

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Igor Sieczkowski Moreira

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA VIABILIZAR A
CONSIDERAÇÃO DA TEMPERATURA EM PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Porto Alegre

Abril, 2023

IGOR SIECZKOWSKI MOREIRA

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA VIABILIZAR A
CONSIDERAÇÃO DA TEMPERATURA EM PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento
de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito

Porto Alegre
Abril, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Moreira, Igor Sieczkowski
Aplicativo Computacional Para Viabilizar a
Consideração da Temperatura em Pavimentos Flexíveis /
Igor Sieczkowski Moreira. -- 2023.
91 f.
Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Pavimentação. 2. Análise Mecanístico-Empírica.
3. Perfil de temperatura. 4. Dados climáticos da NASA.
I. Teixeira Brito, Lélío Antônio, orient. II. Título.

IGOR SIECZKOWSKI MOREIRA

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA VIABILIZAR A
CONSIDERAÇÃO DA TEMPERATURA EM PAVIMENTOS
FLEXÍVEIS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado pela banca examinadora e, em sua forma final, pelo Professor Orientador.

Porto Alegre, Abril de 2023.

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito
PhD. pela University of Nottingham
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Cecilia Fortes Merighi (USP)
MSc. Pela Universidade de São Paulo

Cléber Faccin (UFSM)
MSc. pela Universidade Federal de Santa Maria

Felipe do Canto Pivetta (UNC)
MSc. pela University of North Carolina

Dedico este trabalho àqueles que constantemente buscam pelo
progresso científico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador Lélío Brito, que me incentivou a encarar o desafio de uma proposta de pesquisa mais moderna na área de pavimentação e forneceu todo o apoio necessário para realizá-la. Além de me auxiliar a encontrar qual caminho irei tomar após a conclusão da graduação.

Gostaria de agradecer a toda equipe do LAPAV, em especial ao Henrique Falck Grimm e ao Lucas Fraporti Heller, pelo seu constante apoio, conselhos, discussões e orientações ao longo deste trabalho. Também agradeço a Gracieli Bordin Colpo pela disponibilização dos dados que foram essenciais para a validação do aplicativo.

A toda a minha família, em especial aos meus pais Valéria Sieczkowski e Romeu Moreira, por todo o suporte dado, e ao meu irmão Iuri Carvalho pela valiosa ajuda em determinadas partes do desenvolvimento do código do aplicativo.

Agradeço também à Isabella Cristina da Silva, que esteve ao meu lado desde o início da graduação, me oferecendo suporte emocional e acreditando em meu potencial.

Aos meus amigos Eduardo Grandi, Lucas Carvalho e Arthur Schöning, que proporcionaram momentos de descontração essenciais para aliviar a tensão dos estudos.

Aos meus colegas e amigos da UFRGS, Mateus Dutra, Eduardo Friedrich, Milena Merlo e Daniel Hiraiwa, que estiveram comigo em diversas disciplinas, proporcionando uma excelente troca de conhecimento e momentos de lazer.

Por fim, gostaria de agradecer a meteorologista Julia Carelli, da empresa Meteomatics, por suas orientações na fase inicial do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Quem sonha de dia tem consciência de muitas coisas que escapam a
quem sonha só de noite.
Edgar Allan Poe, em Eleonora

RESUMO

O atual método de dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil, o método do engenheiro Murillo Lopes de Souza, não leva em consideração os efeitos advindos da temperatura, a qual pode ser um dos principais fatores climáticos no desgaste do concreto asfáltico. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o perfil de temperatura em pavimentos flexíveis a partir de dados climáticos e modelos de transferência de calor, apresentando uma aplicação prática para validação dos resultados obtidos com o uso de dados climáticos na metodologia de transferência de calor, proposta por Dempsey em 1969, com dados de estudos anteriores do pavimento da BR-116, Rio Grande do Sul/Brasil, km 298+560, visando identificar o subconjunto de dados climáticos que melhor descrevem as temperaturas observadas em campo. Para tanto, a metodologia deste trabalho consistiu em desenvolver um aplicativo computacional capaz de coletar dados climáticos fornecidos pela NASA e aplicar o método de transferência de calor proposto por Dempsey. Os resultados obtidos demonstraram que dados climáticos de temperatura do ar e velocidade do vento, medidos a uma altura de 2 m, geram uma previsão de temperatura mais próxima dos valores medidos em campo, em comparação com os resultados de dados climáticos medidos em alturas mais elevadas, atingindo um coeficiente de determinação, R^2 , de 81%, e uma correlação de Pearson de 92,4%, com um erro médio geral de 1,3 °C, um erro médio para as temperaturas mínimas diárias de 0,6 °C e para as máximas de 2,7 °C. Desta forma, a metodologia foi considerada validada e capaz de prever as temperaturas do pavimento da BR-116 com satisfatória precisão para temperaturas mínimas e médias, apresentando um desempenho inferior na predição de temperaturas máximas. Além disso, verificou-se que dados climáticos com medições mais próximas da superfície tendem a resultar em perfis com temperaturas mais elevadas, enquanto que medições entre 10 e 50 m acabam por subestimar os valores previstos de temperatura.

Palavras-chave: Pavimentação. Análise Mecanístico-Empírica. Perfil de temperatura. Dados climáticos da NASA.

ABSTRACT

The current method for designing flexible pavements in Brazil, the method developed by engineer Murillo Lopes de Souza, does not take into account the effects of temperature, which can be one of the main climatic factors in the life span of asphalt concrete. Therefore, the main objective of this work is to evaluate the temperature profile in flexible pavements based on climate data and heat transfer models, presenting a practical application for validating the results obtained using climate data in the heat transfer methodology proposed by Dempsey in 1969, with data from previous studies of the BR-116 pavement in Rio Grande do Sul/Brazil, at km 298+560, aiming to identify the subset of climate data that best describe the observed temperatures in the field. To this end, the methodology of this work consisted of developing a computer application capable of collecting climate data provided by NASA and applying the heat transfer method proposed by Dempsey. The results showed that climate data for air temperature and wind speed, measured at a height of 2 m, generate a temperature prediction closer to the values measured in the field, compared to the results of climate data measured at higher heights, achieving a coefficient of determination, R^2 , of 81%, and a Pearson correlation of 92.4%, with an overall mean error of 1.3 °C, a mean error for daily minimum temperatures of 0.6 °C and for maximum temperatures of 2.7 °C. Thus, the methodology was considered validated and capable of predicting the temperatures of the BR-116 pavement with satisfactory accuracy for minimum and average temperatures, but with inferior performance in predicting maximum temperatures. In addition, it was found that climate data with measurements closer to the surface tend to result in profiles with higher temperatures, while measurements between 10 and 50 m tend to underestimate the predicted temperature values.

Keywords: Pavement. Mechanistic-Empirical analysis. Temperature profile. NASA climate data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transferência de calor entre a superfície e o ar em um dia ensolarado.	22
Figura 2: Sistema típico de pavimento por diferenças finitas.	33
Figura 3: Janela de dados gerais – Módulo 1 (PavHeat).	53
Figura 4: Janela de dados do perfil do pavimento – Módulo 1 (PavHeat).	56
Figura 5: Janela de dados climáticos – Módulo 1 (PavHeat).	57
Figura 6: Perfil de pavimento BR-116.	61
Figura 7: Perfil de temperatura BR-116 para o dia 30/09/2016 às 15:00.	65
Figura 8: Temperatura estimada a 10 cm de profundidade para o pavimento da BR-116 para o dia 30/09/2016 às 15:00 para os diferentes conjuntos de dados climáticos.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos principais fatores de influência da temperatura em pavimentos flexíveis.....	24
Tabela 2: Propriedades dos materiais.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparação entre temperaturas medidas e estimadas (BR-116_a).....	67
Gráfico 2: Comparação entre temperaturas medidas e estimadas (BR-116_b).....	67
Gráfico 3: Comparação entre temperaturas medidas e estimadas (BR-116_c).....	68
Gráfico 4: Comparação entre temperaturas de diferentes conjuntos de dados climáticos.....	69
Gráfico 5: Inversão de temperatura estimada no dia 02/10/2016 no pavimento da BR-116....	70
Gráfico 6: Efeito da condutividade térmica dos materiais.....	74

LISTA DE SIGLAS

IPR: Instituto de Pesquisas Rodoviárias

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

ISC: Índice de Suporte Califórnia

CBR: California Bearing Ratio

AEMC: Análise Elástica de Múltiplas Camadas

GML: GameMaker Language

IDE: Integrated Development Environment

DLL: Dynamic-link library

API: Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação)

MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2

DISC: Data and Information Services Center

GES: Goddard Earth Sciences

GMAO: Global Modeling and Assimilation Office

JSON: JavaScript Object Notation

WSP: Web Service Protocol

HCD: Hourly Climatic Database

LTPP: Long-Term Pavement Performance

EICM: Enhanced Integrated Climatic Model

MEPDG: Mechanistic-empirical Pavement Design Guide

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Delimitação e limitações do estudo.....	17
1.3	Delineamento da pesquisa.....	18
1.4	Estrutura do trabalho.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Efeitos da temperatura em pavimentos flexíveis.....	21
2.2	Fatores de influência da temperatura em pavimentos flexíveis.....	22
2.3	Modelos de previsão de temperatura em pavimentos flexíveis.....	25
2.3.1	Modelos de elementos finitos.....	26
2.3.2	Modelos teóricos e analíticos.....	28
2.3.3	Modelos empíricos.....	30
2.4	Modelo de transferência de calor – Dempsey (1969).....	33
2.4.1	Sistema de pavimento por diferenças finitas.....	33
2.4.2	Equações de diferenças finitas.....	35
2.4.3	Parâmetros meteorológicos.....	40
2.5	Propriedades dos materiais.....	45
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	Aplicativo computacional.....	48
3.1.1	Módulo 1 – API MERRA 2.....	49
3.1.2	Módulo 2 – Modelo de transferência de calor.....	52
3.1.3	Módulo 3 – Leitura dos resultados.....	59
3.2	Validação do aplicativo.....	60
3.2.1	Dados climáticos.....	60
3.2.2	Perfil do pavimento.....	62
3.2.3	Dados gerais da simulação.....	64
4	RESULTADOS DA VALIDAÇÃO.....	66
5	DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	73
6	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS.....	80

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DO CÓDIGO DA API.....	85
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO CÓDIGO PRINCIPAL.....	89

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Bernucci et al. (2006), os pavimentos modernos podem ser descritos pelo ponto de vista estrutural e funcional como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplanagem, que possui o objetivo de resistir aos esforços do tráfego de veículos e da degradação provocada pelo clima, devendo ainda ser economicamente viável e proporcionar aos usuários segurança e conforto. Comumente os pavimentos são divididos em dois tipos básicos: rígidos (executados com concreto de cimento Portland) e flexíveis (com revestimento em concreto asfáltico).

