação e espessura total de 1 metro. Pode-se observar que os resultados do modelo proposto estão muito próximos aos da solução analítica, mostrando que a metodologia adotada neste trabalho foi implementada corretamente e pode ser considerada válida.

O modelo foi validado considerando dados de temperatura medidos no estudo de Gui et al. (2007), e utilizados também por Anand e Sailor (2022). Observou-se uma boa correspondência com os dados medidos, indicando que o modelo é capaz de prever as variações de temperatura de seções transversais de pavimentos localizados em diferentes áreas climáticas, com boa precisão.

A fim de complementar a validação, realizou-se a comparação dos dados de temperatura do pavimento calculados pelo modelo proposto com os dados estimados no EICM, versão 3.2, no período de 2002-2021, para a cidade de Santa Maria-RS, obtendo-se valores semelhantes entre os dois modelos.

As simulações demonstraram os impactos das diversas propriedades térmicas do pavimento nas temperaturas calculadas. O aumento do albedo ocasiona acréscimo das temperaturas, com maior efeito nas máximas (diurnas). A emissividade produz o mesmo efeito, mas com menor intensidade. Também foi possível observar que a temperatura máxima do pavimento diminui enquanto a temperatura mínima aumenta com o aumento das propriedades de condutividade e capacidade térmica.

Por fim, pode-se concluir que o modelo proposto se mostrou adequado para incorporação como parte de uma ferramenta de cálculo de temperatura de métodos mecanístico-empíricos, para cálculo das temperaturas do pavimento na etapa de seleção de ligantes, estudos de ilhas de calor, aumento de temperaturas, e ocorrência de eventos extremos.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Alavi, M.Z.; M.R. Pouranian e E.Y. Hajj (2014) Prediction of asphalt pavement temperature profile with finite control volume method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2456, n. 1, p. 96-106. DOI: 10.3141/2456-10.
- Aletba, N.; R. Abdul Hassan; E. Putra Jaya et al. (2021) Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement: a state-of-the-art review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 8, n. 3, p. 356-373. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.02.001.
- Allen, R.; L.S. Pereira; D. Raes et al. (2006) *Evapotranspiración del Cultivo Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos*. Rome: FAO. Estudio FAO Riego y Drenaje, Pt A, v. 56, p. 56. Disponível em: <<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8802ddc9-86b6-4f13-96b7-4871dd3aee65/content>> (acesso em 28/05/2024).
- Alvares, C.A.; J.L. Stape; P.C. Sentelhas et al. (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift (Berlin)*, v. 22, n. 6, p. 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Anand, J. e D.J. Sailor (2022) Role of pavement radiative and thermal properties in reducing excess heat in cities. *Solar Energy*, v. 242, p. 413-423. DOI: 10.1016/j.solener.2021.10.056.
- Andrey, J.; D. Hambly; B. Mills et al. (2013) Insights into driver adaptation to inclement weather in Canada. *Journal of Transport Geography*, v. 28, p. 192-203. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2012.08.014.
- AZMET: The Arizona Meteorological Network (2023) *AZMET Weather Data*. Disponível em: <<https://cales.arizona.edu/AZMET/az-data.htm>> (acesso em 15/12/2023).
- Barros, L.M.; L.A.H. Nascimento; F.T.S. Aragão et al. (2022) Characterization of the permanent deformation of asphalt mixtures based on indexes and on pavement structural performance. *Construction & Building Materials*, v. 326, p. 126555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126555.
- Bryce, J. e Z. Ilnat (2022) Improved models of solar radiation and convective heat transfer for pavement temperature prediction. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 7, p. 2123-2134. DOI: 10.1080/10298436.2020.1843037.
- Bryce, J.; A. Chattopadhyay; M. Esmaeilpour et al. (2021) Detailing an improved heat transfer model for pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2675, n. 7, p. 153-165. DOI: 10.1177/0361198121994847.
- Chaves, B.S. (2021) *Análise da Influência da Temperatura na Previsão de Desempenho à Fadiga de Pavimentos Asfálticos a Partir da Modelagem Viscoelástica*. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22963> (acesso em 10/12/2023).
- Chen, J.; H. Wang e P. Xie (2019) Pavement temperature prediction: theoretical models and critical affecting factors. *Applied Thermal Engineering*, v. 158, p. 113755. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113755.
- Chong, W.; R. Tramontini e L.P. Specht (2009). 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, p. 1004-1018. DOI: 10.1080/10407780903014194.
- Cunha, M.B.; J.R. Escalante Zegarra e J.L. Fernandes Jr. (2007) Revisão da seleção do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos por estados do Brasil. In *Anais do 21º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Rio de Janeiro: ANPET, p. 933-943.