No Brasil, o dimensionamento de pavimentos flexíveis é regulamentado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, através da publicação IPR-719 (DNIT, 2006). Segundo o Manual de Pavimentação brasileiro, na década de 50 houve um expressivo aumento nas obras de pavimentação, resultando em esforços, por parte do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER, de transferência de tecnologia dos Estados Unidos da América para o cenário nacional, dando origem, em 1960, à primeira edição do Manual de Pavimentação como forma de normatizar e uniformizar as novas técnicas construtivas. A segunda edição foi lançada em 1996 devido ao surgimento de novos materiais, técnicas e equipamentos, sendo sua última atualização ocorrida dez anos depois, em 2006, para atendimento ao novo Padrão DNIT.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, popularmente conhecido como método DNER ou método do engenheiro Murillo Lopes de Souza, permanece em vigor até os dias atuais, e, conforme descrito pelo IPR-719 (DNIT, 2006), sua metodologia foi desenvolvida com base no trabalho “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*”, publicado em 1962, e possui o viés estrutural de proteger as camadas granulares e o subleito contra deformações excessivas, utilizando como fundamento o Índice de Suporte Califórnia – ISC, para a obtenção da capacidade de suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos.

O ensaio Índice de Suporte Califórnia – ISC (*California Bearing Ratio – CBR*) foi desenvolvido em 1929 por Stanton e Porter com o objetivo de avaliar o potencial de ruptura do subleito. Atualmente o ensaio é normatizado no Brasil pela norma DNIT 172/2016, e consiste basicamente na pressão de penetração de um pistão padrão em uma amostra preparada previamente com submersão em água por um período de quatro dias.

O método do Professor Murillo se mostrou historicamente eficiente para o objetivo ao qual ele se propõe, porém, com o avanço da tecnologia e dos estudos sobre pavimentação, descobriram-se novos mecanismos de degradação e propriedades dos materiais relevantes para a durabilidade, o conforto e a segurança destes elementos. Com isso, em 2014 iniciou-se o esforço, por parte do DNIT, para o desenvolvimento de uma nova metodologia para o dimensionamento de pavimentos flexíveis. Em 2018, as pesquisas resultaram na criação do *software* denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), em homenagem ao professor Jacques de Medina, devido a sua contribuição para a pavimentação no Brasil.

Com o surgimento da nova tecnologia, torna-se natural a comparação entre o método do Professor Murillo e o MeDiNa, porém, o Manual de Ajuda do Programa MeDiNa (FRANCO & MOTTA, 2020) indica que não existe correlação entre o ISC e os parâmetros de resiliência dos materiais considerados pelo novo método. Diferentemente da metodologia anterior, o MeDiNa busca minimizar a fadiga de misturas asfálticas e a deformação permanente das camadas do pavimento a partir do dimensionamento mecanístico-empírico por meio da rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, que calcula tensões, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura sem a necessidade de dividir o meio contínuo em Elementos Finitos.

Nascimento (2018) apresentou uma visão geral da evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis nos últimos anos, dividindo as metodologias em três grupos de acordo com sua abordagem: empírico, mecanístico-empírico e mecanístico. O autor classificou o método do DNER como empírico, por ser um modelo fenomenológico obtido a partir de observações em campo, e o MeDiNa como mecanístico-empírico, por utilizar os conceitos de mecânica dos pavimentos, em conjunto com modelos de desempenho empíricos. Com isso, o estado da prática no Brasil se encontra na transição entre metodologias.

Porém, no período entre os anos 2000 e 2017, já haviam sido desenvolvidos *softwares*, tais como o *Viscoroute*, *3D-Move*, *LVECD*, e *FlexPave*, que utilizam metodologias mecanísticas, com modelos sofisticados para o cálculo de esforços e de desempenho. Portanto, nota-se que o DNIT optou por promover um avanço tecnológico através de um passo intermediário com a criação do MeDiNa, no lugar de seguir diretamente de uma metodologia empírica para os modelos mecanísticos mais complexos equivalentes às tecnologias mais modernas.

A partir do entendimento do atual avanço de metodologia no Brasil, nota-se que, mesmo com a chegada da nova tecnologia, ainda existe espaço para a sofisticação das técnicas de dimen-

onamento de pavimentos. Um dos pontos relevantes para este refinamento é exposto por Matić et al. (2013), que afirma que a temperatura pode ser um dos principais fatores ambientais no desgaste das camadas de concreto asfáltico de mistura quente, afetando a capacidade estrutural, a performance e a vida útil dos pavimentos.

Adwan et al. (2021), também estão em acordo sobre a distribuição de temperatura nos pavimentos ser um dos fatores ambientais que mais afetam as propriedades mecânicas e a capacidade de carga da estrutura de pavimentos asfálticos flexíveis. Os autores afirmam que as mudanças de temperatura na superfície do pavimento são provocadas pela variação de parâmetros climáticos e influenciada pelas propriedades dos materiais componentes da estrutura, tais como: condutividade térmica, emitância térmica, calor específico e convecção de superfície. A velocidade do vento, a radiação solar e a umidade são considerados os principais parâmetros climáticos para a variação da temperatura, os quais também podem provocar individualmente a degradação dos pavimentos.

Com isso, fica notável a importância da estimativa das temperaturas em que serão submetidos os pavimentos projetados. Porém, devido aos diversos fatores de influência e ao caráter probabilístico dos fatores meteorológicos, evidencia-se a dificuldade em realizar tais estimativas. Sendo assim, o presente trabalho se propôs a desenvolver uma ferramenta auxiliar para prever e facilitar a consideração da temperatura em estruturas de pavimentos flexíveis.

1.1 Objetivos

Dada a importância do conhecimento do espectro de temperaturas nos pavimentos, e a falta de ferramentas nacionais para a estimativa destes dados, este trabalho de conclusão de curso possui como objetivo principal a avaliação do perfil de temperatura em pavimentos flexíveis a partir de dados climáticos e modelos de transferência de calor, apresentando uma aplicação prática para validação da metodologia.

Como objetivos secundários estão a avaliação de conjuntos de dados climáticos e metodologias adequadas para a estimativa de temperatura, e a simplificação da aplicação da metodologia escolhida através de um aplicativo computacional com interface gráfica intuitiva.

Além disso, como consequência do estudo do tema em questão, também surgem como objetivos secundários a exposição da importância da consideração dos efeitos da temperatura em

pavimentos flexíveis, encorajando novas pesquisas com a finalidade de avançar no conhecimento tecnológico da área, e a promoção de uma revisão bibliográfica das principais metodologias para a obtenção de temperaturas em pavimentos, destacando as principais dificuldades que tornam este um problema não trivial, e as principais alternativas adotadas por estudiosos da área.

1.2 Delimitação e limitações do estudo

Este trabalho se delimita ao uso de metodologias já existentes para a conversão de fatores climáticos em temperatura de pavimento, não se propondo a desenvolver equações originais específicas para este estudo. Também, não está incluso a coleta de dados em pavimentos existentes ou qualquer tipo de medição climatológica, sendo o trabalho validado a partir de dados coletados e disponibilizados por pesquisas anteriores. Além disso, o aplicativo desenvolvido para a aplicação da metodologia se propõe a servir como uma ferramenta auxiliar no dimensionamento de pavimentos flexíveis, mas não fornece recursos para o dimensionamento completo, delimitado a gerar resultados gráficos e numéricos do perfil de temperatura em um pavimento ao qual já são conhecidos os materiais e as espessuras de cada camada componente da estrutura.

Além disso, a metodologia está restrita a conjuntos de dados climáticos que não provocam temperaturas negativas em qualquer ponto do pavimento. Na ocorrência de temperaturas negativas, a água contida na estrutura interna congela e as propriedades térmicas dos materiais sofrem alterações significativas. Portanto, a utilização de dados que provocam temperaturas negativas produzem resultados incorretos que não correspondem aos fenômenos físicos esperados.

No que diz respeito à validação da metodologia, é importante destacar que este trabalho está limitado à análise de pavimentos flexíveis, compostos por uma camada de revestimento de concreto asfáltico. Portanto, não foram realizados testes em pavimentos rígidos, impossibilitando a determinação da qualidade dos resultados obtidos para estas estruturas. Sendo assim, é necessário realizar testes adicionais para verificar se a metodologia pode ser estendida a outros tipos de pavimentos, garantindo a precisão e confiabilidade das análises em diferentes contextos de uso.

Algumas limitações foram impostas pela linguagem de programação a qual foi utilizada para o desenvolvimento do projeto. A linguagem principal é denominada de *GameMaker Language* – GML, e foi criada com o intuito de ser uma linguagem simples para o desenvolvimento de jogos em 2D. Dentre suas principais limitações para o desenvolvimento de aplicativos voltados para a engenharia estão inclusas: o número restrito de funções matemáticas, o surgimento de erros acumulados em operações com números de ponto flutuante e a falta de recursos para simplificar a entrada de dados pelos usuários.

Devido ao fato de o aplicativo desenvolvido utilizar dados fornecidos por terceiros, as funcionalidades se limitam ao período com disponibilidade de dados e sua respectiva qualidade. Além disso, os serviços oferecidos pelo aplicativo dependem da contínua disponibilização de dados climáticos e método de aquisição destes. Portanto, a indisponibilidade de operação dos servidores de aquisição de dados, provoca a indisponibilidade de utilização desta ferramenta dentro do aplicativo, e a mudança do método de aquisição dos dados tem como consequência a necessidade de atualização do código desenvolvido.

1.3 Delineamento da pesquisa

A primeira etapa deste trabalho constituiu-se em uma revisão bibliográfica com relação às metodologias utilizadas na literatura nacional e internacional para modelos de estimativa de temperatura em pavimentos flexíveis, além de permitir entender as principais variáveis climáticas e seus mecanismos de influência na temperatura dos pavimentos. Apesar de esta ser uma etapa inicial, ela se estende ao longo de todo o trabalho, servindo de suporte para o desenvolvimento da atividade.

A próxima etapa consistiu em uma pesquisa para a identificação de serviços que forneçam os dados meteorológicos tidos como necessários para o cálculo das temperaturas de acordo com a revisão bibliográfica. Como o objetivo é automatização da obtenção destes dados, procurou-se por serviços que forneçam as informações necessárias através de uma Interface de Programação de Aplicação (*Application Programming Interface* – API), que permite que o *software*, objeto deste trabalho, consiga se comunicar com aplicativos de terceiros.

Com a API definida, deu-se início no desenvolvimento do código no Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment* – IDE) do *GameMaker*, fazendo uso da *GameMaker Language* – GML, para implementação da rotina de cálculos definida pela re-

visão bibliográfica e para a criação da interface gráfica para utilização do *software* e visualização dos resultados. Para suprir as limitações da linguagem de programação principal, utilizou-se o *Python* para o desenvolvimento do código de comunicação com a API, sendo este integrado ao aplicativo por meio de uma Biblioteca de Vínculo Dinâmico (*Dynamic-link library – DLL*), disponível gratuitamente na loja do *GameMaker*, que executa o código compilado no *Python*.

Por fim, o produto gerado foi validado a partir de uma comparação entre os resultados fornecidos pelo aplicativo para um determinado pavimento, com as medições em campo de temperatura em uma dada profundidade, obtidos e disponibilizados por Colpo (2019). Desta forma, também foi possível identificar quais são os subprodutos de dados climáticos, fornecidos pela API, que melhor predizem as temperaturas no pavimento, de acordo com dados das medições.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por 6 capítulos. No primeiro capítulo foi apresentado uma breve introdução sobre o estado da arte do dimensionamento de pavimentos no Brasil, e por que é relevante o estudo das temperaturas em pavimentos flexíveis. Além de serem apresentados os objetivos principais e secundários atingidos por este trabalho, bem como as delimitações e limitações que restringiram o escopo de estudo.

No segundo capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica do tema, demonstrando, de maneira mais detalhada, os efeitos causados pela variação de temperatura em pavimentos flexíveis e os mecanismos que provocam tal variação. Também é apresentando uma revisão das principais metodologias de previsão de temperatura em pavimentos encontradas na literatura, entrando nos pormenores da metodologia utilizada para o desenvolvimento do aplicativo. Por fim, são revisadas as propriedades térmicas, relevantes para a metodologia, dos materiais componentes dos pavimentos.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia de desenvolvimento de cada módulo disponível no aplicativo, indicando as principais considerações e simplificações inclusas na rotina de cálculo descrita pelo código. Neste capítulo também é apresentada a metodologia de aplicação do aplicativo para a estimativa de temperatura em um pavimento real localizado na BR-116, Rio Grande do Sul/Brasil.

O quarto capítulo traz os resultados obtidos através da aplicação prática do aplicativo. Este é um capítulo com caráter descritivo, e expõe os resultados através de gráficos e análises numéricas.

O quinto capítulo apresenta a discussão e análise dos resultados descritos no capítulo anterior. Desta forma, este capítulo deixa de possuir um caráter descritivo e passa a ter o objetivo de promover uma interpretação dos resultados, além de identificar quais conjuntos de dados climáticos melhor se aplicam à metodologia de transferência de calor utilizada.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas no trabalho, e traz sugestões de novos estudos que podem ser realizados visando o contínuo avanço no tema aqui apresentado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Efeitos da temperatura em pavimentos flexíveis

De acordo com Previtera (1974), o concreto asfáltico possui propriedades mecânicas que são influenciadas pela temperatura. Essas propriedades estão diretamente ligadas à sua composição de pedra britada e asfalto. Assim, o autor descreve o comportamento mecânico deste material como viscoelástico, ou seja, um material cujas curvas de tensão – deformação variam em função da temperatura.

Huang (2004) também cita que as propriedades elásticas e viscoelásticas de misturas asfálticas à quente são afetadas significativamente pela temperatura do pavimento, pois esta modifica o módulo de resiliência das camadas de asfalto. Sendo assim, em temperaturas mais baixas, como no inverno, o asfalto torna-se mais rígido, reduzindo as tensões no pavimento e a vida útil à fadiga. Logo, as baixas temperaturas podem causar o surgimento de trincas que, consequentemente, reduzem a durabilidade da estrutura.

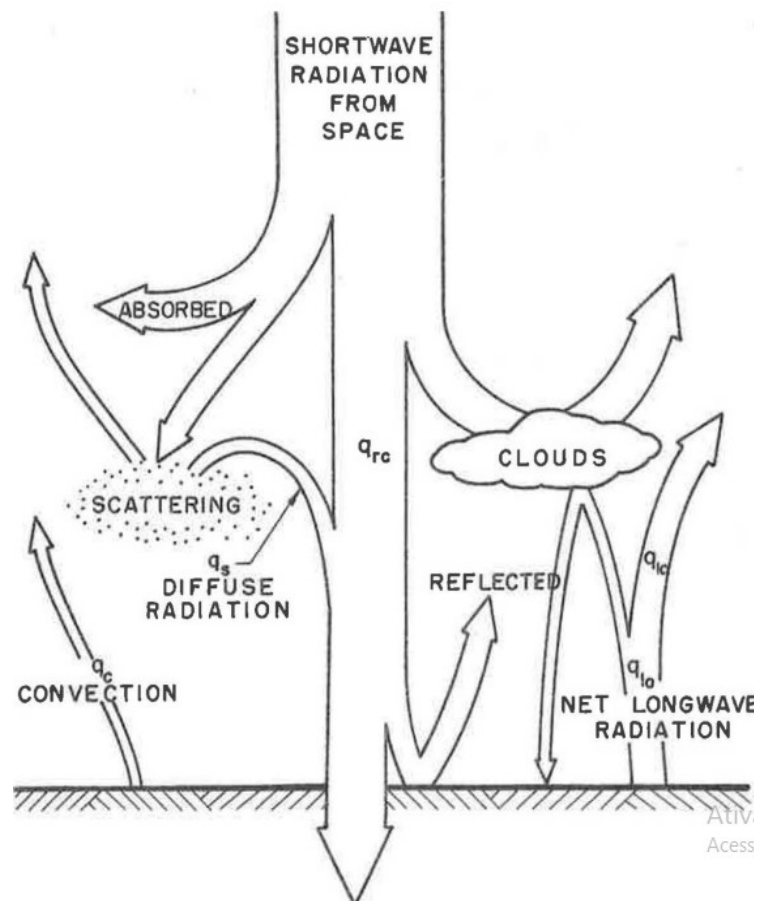
Portela (2011) apresentou uma análise viscoelástica de materiais asfálticos. Suas conclusões demonstraram um aumento significativo nas deflexões dos pavimentos com o aumento da temperatura, devido à redução da rigidez do revestimento asfáltico. Com relação às tensões horizontais, Portela verificou uma redução das tensões máximas na base do revestimento, além de uma inversão nas tensões de tração para compressão nas temperaturas mais elevadas, reduzindo a área de transferência das tensões verticais e provocando um aumento destas nas subcamadas do pavimento, resultando em um maior potencial do surgimento de deformações permanentes.

De modo geral, baixas temperaturas aumentam o risco de dano no pavimento por trincamento. Por outro lado, em temperaturas mais elevadas, há um aumento no risco de deformações permanentes. Portanto, torna-se importante o conhecimento dos mecanismos que influenciam a temperatura em pavimentos flexíveis, para poder considerá-la na escolha de materiais asfálticos no dimensionamento, a fim de garantir a durabilidade, a segurança e o conforto destes elementos.

2.2 Fatores de influência da temperatura em pavimentos flexíveis

Dada a relevância dos efeitos da temperatura em um perfil de pavimento, torna-se essencial a compreensão dos fatores e mecanismos que provocam tais variações. É de conhecimento geral que a temperatura do ar é um dos fatores mais importantes na determinação da temperatura da superfície (ALDRICH, 1956; DEMPSEY, 1969; WANG, 2015; ADWAN et al., 2021; QIN et al., 2022). Porém, a relação entre estes dois parâmetros é complexa e, segundo Aldrich (1956), a transferência de calor entre a superfície do pavimento e o ar é dada por fatores como a evaporação e condensação da umidade, derretimento da neve e do gelo e, principalmente, através da radiação solar direta e difusa, radiação de ondas longas e a condução por convecção. Os fatores da radiação e convecção são apresentados esquematicamente na Figura 1.

Figura 1: Transferência de calor entre a superfície e o ar em um dia ensolarado.



(fonte: Aldrich, 1956)

Aldrich (1956) ainda apresenta as principais variáveis que afetam a magnitude destes fatores. Para a radiação solar e a radiação de ondas longas, a magnitude é determinada pela latitude e elevação da localidade do pavimento, a pressão de vapor atmosférica, a cobertura e tipo de nuvens para a determinação da porcentagem de sol, as condições atmosféricas (tempo limpo ou nublado) e o tipo de superfície, caracterizada pela cor e textura para a determinação da absorvidade da radiação solar. Para a convecção e condução, a magnitude é determinada pela velocidade do vento, tipo de superfície (rugosidade) e a topografia e vegetação nas proximidades do pavimento.

Além disso, o autor destaca que a magnitude da radiação, convecção e condução na transferência de calor também são dependentes do conhecimento da temperatura da superfície. Porém, uma solução para isso pode ser obtida através de um procedimento de suscetivas aproximações.

Qin et al. (2022) apresentaram uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores de influência da temperatura em pavimento. Para eles, estes fatores podem ser divididos em internos e externos. Os principais fatores externos já foram citados nos parágrafos anteriores e incluem a temperatura do ar, a radiação solar e a velocidade do vento. Porém, novos agentes são apresentados, tais como a precipitação, o tráfego e a sombra das árvores.

A precipitação é responsável pela redução da temperatura do pavimento e sua magnitude está diretamente relacionada à natureza da precipitação. O tráfego possui diversos mecanismos de influência na temperatura, tais como o fluxo de calor da fricção dos pneus, do calor radiante e sensível induzido pelo veículo e a blindagem de calor radiante do veículo (CHAPMAN, 2005). Por fim, as árvores regulam o microclima urbano e suas sombras provocam a redução da temperatura através do impedimento da incidência direta da radiação solar no pavimento, semelhante ao efeito provocado pela cobertura de nuvens.

Com relação aos fatores internos, estão inclusos o albedo, a condutividade térmica, a capacidade térmica e a emissividade. O albedo se refere a razão entre a radiação refletida e incidente, e está diretamente relacionado com a cor da superfície; quanto mais escura a coloração, menor é o valor do albedo e maior será o pico de temperatura atingido. A condutividade térmica afeta a participação da absorção solar na superfície do pavimento; valores mais baixos de condutividade térmica provocam o surgimento de temperaturas mais altas durante o dia e mais baixas durante a noite (ASAEDA et al., 1996). A capacidade térmica apresenta um efeito contrário ao da condutividade, pois um aumento desta variável provoca uma redução na tem-

peratura máxima do pavimento e um aumento na temperatura mínima (GUI et al., 2007). A emissividade é a razão entre o fluxo irradiado por unidade de área da superfície de um objeto e o fluxo irradiado por um corpo negro na mesma temperatura, portanto, quanto maior a emissividade, menor será a temperatura do objeto.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais fatores apresentados neste capítulo. Considerando a diversidade destes fatores, torna-se interessante o desenvolvimento de modelos que tenham a capacidade de sumarizar estas variáveis e consigam apresentar uma previsão razoável das temperaturas, de forma a permitir que estas sejam consideradas no dimensionamento de novos pavimentos, visando um aumento em sua segurança e durabilidade.

Tabela 1: Resumo dos principais fatores de influência da temperatura em pavimentos flexíveis.

Variável	Descrição
Temperatura do ar	Fator climático participante das trocas de calor por convecção
Velocidade do vento	Fator climático participante das trocas de calor por convecção
Cobertura de nuvens	Fator climático controlador da radiação extraterrestre
Radiação de ondas curtas	Equivalente à radiação solar extraterrestre no balanço de energia
Radiação de ondas longas	Equivalente à radiação terrestre no balanço de energia
Condutividade térmica	Fator interno do material nas trocas de calor por condução
Capacidade térmica	Fator interno do material nas trocas de calor por condução

(fonte: elaboração própria)

2.3 Modelos de previsão de temperatura em pavimentos flexíveis

Adwan et al. (2021) publicaram uma revisão dos principais modelos para a previsão de temperatura em pavimentos flexíveis. O estudo apresenta 38 modelos preditivos que foram classificados de acordo com sua abordagem metodológica, sendo elas numéricas de elementos finitos, teóricas e analíticas ou empíricas.