- Dempsey, B.J. (1969) *A Heat-transfer Model for Evaluating Frost Action and Temperature Relate defects in Multilayered Pavement Systems*. Tese (doutorado). Universidade de Illinois, Urbana, Illinois. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/979236f811380ae5082e695600ace434/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>> (acesso em 08/12/2023).
- Durham, S.A.; B. Cetin; C.W. Schwartz et al. (2021) *Improvement of Climate Data for Use in MEPDG Calibration and Other Pavement Analysis – Phase II*. Disponível em: <<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/58948>> (acesso em 08/12/2023).
- Faccin, C.; L.P. Specht; L.C. Pacheco et al. (2023) Plataforma online para aquisição dos dados climáticos da reanálise merra-2 da NASA a serem utilizados em projetos de pavimentação. In *Anais do 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR), 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)*. Curitiba: DER Paraná, p. 100-109. DOI: DOI: 10.29327/1304307.48-10.
- Faccin, C.; L.P. Specht; S.L. Schuster et al. (2021a) Flow number parameter as a performance criteria for asphalt mixtures rutting: evaluation to mixes applied in Brazil Southern region. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 23, n. 9, p. 3055-3067. DOI: 10.1080/10298436.2021.1880580.
- Faccin, C.; S.L. Schuster; P.O.B. Almeida Jr. et al. (2021b) Mapas de Grau de Desempenho (PG) de ligantes asfálticos para o Brasil. In *Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Rio de Janeiro: ANPET, p. 933-943.
- Gelaro, R.; W. McCarty; M.J. Suárez et al. (2017) The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, v. 30, n. 13, p. 5419-5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1. PMID:32020988.
- Gopiseti, L.S.P.; B. Cetin; B.A. Forman et al. (2019) Evaluation of four different climate sources on pavement mechanistic-empirical design and impact of surface shortwave radiation. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, n. 9, p. 1155-1168. DOI: 10.1080/10298436.2019.1665180.
- Gudipudi, P.P.; B.S. Underwood e A. Zalgout (2017) Impact of climate change on pavement structural performance in the United States. *Transportation Research Part D, Transport and Environment*, v. 57, p. 172-184. DOI: 10.1016/j.trd.2017.09.022.
- Gui, J.; P.E. Phelan; K.E. Kaloush et al. (2007) Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 19, n. 8, p. 683-690. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(683).
- Hall, M.R.; P.K. Dehdezi; A.R. Dawson et al. (2011) 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. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000357.
- Han, R.; X. Jin e C.J. Glover (2011) Modeling pavement temperature for use in binder oxidation models and pavement performance prediction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 23, n. 4, p. 351-359. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000169.
- Hermansson, Å. (2004) Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures. *Cold Regions Science and Technology*, v. 40, n. 1-2, p. 1-17. DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.03.001.
- INMET 2024. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br>> (acesso em 15/12/2023).
- Kang, W.; P. Li; J. Chen et al. (2022) Cooling high-speed railway slab tracks with solar reflective coatings: a feasibility study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 34, n. 5, p. 04022067. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004211.
- Köppen, W.; E. Volken e S. Brönnimann (2011) The thermal zones of the Earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world. *Meteorologische Zeitschrift (Berlin)*, v. 20, n. 3, p. 351-360. DOI: 10.1127/0941-2948/2011/105.
- Leite, L. F. e I.A. Tonial (1994) Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP. In *Anais do 12º Encontro do Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo*. Rio de Janeiro: IBP, p. 94-103. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214816>> (acesso em 10/11/2023).
- Lopes, T.A.S. (2019) *Análise do Efeito da Sazonalidade da Temperatura e do Tráfego no Desempenho de Pavimentos Flexíveis: Segmentos Monitorados de Araranguá-SC*. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214816>> (acesso em 10/11/2023).
- Lukanen, E.; R. Stubstad e R. Briggs (2000) *Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement*, FHWA-RD-98-085, McLean, VA: FHWA.
- Mammeri, A.; L. Ulmet; C. Petit et al. (2015) Temperature modelling in pavements: the effect of long- and short-wave radiation. *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 16, n. 3, p. 198-213. DOI: 10.1080/10298436.2014.937809.
- Matini, N.; S. Gulzar; S. Underwood et al. (2022) *Evaluation of structural performance of pavements under extreme events: flooding and heatwave case studies*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2676, n. 7, p. 233-248. DOI: <http://doi.org/10.1177/03611981221077984>
- Medina, J. DE e L.M.G DA Motta (2015) *Mecânica dos pavimentos* (3ª ed.). Rio de Janeiro, RJ: Interciência.
- Moreno-Navarro, F.; M.C. Rubio-Gámez; R. Miró et al. (2015) The influence of temperature on the fatigue behaviour of bituminous materials for pavement rehabilitation. *Road Materials and Pavement Design*, v. 16, n. suppl 1, p. 300-313. DOI: 10.1080/14680629.2015.1029676.
- Motta, L.M.G DA (1979) *O Estudo da Temperatura em Revestimentos Betuminosos*. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/2966>> (acesso em 02/11/2023).
- Nascimento, L.A.H. (2015) *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mix-ture and Pavement Analysis in Brazil*. Tese (doutorado). North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. Disponível em: <<https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/10651/etd.pdf?sequence=2>> (acesso em 10/11/2023).