Os modelos que utilizam métodos numéricos são os mais complexos e fazem o uso de técnicas matemáticas de elementos finitos para resolverem equações que descrevem a transferência de calor ao longo de um perfil de pavimento. Os modelos teóricos utilizam equações físicas para descrever a transferência de calor e fornecem uma solução analítica para a temperatura de

um determinado pavimento. Por fim, os modelos empíricos são os mais simples e utilizam dados observados em campo para a criação de equações a partir de técnicas estatísticas e probabilísticas.

2.3.1 Modelos de elementos finitos

De acordo com Adwan et al. (2021), os modelos numéricos de elementos finitos consideram um complexo processo de transferência de calor, garantindo que sua aplicação seja universal e que a previsão de temperatura possa ser feita em diferentes condições. Estes métodos discretizam o pavimento em um sistema de múltiplas camadas, as quais possuem suas próprias equações, normalmente descrevendo a transferência de calor de forma unidimensional ou bidimensional. É um método robusto que pode ser utilizado para uma variedade de problemas de engenharia. Porém, possui a desvantagem de não ser de fácil aplicação e requer que os usuários tenham proficiência para a determinação dos elementos finitos de forma a garantir a convergência das equações do modelo.

Wang (2015) mencionou que o método das diferenças finitas tem sido utilizado por diversos autores para prever a temperatura de camadas de pavimento dependentes do tempo, e que a principal vantagem dos métodos numéricos é a possibilidade de serem definidas condições de contorno não lineares na superfície asfáltica, através da consideração de diferentes mecanismos de transferência de calor. Dempsey & Thompson (1970) apresentaram maiores detalhes sobre estes mecanismos, que envolvem a radiação incidente e refletida de ondas curtas, a radiação de ondas longas emitida pelo pavimento, a radiação de ondas longas reemitida pela atmosfera, a convecção entre a superfície do pavimento e o ar, e o fluxo de calor entre camadas do pavimento.

Abaixo são listados autores que fizeram uso ou desenvolveram métodos de elementos finitos para a previsão de temperatura em pavimentos asfálticos, bem como as particularidades de cada modelo:

Straub et al. (1968) utilizaram o programa computacional descrito no livro “Fortran Methods In Heat Flow” de Schenck (1963) para obter resultados e comparar com dados de temperatura, medidos em campo, de pavimento na cidade de Nova York. O modelo levou em consideração as propriedades dos materiais (densidade, condutividade térmica, calor específico e coeficiente de convecção), propriedades relacionadas à radiação (absorvidade e emissividade) e dados

climáticos de temperatura do ar e radiação solar. Concluiu-se que o mecanismo de radiação solar apresenta uma influência maior na transferência de calor no pavimento do que o mecanismo de convecção ocasionado pela temperatura do ar. Além disso, os resultados obtidos para dias ensolarados se mostraram satisfatórios para a previsão das temperaturas máximas. Enquanto que dias nevados, de baixa temperatura, apresentam erros de previsão significativos.

Minhoto et al. (2006) modelaram um perfil de pavimento de elementos finitos tridimensional através do código fonte de uso geral ANSYS 7.0. Apesar de incomum, a abordagem tridimensional foi utilizada apenas para fins de compatibilidade com um modelo de trincamento utilizado pelos autores em outro projeto. Este modelo, diferente do anteriormente apresentado, levou em consideração não apenas a radiação solar e a temperatura do ar, mas também a velocidade do vento diária. Para este estudo, os resultados mostraram-se melhores para os meses frios, em comparação com os meses quentes, e para a superfície do pavimento, em comparação com camadas mais profundas. Ademais, a utilização de uma mistura asfáltica com borracha não apresentou uma diferença significativa no perfil de temperaturas, podendo esta ser simulada com propriedades equivalentes às misturas asfálticas convencionais.

Uma referência nacional para metodologias por elementos finitos é o *software* CAP3D-D que, segundo Santos et al. (2019), foi desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC) a partir do programa de análise por elementos finitos CAP3D, onde a letra “D” correspondente à palavra “dimensionamento” foi adicionada após o nome original, indicando que agora o programa considera a evolução de dano e fornece o dimensionamento de um sistema de camadas.

Dempsey & Thompson (1970) desenvolveram, com base em equações da literatura, um modelo de transferência de calor para avaliar a ação do congelamento e os efeitos da temperatura em um sistema de múltiplas camadas de pavimento. A metodologia leva em consideração a radiação de ondas curtas e longas, propriedades dos materiais (massa específica, condutividade térmica, capacidade térmica, classificação dos materiais e teor de umidade), propriedades relacionadas à radiação (absorvidade e emissividade) e dados climáticos de temperatura do ar, velocidade do vento, umidade, precipitação e cobertura de nuvens. A partir deste estudo, foi possível verificar que a acurácia da previsão de temperaturas do modelo depende da qualidade dos dados de entrada (relacionados ao clima e às propriedades dos materiais) e não dos métodos numéricos adotados.

O estudo apresentado por Dempsey & Thompson (1970) descreve resumidamente o modelo de transferência de calor. Uma apresentação mais detalhada do desenvolvimento, validação e

utilização do modelo pode ser encontrada na dissertação de Dempsey (1969), a qual foi utilizada como base para o desenvolvimento do aplicativo computacional proposto por este trabalho de conclusão de curso.

Além disso, o Modelo Climático Integrado Aprimorado (*Enhanced Integrated Climatic Model* – EICM) é frequentemente considerado como o método padrão para a estimativa de perfis de temperatura e umidade em pavimentos flexíveis. Os fundamentos do EICM foram desenvolvidos por Dempsey (1969), mas diversas modificações foram realizadas ao longo dos anos, resultando no produto que é utilizado nos dias de hoje. De acordo com Zapata & Houston (2008), o EICM é um modelo unidimensional de fluxo de calor e umidade utilizado no Guia Mecânico-empírico de Projeto de Pavimentos (*Mechanistic-empirical Pavement Design Guide* – MEPDG). No MEPDG, o EICM é usado para prever ou simular as mudanças no comportamento e nas características de pavimentos em conjunto com os ciclos naturais das condições ambientais que ocorrem ao longo dos anos de serviço.

2.3.2 Modelos teóricos e analíticos

Segundo Wang (2015), a abordagem teórica e analítica é preferível quando se está lidando com condições de contorno de superfície mais simplistas, em comparação àquelas propostas nos métodos numéricos. A principal característica deste tipo de modelo é que a maioria dos parâmetros climáticos, meteorológicos e geográficos, normalmente utilizados nos métodos numéricos e empíricos, não são necessários nas metodologias teóricas, pois estas, em geral, utilizam como principal dado de entrada o histórico de temperaturas da superfície de um determinado pavimento para o período de interesse.

Neste caso, a obtenção das condições de contorno se torna um processo relativamente simples, pois as temperaturas da superfície do pavimento podem ser medidas em campo em diferentes momentos do período de interesse. Posteriormente pode-se selecionar um esquema de interpolação adequado, a partir de análise numérica, para extrapolar os valores e gerar um histórico contínuo de temperaturas com base nas medições.

Os estudos de modelos teóricos tiveram início com Barber (1957), que apresentou a relação entre a temperatura de pavimento com o vento, precipitação, temperatura do ar e radiação solar, regidos pelas propriedades térmicas do pavimento. Seu objetivo era prever as temperaturas máximas em diferentes profundidades de um pavimento homogêneo, com apenas uma ca-

mada e espessura infinita. Barber partiu do princípio de que a temperatura de uma determinada massa varia a partir de uma função senoidal e, por meio da comparação entre o modelo e dados observados, obteve resultados que indicaram um erro médio na previsão da temperatura de aproximadamente 3 °C para os 16 valores comparados.

Solaimanian & Kennedy (1993) desenvolveram um modelo que se baseia na temperatura máxima do ar, na intensidade máxima horária de radiação solar e no balanço de energia na superfície do pavimento. Semelhante ao exemplo anterior, em 83% dos casos, a equação proposta foi capaz de prever as temperaturas do pavimento com um erro médio de 3 °C. As conclusões apresentadas indicam que existe uma relação essencialmente linear entre a temperatura máxima do pavimento e a temperatura máxima do ar, e que um aumento nos parâmetros de absorvidade e emissividade e uma redução na condutividade térmica dos materiais provoca um aumento nas temperaturas previstas pelo modelo. Além disso, os resultados indicam que é esperado uma diferença menor entre as temperaturas máximas do ar e do pavimento em altas latitudes.

Liang & Niu (1998) também optaram por evitar metodologias que exijam grande poder computacional, como o método dos elementos finitos, e desenvolveram duas soluções analíticas para um sistema de pavimento de três camadas, uma considerando a variação da temperatura do ar como condição de contorno, e outra considerando a variação da temperatura da superfície do pavimento, para quando este dado é conhecido. As principais descobertas do estudo indicam que a distribuição de temperatura ao longo da profundidade do pavimento é altamente não linear, especialmente quando a variação de temperatura diária é considerada no cálculo. Ainda, observou-se que a frequência de variação da temperatura é um dos fatores mais importantes na determinação da distribuição de temperatura na profundidade do pavimento, e é considerada mais significativa do que sua magnitude.

Com isso, verifica-se que as abordagens teóricas e analíticas apresentam algumas vantagens em comparação aos métodos numéricos, como a simplificação dos dados de entrada e a possibilidade de obter resultados satisfatórios com pouco poder computacional. Entretanto, é importante levar em consideração as limitações dessas abordagens, como a relação essencialmente linear entre as variáveis envolvidas e a possibilidade de uma diferença menor entre as temperaturas do ar e do pavimento em altas latitudes. Dessa forma, estes modelos são uma alternativa a ser considerada para aplicações mais práticas em pavimentos de menor complexidade.

2.3.3 Modelos empíricos

Conforme descrito por Wang (2015), os modelos empíricos são baseados em estatística e probabilidade, e normalmente são desenvolvidos a partir de uma grande base de dados contendo informações sobre o clima, meteorologia, geografia e geometria do pavimento, tais como a temperatura do ar, velocidade do vento, intensidade da radiação solar, latitude e espessura da camada dos materiais, em adição às medições em campo de temperatura do pavimento em diferentes profundidades.

A principal vantagem deste método é a facilidade e praticidade de seu uso, sendo capaz de produzir rapidamente resultados razoáveis de previsão de temperatura para os dados de entrada inclusos na amostra original dos bancos de dados a partir dos quais esses modelos foram gerados. A facilidade destes modelos é devida ao fato de que, em geral, são constituídos por apenas uma equação, obtida através de regressão linear. No entanto, essas equações não garantem precisão na previsão para os dados de entrada localizados fora da base de dados da amostra original (WANG, 2015).

Devido ao caráter pontual de aplicação destes modelos, há uma grande variedade de equações propostas na literatura por autores de diferentes partes do mundo. Isso se deve ao fato de que as condições climáticas e geográficas, e os tipos e materiais dos pavimentos, variam significativamente em diferentes localidades, o que afeta a forma como as temperaturas são distribuídas nos pavimentos. Portanto, abaixo estão listados apenas alguns autores, a fim de exemplificar os métodos empíricos.

Park et al. (2001) desenvolveram a equação (1) com base em 197 pontos de referência de temperatura, coletados em pavimentos de 3 localidades diferentes no estado de Michigan. Outros 120 pontos localizados em novas 3 localidades foram utilizados para validar o modelo, que apresentou um coeficiente de correlação maior do que 90%. A equação é relativamente simples e os únicos dados necessários para utilizá-la são a temperatura da superfície e o horário em que esta foi medida.

$$T_Z = T_{surf} + (-0,3451z \times 0.0432z^2 + 0.00196z^3) \times \sin(-6.3252t + 5.0967) \quad (1)$$

Onde:

T_z : temperatura do pavimento na profundidade z (°C);

T_{surf} : temperatura do pavimento na superfície (°C);

z : profundidade onde a temperatura será calculada (cm);

t : horário de medição da temperatura do pavimento (dias).

Matić et al. (2013) propuseram as equações (2) e (3) respectivamente para o cálculo da temperatura máxima e mínima na profundidade de interesse. Ambas equações não apresentam complexidade matemática, sendo lineares e de primeira ordem, além de requererem apenas um dado de entrada, equivalente a temperatura máxima ou mínima da superfície do pavimento analisado. Através deste estudo, os autores observaram que a temperatura do pavimento na profundidade é influenciada pela temperatura do dia anterior, pois as trocas internas de calor ocorrem significativamente mais lentas do que as da superfície. O modelo foi desenvolvido e validado na Sérvia (Europa), localidade de baixas temperaturas, e apresentou um coeficiente de correlação de 97% com um desvio padrão de 0,83 °C.

$$y_{max} = 0,963288x_{max} - 0,151137x_d + 4,452996 \quad (2)$$

$$y_{min} = 1,004801x_{max} - 0,199273x_d + 0,051532 \quad (3)$$

Onde:

y_{max} : temperatura máxima do pavimento na profundidade especificada (°C);

y_{min} : temperatura mínima do pavimento na profundidade especificada (°C);

x_{max} : temperatura máxima diária da superfície do pavimento (°C);

x_{min} : temperatura mínima diária da superfície do pavimento (°C);

x_d : profundidade onde a temperatura será calculada (cm).

Ao contrário dos dois estudos acima apresentados, Ariawan et al. (2015) desenvolveram equações para profundidades específicas a partir de dados coletados na rodovia nacional de Denpasar – Gilimanuk (Indonésia), não sendo possível estimar a temperatura em qualquer ponto de interesse ao longo do perfil do pavimento. A equação (4) foi concebida para estimar a temperatura da superfície do pavimento com base na umidade relativa do ar, e apresenta um coeficiente de correlação de 80%. As equações (5) e (6) dependem dos resultados da equação (4) e da temperatura do ar para estimar a temperatura do pavimento, respectivamente a 20 e 70 mm de profundidade. A equação (5) é a que apresenta o melhor coeficiente de correlação, equivalente a 97,7%, enquanto que a equação (6) apresenta o pior, de 78,9%. Semelhante ao modelo anteriormente apresentado, todas as equações são lineares e de primeira ordem.

$$T_{.00} = 10,813 - 0,919RH \quad (4)$$

$$T_{.20} = -6,898 + 0,687T_{.Air} + 0,640T_{.00} \quad (5)$$

$$T_{.70} = 1,965 + 0,755T_{.Air} + 0,331T_{.00} \quad (6)$$

Onde:

T.00: temperatura estimada na superfície do pavimento (°C);

T.20: temperatura estimada a 20 mm de profundidade (°C);

T.70: temperatura estimada a 70 mm de profundidade (°C);

T.Air: temperatura do ar (°C);

RH: umidade relativa do ar (%).

Portanto, as metodologias empíricas mostram-se eficazes na obtenção de resultados precisos, com coeficientes de correlação, via de regra, superiores ao de outras metodologias, para o pavimento ao qual foram obtidos os dados estatísticos. No entanto, é importante destacar que essas técnicas são limitadas ao fato de não apresentarem o mesmo desempenho em outras localidades ou tipos de pavimentos. Portanto, é fundamental avaliar cuidadosamente a aplicabilidade de cada equação proposta e restringi-las ao uso local.

2.4 Modelo de transferência de calor – Dempsey (1969)

Dentre as metodologias apresentadas no capítulo 2.3 , o modelo de transferência de calor proposto por Dempsey (1969) foi escolhido para o desenvolvimento do *software* proposto neste trabalho. Sendo assim, este capítulo se dedica a apresentar, de forma detalhada, as equações que fazem parte desta metodologia.

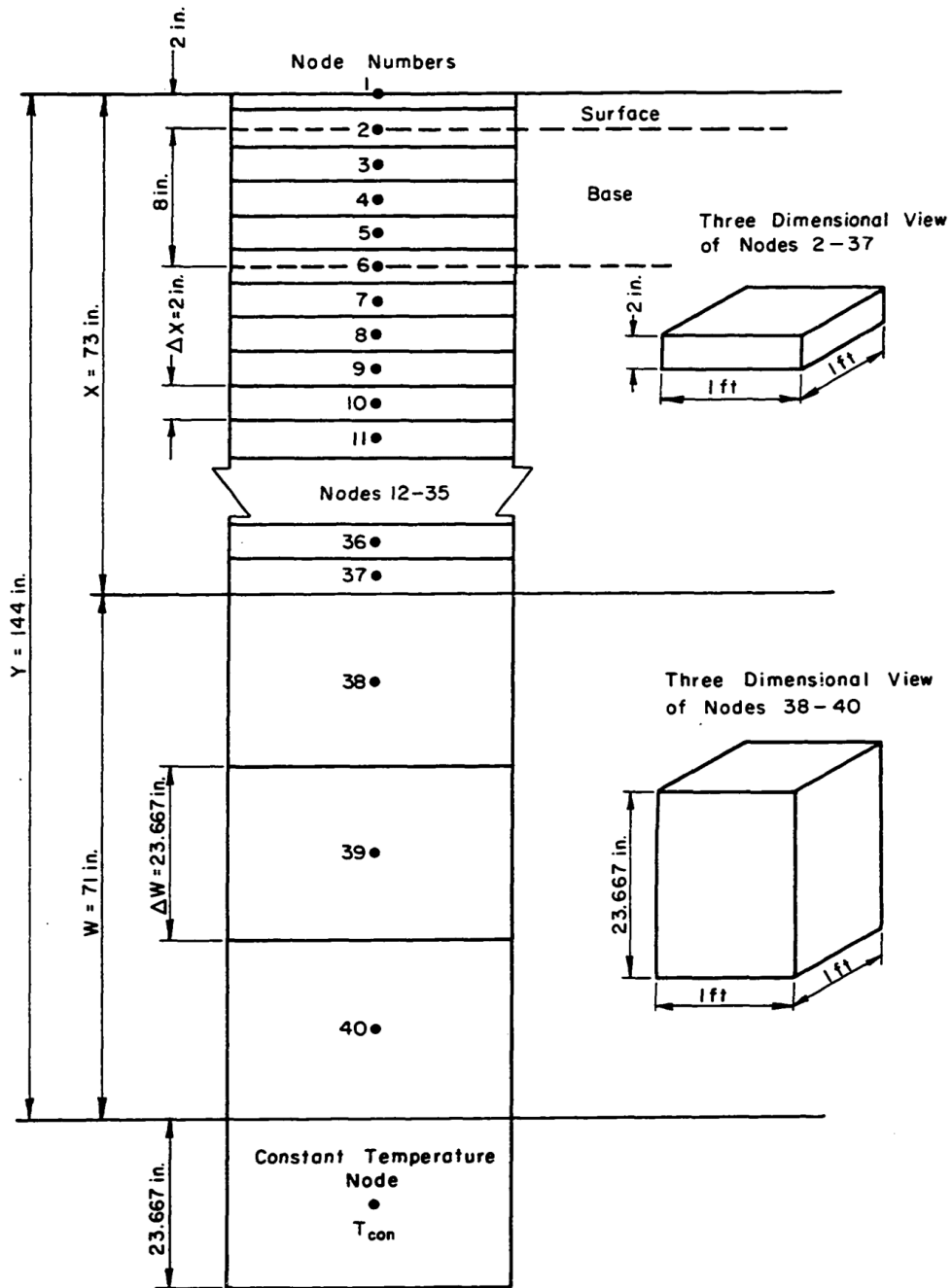
O modelo de Dempsey foi escolhido como base para este trabalho por este também ser a base do Modelo Climático Integrado Aprimorado (*Enhanced Integrated Climatic Model – EICM*), utilizado pelo Guia Mecanístico-empírico de Projeto de Pavimentos (*Mechanistic-empirical Pavement Design Guide – MEPDG*), atual estado da prática para dimensionamento de pavimentos flexíveis em diversas localidades do mundo, componente do *software* AASHTOWare Pavement ME Design.

Porém, vale destacar que o modelo de Dempsey sofreu diversas modificações ao longo dos anos. No EICM, apesar de ser fundamentado no modelo de 1969, já foram realizadas inúmeras correções para o aprimoramento da metodologia, onde ajustes e melhorias seguem sendo explorados até os dias de hoje. Portanto, devido ao fato de o aplicativo produzido neste trabalho considerar a metodologia estritamente conforme apresentada em sua primeira versão em 1969, os avanços realizados ainda não são contemplados pelo novo *software*.

2.4.1 Sistema de pavimento por diferenças finitas

A Figura 2 apresenta um sistema típico de pavimento utilizado pela metodologia de transferência de calor. O pavimento representado está dividido em camadas de revestimento, base e solo, respectivamente com 2, 8 e 134 polegadas. Cada camada está subdividida em nós numerados de 1 a 40.

Figura 2: Sistema típico de pavimento por diferenças finitas.



(fonte: Dempsey 1969)

Os nós 2 a 37 são denominados nós normais. Eles possuem uma área de seção transversão de 1 pé quadrado e altura, ΔX , determinada de forma a garantir a estabilidade matemática das equações e permitir que a interface entre diferentes camadas esteja localizada no centro nodal.

Os nós 2 e 6 também são denominados de nós de interface, onde a metade superior possui as propriedades térmicas do material da camada imediatamente acima, e a metade inferior possui as propriedades do material da camada imediatamente abaixo. O nó 37 é denominado de último nó normal, e, apesar de suas dimensões serem semelhantes aos demais, a equação que rege sua temperatura leva em consideração o maior volume do nó 38.

O nó 1 é denominado de nó de superfície. Este nó possui metade do volume nodal dos nós normais, sendo sua altura equivalente $\Delta X/2$. Desta forma, o centro nodal está localizado exatamente na superfície, possuindo equações próprias para a consideração de todos os parâmetros climáticos.

Os nós 38 a 40 são denominados de nós de terminação e possuem altura nodal, ΔW , maior do que ΔX , com a finalidade de reduzir o tempo computacional da metodologia. Considerando o somatório da altura dos nós 1 a 37 como X , e o somatório das alturas dos nós de terminação como W , Flack (1965) descobriu que uma razão X/W de aproximadamente 1, fazendo o uso de 3 nós de terminação, garante uma significativa redução no tempo computacional, com a consequência de erros de diferença finita não superiores a 1%.