- Ntramah, S.; K.A. Tutu; Y.A. Tuffour et al. (2023) Evaluation of selected empirical models for asphalt pavement temperature prediction in a tropical climate: the case of Ghana. *Sustainability (Basel)*, v. 15, n. 22, p. 15846. DOI: 10.3390/su152215846.
- Ongel, A. e J. Harvey (2004) *Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures Using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)*. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/252682523>> (acesso em: 2/12/2023).
- Rajapaksha, M.C.; B. Athukorallage; S. Senadheera et al. (2023) 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. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02008.
- Ramadhan, R.H. e H.I. Al-Abdul Wahhab (1997) Temperature variation of flexible and rigid pavements in Eastern Saudi Arabia. *Building and Environment*, v. 32, n. 4, p. 367-373. DOI: 10.1016/S0360-1323(96)00072-8.
- Rose, L.S. e R. Levinson (2013) Analysis of the effect of vegetation on albedo in residential areas: case studies in suburban Sacramento and Los Angeles, CA. *GIScience & Remote Sensing*, v. 50, n. 1, p. 64-77. DOI: 10.1080/15481603.2013.778557.
- Saliko, D.; A. Ahmed e S. Erlingsson (2023) Development and validation of a pavement temperature profile prediction model in a mechanistic-empirical design framework. *Transportation Geotechnics*, v. 40, p. 100976. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100976.
- Santiago, L.S.; S. Sannago; S.A.T. Silva et al. (2018) *Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas*. *Transportes*, v. 26, n. 2, p. 31-43. DOI: 10.14295/transportes.v26i2.1446.
- Santos, A.B.V.; J.B. Soares; L. Feitosa et al. (2020) Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada de pavimentos asfálticos. *Transportes*, v. 28, n. 4, p. 53-66. DOI: 10.14295/transportes.v28i4.2394.
- Schuster, S.L. (2018) *Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo*. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/16566>> (acesso em 15/11/2023).
- Schuster, S.L.; C. Faccin; P.O.B. Almeida Jr. et al. (2022) *Impacto das Mudanças Climáticas na Seleção de Ligantes Asfálticos no Brasil Considerando o Grau de Desempenho (PG)*. Rio de Janeiro: IBP. Rio Oil & Gas 2022: Sessões Técnicas Digitais e Presenciais, Technical Sessions (Video Presentations + Technical Papers in PDF). DOI: 10.48072/2525-7579.rog.2022.089.
- Shamsaei, M.; A. Carter e M. Vaillancourt (2022) A review on the heat transfer in asphalt pavements and urban heat island mitigation methods. *Construction & Building Materials*, v. 359, p. 129350. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129350.
- Siefert, C.A.C.; N. Dombrowski Netto; F.H.S. Marangon et al. (2021) Avaliação de séries de velocidade do vento de produtos de reanálises climáticas para o Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 4, p. 689-701. DOI: 10.1590/0102-7786360026.
- Sousa, J.B.; J. Craus e C.L. Monismith (1991) *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*. Disponível em: <<https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-318.pdf>> (acesso em: 2/12/2023).
- Specht, L.P.; P.A.P. Borges e L. Hellmann (2008) Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes. *Revista Tecnologia*, v. 29, n. 2, p. 198-210.
- Swarna, S.T. e K. Hossain (2022) Climate change impact and adaptation for highway asphalt pavements: a literature review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 49, n. 7, p. 1109-1120. DOI: 10.1139/cjce-2021-0209.
- Terrel, R.L.; T.V. Scholz; A. Al-Joabib et al. (1994) *Report SHRP-A-402: Water Sensitivity: Binder Validation*. Washington: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Wang, Z., Y. Xie; M. Mu et al. (2022). Materials to mitigate the urban heat island effect for cool pavement: a brief review. *Buildings*, v. 12, n. 8, p. 1221. DOI: 10.3390/buildings12081221.
- Wood, J.H. (1998) *Pavement Temperature Models: Design Requirements, Model Predictions and Analysis of Temperature Measurements*. Wellington: Transfund New Zealand.
- Yang, E.; J. Peng; L. Luo et al. (2023) Analysis on influencing factors of asphalt pavement icing and establishment of icing prediction model. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 12, p. 2959-75. DOI: 10.1080/14680629.2023.2185466.
- Yao, L.; Z. Leng; F. Ni et al. (2024) Adaptive maintenance strategies to mitigate climate change impacts on asphalt pavements. *Transportation Research Part D, Transport and Environment*, v. 126, p. 104026. DOI: 10.1016/j.trd.2023.104026.
- Zhao, X.; A. Shen e B. Ma (2018) Temperature adaptability of asphalt pavement to high temperatures and significant temperature differences. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, p. 9436321. DOI: 10.1155/2018/9436321.
- Zheng, M.; Y. Tian e L. He (2019) Analysis on environmental thermal effect of functionally graded nanocomposite heat reflective coatings for asphalt pavement. *Coatings*, v. 9, n. 3, p. 178. DOI: 10.3390/coatings9030178.