Por fim, abaixo do nó 40 se encontra o chamado nó de temperatura constante. A partir de uma certa profundidade o solo apresenta variações de temperatura insignificantes, podendo ser considerado como temperatura constante. Estudos podem ser conduzidos para a determinação da profundidade e da temperatura deste nó. Como exemplo, em Ilinois/EUA foi determinado que a uma profundidade de 29 pés, a temperatura permanece aproximadamente constante em 51 F. Para o aplicativo proposto neste trabalho, a profundidade total do pavimento Y é determinada pelo usuário, enquanto a temperatura do nó constante equivale à média anual da temperatura do ar, obtida através dos dados climáticos.

2.4.2 Equações de diferenças finitas

A transferência de calor no pavimento é dada essencialmente pela convecção e radiação entre o ar e a superfície do pavimento, e pela condução, transferindo calor dentro do sistema de pavimento. As equações de diferenças finitas para a condução de calor interna são obtidas a partir da equação geral, unidimensional, de Fourier:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (7)$$

A primeira e segunda derivadas na equação 7 podem ser substituídas pelos termos de diferenças finitas apropriados, conforme a equação 8:

$$\frac{T_{n-1} + T_{n+1} - 2T_n}{\Delta X^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T'_n - T_n}{\Delta \theta} \quad (8)$$

A difusividade térmica, α , é equivalente a $K/C\gamma$. Substituindo α e rearranjando os termos da equação 8, o resultado obtido é uma equação geral para o balanço de calor em um nó interno arbitrário:

$$\frac{k}{\Delta X}(T_{n-1} - T_n) + \frac{k}{\Delta X}(T_{n+1} - T_n) = \frac{\gamma C \Delta X}{\Delta \theta}(T'_n - T_n) \quad (9)$$

Onde:

k: designação geral para a condutividade térmica (Btu/h-ft-F);

C: designação geral para a capacidade térmica (Btu/lb-F);

γ : massa específica (pcf);

ΔX : profundidade de um nó normal (ft, in);

$\Delta \theta$: incremento de tempo (h);

T_n : temperatura nodal (F);

T'_n : temperatura nodal após um incremento de tempo (F).

O balanço de energia para um incremento de tempo, $\Delta \theta$, pode ser expresso da seguinte maneira: calor adicionado a um volume nodal + calor cedido por um volume nodal = calor armazenado em um volume nodal. Desta forma, pode-se observar que a equação 9 descreve o balanço de energia, onde os dois termos do lado esquerdo da igualdade representam a condutivida-

de térmica de um volume nodal, e o termo do lado direito representa o calor armazenado em um volume nodal após um incremento de tempo, $\Delta\theta$.

É possível resolver a equação 9 para a temperatura futura T'_n , para um incremento de tempo, $\Delta\theta$, para cada um dos nós apresentados no capítulo 2.4.1 . No caso do nó de superfície, a equação resultante é expressa da seguinte maneira:

$$T'_n = T_n \left(1 - \frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta X^2} - \frac{2H\Delta\theta}{\gamma C \Delta X}\right) + T_{n+1} \left(\frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta X^2}\right) + T_{air} \left(\frac{2H\Delta\theta}{\gamma C \Delta X}\right) + Q_{rad} \left(\frac{2\Delta\theta}{\gamma C \Delta X}\right) \quad (10)$$

Onde os novos termos apresentados equivalem a:

T_{air} : temperatura do ar (F);

H: coeficiente de convecção (Btu/h-ft²-F);

Q_{rad} : fluxo de radiação influenciando a transferência de calor na superfície (Btu/ft²-h).

Para garantir a estabilidade matemática da temperatura futura de qualquer nó, é necessário que todos os coeficientes de temperatura sejam positivos. Portanto, a estabilidade matemática da equação 10 é obtida obedecendo a inequação 11:

$$\Delta\theta \leq \frac{\gamma C \Delta X}{2(H + k/\Delta X)} \quad (11)$$

Para o caso de um nó interior normal, a equação resultante é:

$$T'_n = T_n \left(1 - \frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta X^2}\right) + (T_{n-1} + T_{n+1}) \left(\frac{k\Delta\theta}{\gamma C \Delta X^2}\right) \quad (12)$$

Para a estabilidade matemática da equação 12:

$$\Delta\theta \leq \frac{\gamma C \Delta X^2}{2k} \quad (13)$$

Para o caso de um nó interior de interface, é necessário levar em consideração as diferentes propriedades dos dois materiais envolvidos, portanto, a equação resultante é:

$$\begin{aligned} T'_n = T_n & \left(1 - \frac{2k_d \Delta\theta}{\Delta X^2 (\gamma_d C_d + \gamma_{d+1} C_{d+1})} - \frac{2k_{d+1} \Delta\theta}{\Delta X^2 (\gamma_d C_d + \gamma_{d+1} C_{d+1})} \right) + \\ & T_{n-1} \left(\frac{2k_d \Delta\theta}{\Delta X^2 (\gamma_d C_d + \gamma_{d+1} C_{d+1})} \right) + T_{n+1} \left(\frac{2k_{d+1} \Delta\theta}{\Delta X^2 (\gamma_d C_d + \gamma_{d+1} C_{d+1})} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Para a estabilidade matemática da equação 14:

$$\Delta\theta \leq \frac{\Delta X^2 (\gamma_d C_d + \gamma_{d+1} C_{d+1})}{2(k_d + k_{d+1})} \quad (15)$$

Para o caso do último nó normal, a equação precisa descrever as trocas de calor que ocorrem com um nó normal acima, e um nó de terminação abaixo, com volume nodal consideravelmente maior, portanto, a equação resultante é:

$$\begin{aligned} T'_n = T_n & \left(1 - \frac{k \Delta\theta}{\gamma C \Delta X^2} - \frac{2k \Delta\theta}{\gamma C \Delta X (\Delta X + \Delta W)} \right) + \\ & T_{n+1} \left(\frac{2k \Delta\theta}{\gamma C \Delta X (\Delta X + \Delta W)} \right) + T_{n-1} \left(\frac{k \Delta\theta}{\gamma C \Delta X^2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Para a estabilidade matemática da equação 16:

$$\Delta\theta \leq \frac{1}{\frac{k}{\gamma C \Delta X^2} + \frac{2k}{\gamma C \Delta X (\Delta X + \Delta W)}} \quad (17)$$

Para o caso do primeiro nó de terminação, a equação resultante é:

$$T'_{n+1} = T_{n+1} \left(1 - \frac{k\Delta\theta}{2k\Delta\theta} - \frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W (\Delta X + \Delta W)} \right) + T_n \left(\frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W (\Delta X + \Delta W)} \right) + T_{n+2} \left(\frac{k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W} \right) \quad (18)$$

Para a estabilidade matemática da equação 18:

$$\Delta\theta \leq \frac{1}{\frac{k}{\gamma C \Delta X^2} + \frac{2k}{\gamma C \Delta X (\Delta X + \Delta W)}} \quad (19)$$

O segundo nó de terminação se assemelha a um nó interior normal, diferindo apenas no volume nodal, portanto, a equação resultante é:

$$T'_{n+2} = T_{n+2} \left(1 - \frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W^2} \right) + (T_{n+1} + T_{n+3}) \left(\frac{k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W^2} \right) \quad (20)$$

Para a estabilidade matemática da equação 20:

$$\Delta\theta \leq \frac{\gamma C \Delta W^2}{2k} \quad (21)$$

Por fim, o último nó de terminação considera as trocas de calor com o segundo nó de terminação e com o nó de temperatura constante, conforme descrito pela equação:

$$T'_{n+3} = T_{n+3} \left(1 - \frac{2k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W^2} \right) + T_{n+2} \left(\frac{k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W^2} \right) + T_{con} \left(\frac{k\Delta\theta}{\gamma C \Delta W^2} \right) \quad (22)$$

A equação 21, além da equação 20, também apresenta a condição de estabilidade matemática para a equação 22.

2.4.3 Parâmetros meteorológicos

A precisão da predição de temperaturas em pavimentos flexíveis depende majoritariamente dos parâmetros relacionados ao nó de superfície. Estes são os parâmetros meteorológicos para transferência de calor por radiação e convecção. Logo, a transferência de calor por radiação Q_{rad} pode ser descrita conforme a equação abaixo:

$$Q_{rad} = Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \quad (23)$$

Onde:

Q_{rad} : fluxo de radiação influenciando a transferência de calor na superfície (Btu/ft²-h);

Q_i : fluxo de calor resultante da radiação incidente de ondas curtas (Btu/ft²-h);

Q_r : fluxo de calor resultante da radiação de ondas curtas refletidas (Btu/ft²-h);

Q_a : fluxo de calor resultante da radiação de ondas longas emitidas pela atmosfera (Btu/ft²-h);

Q_e : fluxo de calor resultante da radiação de ondas longas emitidas pelo pavimento (Btu/ft²-h).

A quantidade de radiação de ondas curtas que entra no balanço de energia na superfície do pavimento, Q_s , equivale aos dois primeiros termos do lado direito da equação 23, conforme apresentado pela equação 24. Q_s pode ser calculado pela equação de regressão desenvolvida por Baker & Haines (1969), conforme expresso pela equação 25.

$$Q_s = Q_i - Q_r \quad (24)$$

$$Q_s = \alpha R^* \left(A + B \frac{S}{100} \right) \quad (25)$$

Onde:

Q_s : quantidade de radiação de ondas curtas que entra no balanço de energia na superfície do pavimento (Btu/ft²-h);

α : absorvidade de radiação da superfície (dependente da coloração, normalmente variável entre 0,80 e 0,90 para concreto asfáltico);

A e B: constantes da equação de regressão (respectivamente 0,202 e 0,539);

S: possível luz solar diária (%);

R*: radiação extraterrestre (Btu/ft²-dia).

Neste ponto vale destacar que estudos recentes, realizados por Bryce & Ihnat (2020), indicam que existe uma falha fundamental nas equações de balanço de energia global conforme propostas na tese de Dempsey (1969), e que o coeficiente de transferência de calor por convecção superestima as temperaturas em condições climáticas sem vento e em momentos que a temperatura da superfície está muito alta. Os autores apresentam uma solução para o problema e demonstram com essa correção melhora significativamente a previsão de temperatura em pavimentos. Porém, esta correção não é contemplada por este trabalho, sendo apenas destacada como uma limitação a ser aprimorada em versões futuras.

Para obter a radiação extraterrestre, R*, de uma determinada hora, h, é necessário conhecer o horário do pôr do sol, SS, e a radiação extraterrestre diária, Q₀. Assim, R* pode ser expresso conforme a equação 26. O horário do pôr do sol pode ser calculado a partir da equação 27, dependente apenas do ângulo horário de nascer do sol corrigido, Z.

$$R^* = \frac{-3Q_0}{4(SS - 12)^3}(h - 12)^2 + \frac{3Q_0}{4(SS - 12)} \quad (26)$$

$$SS = 12 + \frac{Z}{0,2618} \quad (27)$$

A radiação extraterrestre diária pode ser calculada de acordo com a equação 28, onde o valor 3310,45 equivale à constante de radiação extraterrestre em Btu/ft²-dia, e equação depende da latitude, δ , da declinação solar, ϕ , e do ângulo horário de nascer do sol corrigido, Z. Todos os ângulos devem ser expressos em radianos.

$$Q_0 = 3310,45 \sin(\delta) \sin(\varphi) \left(Z - \frac{\sin(Z)}{\cos(Z)} \right) \quad (28)$$

A declinação solar, φ , é calculada a partir da equação 29 e depende exclusivamente do dia juliano, onde 1 de janeiro equivale a $n = 1$ e 31 de dezembro equivale a $n = 365$. A expressão é válida apenas para anos regulares; para o caso de anos bissextos, a declinação do dia 29 de fevereiro pode ser considerada equivalente à declinação do dia 28 de fevereiro, $n = 59$.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (29)$$

O ângulo horário de nascer do sol, H_a , é calculado a partir da equação 30, depende da latitude, δ , e da declinação solar, φ . Este valor é corrigido de acordo com a condição 31, garantindo que seja sempre positivo.

$$H_a = \arccos\left(\left|\frac{-\sin(\varphi) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta)}\right|\right) \quad (30)$$

$$Z = \begin{cases} H_a & \text{se } \cos(H_a) \geq 0 \\ \pi - H_a & \text{se } \cos(H_a) < 0 \end{cases} \quad (31)$$

Dando sequência às equações que definem o balanço de energia, a radiação de ondas longas consiste na radiação emitida pela superfície do pavimento e na radiação emitida de volta para o pavimento pela atmosfera.

A radiação de ondas longas emitida pela superfície do pavimento é descrita conforme a equação 32. O parâmetro de emissividade, ε , depende do tipo de pavimento, de sua temperatura e do comprimento de onda. Os termos entre parênteses na equação equivalem à correção da radiação emitida pelo pavimento de acordo com a cobertura de nuvens. Para a cobertura de nuvens é aplicado um fator de base de nuvem, que, de acordo com Geiger (1959), varia entre

0,80 e 0,90 para nuvens com alturas entre 300 e 1800 m, tipicamente observadas no inverno em diversas localidades geográficas.

$$Q_e = \sigma \varepsilon T_{1R}^4 \left(1 - N \frac{100 - S}{100}\right) \quad (32)$$

Onde:

Q_e : quantidade de radiação de ondas longas emitida pelo pavimento (Btu/ft²-h);

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($0,172 \times 10^{-8}$ Btu-h-ft²-R⁴);

ε : emissividade de radiação da superfície;

T_{1R} : temperatura Rankine do nó de superfície (°R);

N : fator de base de nuvem;

S : possível luz solar diária (%).

A radiação de ondas longas reemitida pela atmosfera é descrita pela equação 33. Diferentemente da equação anterior, esta não possui parâmetros relacionados ao pavimento, como a temperatura e a emissividade, porém, apresenta novos parâmetros relacionados à atmosfera, como a temperatura Rankine do ar e a pressão de vapor. A pressão de vapor, P , pode ser considerada entre 1 e 10 mm de mercúrio (GEIGER, 1959).

$$Q_a = \sigma T_{airR}^4 [G - J(10^{-\rho P})] \left(1 - N \frac{100 - S}{100}\right) \quad (33)$$

Onde:

Q_a : quantidade de radiação de ondas longas reemitida pela atmosfera (Btu/ft²-h);

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($0,172 \times 10^{-8}$ Btu-h-ft²-R⁴);

T_{airR} : temperatura Rankine do ar (°R);

G , J e ρ : constantes de Geiger (respectivamente 0,77, 0,28 e 0,074);

N: fator de base de nuvem;

S: possível luz solar diária (%).

O último termo do balanço de energia equivale à transferência de calor por convecção, Q_c , entre a superfície do pavimento e o ar. O seu valor numérico para uma unidade de área é descrito conforme a equação 34.

$$Q_c = H(T_{air} - T_1) \quad (34)$$

Onde:

Q_c : fluxo de calor por convecção (Btu/ft²-h);

H: coeficiente de convecção;

T_{air} : temperatura do ar (F);

T_1 : temperatura do nó de superfície (F).

O coeficiente de convecção é descrito por Vehrencamp (1953) conforme a equação 35. Vale notar que este é um coeficiente de difícil determinação, dependente de muitas variáveis, e que, para o ano de desenvolvimento da metodologia, não possuía referências específicas para pavimentos. Portanto, a equação de Vehrencamp foi a solução adotada, tendo caráter empírico e desenvolvida a partir de dados de um grande lago seco.

$$H = 122,93 \left[0,00144 \left(273 + \frac{V_1 + V_{air}}{2} \right)^{0,3} U^{0,7} + 0,00097 (V_1 + V_{air})^{0,3} \right] \quad (35)$$

Onde:

H: coeficiente de convecção;

V_{air} : temperatura do ar (F);

V_1 : temperatura do nó de superfície (F);

U: velocidade média diária do vento (m/s);

Com isso se encerram as equações que descrevem os parâmetros meteorológicos de influência na temperatura do pavimento. A partir de seus resultados, é possível estimar a temperatura do nó de superfície do sistema de pavimento composto por elementos finitos por meio da equação 10, apresentada no capítulo 2.4.2 .

2.5 Propriedades dos materiais

Para a maioria das metodologias de previsão de temperatura em pavimentos flexíveis, é necessário o conhecimento das principais propriedades térmicas dos materiais que compõem o pavimento e do solo sobre o qual este está localizado. No caso do modelo proposto por Dempsey (1969), as duas principais propriedades térmicas são a capacidade e a condutividade térmica, sendo a segunda dependente da massa específica do material.

Para uma superfície de concreto betuminoso, Dempsey (1969) apresentou uma revisão bibliográfica com diversos autores que propuseram valores para ambas propriedades. A maioria das referências estima um valor de condutividade térmica entre 0,54 e 0,86 Btu/h-ft-F, mas há registros de até 2,0 Btu/h-ft-F, e para a capacidade térmica entre 0,20 e 0,25 Btu/lb-ft. A condutividade térmica apresenta uma maior variação de autor para autor, diferente da capacidade, que se mantém em valores por volta de 0,22 Btu/lb-ft independente do pavimento analisado.

A grande variedade de resultados para a condutividade térmica pode ser explicada pela dependência de diversos fatores, tais como a massa específica, o tipo de agregado, a quantidade de água e a temperatura do pavimento. Sendo assim, o ideal é a realização de ensaios laboratoriais para a determinação deste parâmetro. Porém, sabe-se que quanto maior a temperatura, menor é a condutividade térmica; o contrário é válido para a umidade do concreto, onde maiores valores apresentam maior condutividade.

Para Dempsey, asfaltos com agregado e umidade comumente observados em projetos de rodovias apresentam valores de condutividade térmica entre 0,70 e 1,0 Btu/h-ft-F. Enquanto que Kersten (1949) sugere o valor de 0,86 Btu/h-ft-F para um típico pavimento dos Estados Unidos submetidos a uma temperatura de 4 °C.

Com relação aos materiais de base, sub-base e subleito, Kersten (1949) propôs a equação 36 para a estimativa da capacidade térmica de misturas solo-água. Outros autores propõem equações similares, havendo, porém, um descontentamento em relação ao valor da capacidade térmica do material seco, C_m . Para Kersten (1949), os valores de C_m partem de 0,16 Btu/lb-F para solos a uma temperatura de aproximadamente -18°C até um valor de 0,19 Btu/lb-F para uma temperatura de 38°C . Para Johnson (1952) e Jumikis (1966), os valores de capacidade térmica para solos, minerais e pedras variam muito pouco, sendo uma boa aproximação o valor de 0,20 Btu/lb-F.

$$C = \frac{100C_m + w}{100 + w} \quad (36)$$

Onde:

C: capacidade térmica (Btu/lb-ft);

C_m : capacidade térmica do material seco (Btu/lb-ft);

w: teor de água com base no peso seco (%).

Ainda sobre os materiais abaixo da superfície, Kersten (1949) propôs duas equações para a estimativa da condutividade térmica. A equação 37 é válida para solos de baixa granulometria, compostos por 50% ou mais de silte e argila, enquanto que solos com menos de 50%, definidos como grossa granulometria, são descritos pela equação 38.

$$k = \frac{(0,9 \log(w) - 0,2)10^{0,01\gamma_d}}{12} \quad (37)$$

$$k = \frac{(0,7 \log(w) - 0,4)10^{0,01\gamma_d}}{12} \quad (38)$$

Onde:

k: condutividade térmica (Btu/h-ft-F);

w: teor de água com base no peso seco (%);

γ_d : peso seco (pcf).

As equações de Kersten (1949) foram desenvolvidas com base empírica a partir de um estudo laboratorial com um grande número de solos. Neste estudo, Kersten observou que a condutividade térmica, na maioria dos solos com temperatura entre 4° C e 21° C, tende a aumentar com um aumento na temperatura. Ademais, a condutividade térmica se mostrou dependente do teor de água do solo, onde um aumento na umidade provoca uma condutividade com valores mais elevados, sendo esta afirmação válida para teores de umidade abaixo de 6% para solos arenosos e abaixo de 10% para argilosos/siltosos.

Kersten (1949) também demonstrou que a condutividade térmica dos solos, além dos fatores mencionados acima, depende da composição mineralógica, textura e densidade. Conforme o seu estudo, a condutividade térmica dos solos aumenta:

- ◆ Quanto maior teor de quartzo;
- ◆ Quanto menor o teor de argilominerais;
- ◆ Quanto maior a densidade;
- ◆ Quanto maior o tamanho das partículas; e
- ◆ Com partículas angulosas, em oposição às redondas.

3 METODOLOGIA

3.1 Aplicativo computacional

O aplicativo computacional proposto por este trabalho foi denominado de *PavHeat* e possui a capacidade de coletar dados climáticos de servidores *online* para aplicá-los em uma rotina de cálculos de um modelo de transferência de calor para pavimentos flexíveis. O aplicativo foi dividido em três módulos de utilização que podem ser acessados a partir do seu menu inicial:

- ◆ *Download* de dados climáticos;
- ◆ *Heat Transfer Model*; e
- ◆ Resultados.

O primeiro módulo permite o *download* dos dados climáticos diretamente pelo aplicativo, eliminando a necessidade de medidas em campo, ou o trabalho de busca por séries históricas. O segundo módulo é utilizado para a entrada dos dados relativos à localidade e ao pavimento em análise; este módulo também executa a rotina de cálculos do modelo de transferência de calor e armazena os resultados no computador utilizado. O terceiro módulo serve para a observação gráfica dos resultados obtidos, além de permitir que estes sejam exportados para tabelas externas ao aplicativo.

Para o desenvolvimento do código do *software*, foi utilizada a linguagem de programação *GameMaker Language* – GML, de autoria da empresa britânica *YoYo Games*, que possui um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*Integrated Development Environment* – IDE), denominado de *Game Maker Studio 2* – GMS2, que simplifica o processo de desenvolvimento e testes do código. “*O GameMaker é uma ferramenta de desenvolvimento completa para a criação de jogos 2D, utilizada por desenvolvedores de jogos indie, estúdios profissionais e educadores em todo o mundo*” (GAME MAKER, 1999).

Apesar de o GMS2 ser um *software* criado para o desenvolvimento de jogos, foi possível sua utilização para o desenvolvimento de um aplicativo para engenharia. Porém, existem certas limitações na linguagem para determinadas funcionalidades, portanto, utilizou-se como linguagem complementar o *Python 3.11*. “*Python é uma linguagem de programação que permite*

que você trabalhe com mais rapidez e integre seus sistemas com mais eficiência” (PYTHON, 1991).

Os códigos desenvolvidos em *Python* foram compilados em arquivos executáveis que devem ser mantidos no diretório “\AppData\Local\PavHeat” para que, através de uma Biblioteca de Vínculo Dinâmico (*Dynamic-link library* – DLL), o código do GMS2 seja capaz de localizá-los e executá-los, desta forma promovendo a integração de ambas linguagens. Vale ressaltar que, apesar de os arquivos gerados no *Python* serem acessados internamente pelo *software*, estes não precisam que o aplicativo esteja aberto para seu funcionamento, visto que uma vez executados, o código será lido de forma independente em segundo plano.

Com relação às principais limitações do aplicativo, o número máximo de materiais diferentes que podem ser utilizados para a modelagem do perfil de pavimento é de oito, e os dados climáticos não podem conter temperaturas negativas. Em contrapartida, não há limitações em relação ao período máximo ou mínimo a ser simulado, sendo recomendado o período de 1 ano.

3.1.1 Módulo 1 – API MERRA 2

O primeiro módulo do aplicativo foi desenvolvido com a finalidade de facilitar o acesso e a obtenção dos dados climáticos necessários para a aplicação da metodologia de transferência de calor proposta. A metodologia exige que sejam fornecidos dados com resolução temporal horária de temperatura do ar, velocidade do vento e cobertura de nuvens. Para tanto, optou-se pela utilização dos dados fornecidos pela segunda versão do *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (MERRA-2).

O MERRA-2 é um projeto que fornece gratuitamente dados atmosféricos gerenciados pelo Centro de Serviços de Dados e Informações (*Data and Information Services Center* – DISC), da NASA *Goddard Earth Sciences* – GES. Os dados são fornecidos a partir do ano de 1980, com resolução espacial de aproximadamente 50 km para todo o globo terrestre, e resolução temporal variável de uma hora a um mês, a depender do subproduto de interesse (NASA, 2022). Segundo Bosilovich et al. (2015), estes dados são gerados a partir de uma análise retrospectiva, ou reanálise, que possibilita a integração de dados de satélite com observações meteorológicas convencionais, resultando em um modelo com dados atmosféricos contínuos no espaço e no tempo.

O acesso e o *download* de dados do MERRA-2 podem ser feitos diretamente pelo *site* do Escritório Global de Modelagem e Assimilação (*Global Modeling and Assimilation Office – GMAO*). Porém, levando em consideração que o objetivo principal do primeiro módulo do *PavHeat* é a simplificação da obtenção destes dados, uma segunda forma de acesso é através da Interface de Programação de Aplicação (*Application Programming Interface – API*) fornecida pela NASA GES DISC. Uma API é um conjunto de protocolos, ferramentas e rotinas que permitem que aplicativos de diferentes *softwares* se comuniquem entre si, neste caso possibilitando que os dados da NASA sejam obtidos a partir do código interno do aplicativo.

A API fornece os arquivos de todas as variáveis desejadas de um determinado subproduto do MERRA-2; a lista completa de subprodutos e suas respectivas variáveis pode ser obtida através da documentação fornecida pela NASA (GES DISC, 2021). O código relacionado à API foi desenvolvido em Python, conforme instruções apresentadas pela seção de ajuda do GES DISC (GES DISC, a), e possui uma rotina que pode ser dividida em 10 etapas, conforme descritas a seguir:

1. Importar as bibliotecas do *Python* necessárias;
2. Inicializar a biblioteca “*urllib*” para lidar com a abertura de URLs e definir o URL base das solicitações para a API <<https://disc.gsfc.nasa.gov/service/subset/jsonwsp>>;
3. Definir uma função para enviar todas as solicitações pelo Protocolo de Serviço da Web (Web Service Protocol – WSP) que utiliza a Notação de Objeto em *JavaScript* (*JavaScript Object Notation – JSON*) para a descrição dos serviços, solicitações e respostas (JSON-WSP);
4. Definir variáveis contendo o nome do subproduto desejado, as variáveis fornecidas pelo subproduto, a localidade (latitude e longitude) e a data dos dados desejados;
5. Armazenar as variáveis do item 4 em uma estrutura JSON-WSP;
6. Enviar a estrutura JSON-WSP do item 5, através da função definida no item 3, para o servidor GES DISC. A resposta da solicitação será um número denominado de *Job ID*;
7. Construir uma segunda estrutura JSON-WSP contendo o *Job ID* para monitorar o *status* da solicitação por meio da função definida no item 3. O *status* deve ser verificado periodicamente e será alterado de “aceito” para “executando” para “100% concluído”. A próxima etapa deverá ser executada somente após a verificação do *status* “100% concluído”;

8. Construir uma terceira estrutura JSON-WSP para recuperar os URLs contendo os dados de cada dia solicitado e os links de suas documentações;
9. Separar a lista de URLs obtida no item 8 em duas novas listas: uma apenas com URLs de dados e outra apenas com os URLs das documentações;
10. Utilizar a biblioteca “*requests*” para submeter os URLs e obter os arquivos de dados em formato netCDF4. Nesta etapa devem ser fornecidos o nome de usuário e senha cadastrados no site do *Earthdata*.

O fluxograma do código que lida com as solicitações da API e com o processamento dos dados obtidos é apresentado no Apêndice A.

Todas as etapas descritas acima estão integradas no arquivo “API.exe”, desenvolvido em *Python*, e ocorrem automaticamente ao pressionar o botão “baixar” do primeiro módulo do aplicativo, após o preenchimento de todas as informações necessárias para a solicitação. As informações são preenchidas diretamente em caixas de texto no aplicativo e consistem em: nome de usuário e senha cadastrados no *Earthdata* e vinculados ao GES DISC, nome de identificação dos dados, latitude e longitude, em graus, da localidade desejada e data inicial e final do período para o qual os dados serão baixados (colocar a mesma data caso se deseje apenas um dia de dados).

Conforme mencionado anteriormente, o MERRA-2 fornece dados com resolução espacial de aproximadamente 50 km. Isso significa que o globo terrestre foi dividido em células quadradas de aproximadamente 2500 km², e que os dados fornecidos são uma média para o ponto central destas células. Ao fornecer a latitude e longitude, o aplicativo identifica qual a coordenada central da célula do MERRA-2 em que as coordenadas especificadas estão inseridas e faz a solicitação da API para o ponto correto.

O cadastro no *Earthdata* deve ser feito diretamente pelo *site* (GES DISC, c). A conta registrada deve ser vinculada ao GES DISC conforme instruções do *site* (GES DISC, b). O vínculo deve ser realizado antes da utilização da API, garantindo o seu funcionamento. O nome de usuário e senha devem ser inseridos pelo menos uma vez no *PavHeat*, onde serão criptografados a partir de criptografia RSA com chaves de 1024 bits e salvos localmente no computador para futuras chamadas da API.

Por padrão, o aplicativo fará uma solicitação dos dados de temperatura do ar, velocidade do vento na direção norte e velocidade do vento na direção oeste para uma altura de 2 m da su-

perície terrestre (respectivamente variáveis T2M, V2M e U2M) do subproduto do MERRA-2 “M2T1NXSLV_5.12.4” (GMAO, 2015a), e da cobertura de nuvens (CLDTOT) do subproduto “M2T1NXRAD_5.12.4” (GMAO, 2015b). Os horários dos resultados serão fornecidos de acordo com o fuso horário calculado a partir do relógio do computador.

O fuso horário, os subprodutos e suas variáveis podem ser alterados ao selecionar a opção “avançado” no canto superior direito da tela. Vale ressaltar que essa opção deve ser utilizada com cautela, respeitando os nomes fornecidos pela documentação (GES DISC, 2021). Além disso, deve-se sempre ter em mente que as variáveis 1, 2, 3 e 4 precisam necessariamente ser de temperatura do ar (*Kelvin*), velocidade do vento em uma direção (m/s), velocidade do vento na direção ortogonal à primeira (m/s) e cobertura de nuvens (decimal), pois o aplicativo converterá os valores da variável 1 para *Fahrenheit*, fará a soma vetorial das variáveis 2 e 3, e subtrairá o valor da variável 4 do número decimal 1, de forma a encontrar a porcentagem da possível luz solar diária. Todos estes valores são armazenados separadamente em arquivos de texto no diretório “*AppData\Local\PavHeat*”.

Evidencia-se que o aplicativo utiliza apenas dados climáticos fornecidos pelo projeto MERRA-2. Para este trabalho, considerou-se que esses dados possuem alta confiabilidade. No entanto, na prática, entende-se que eles possuem um pequeno erro devido à própria natureza de sua construção, que é baseada em ferramentas de reanálise. Faccin et al. (2022) compararam os dados históricos de temperatura do ar do MERRA-2 com os observados em estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET no Rio Grande do Sul, onde foi observado que o MERRA-2, de maneira geral, subestima os valores de temperatura do ar (erros médios menores que 0,9 °C), indicando a necessidade de possíveis ajustes.

3.1.2 Módulo 2 – Modelo de transferência de calor

O segundo módulo do aplicativo foi desenvolvido para a direta aplicação da metodologia de transferência de calor. Conforme apresentado anteriormente, a metodologia adotada consiste naquela fornecida por Dempsey, em sua tese de doutorado publicada em 1969 na Universidade de Ilínois. Este módulo permite a entrada de dados gerais para a simulação, dados sobre o perfil de pavimento a ser analisado e dados climáticos (fornecidos pelo módulo 1), para então simular a temperatura ao longo do perfil de pavimento para o período escolhido.

As equações 10 a 35 são utilizadas pelo código do aplicativo, e estão descritas nos capítulos 2.4.2 e 2.4.3. Essas equações possibilitam a estimativa da temperatura para nós de superfície, normais, de interface e de terminação, levando em consideração o material que os compõem e a altura do nó (resolução espacial), e são aplicadas pelo *software* para cada nó a cada incremento no passo de tempo (resolução temporal).

O fluxograma do código principal do aplicativo, que descreve as etapas de cálculo do modelo de transferência de calor, pode ser visualizado no Apêndice B.

O módulo 2 possui três janelas principais para a entrada de dados, denominadas de “dados gerais”, “perfil do pavimento” e “dados climáticos”. A janela dos dados gerais (Figura 3) é composta por sete caixas de texto utilizadas para definir os parâmetros relacionados à simulação. Cada parâmetro é descrito a seguir:

- ◆ **ID do pavimento:** identificação do pavimento a ser simulado. Este será o nome do arquivo contendo os resultados;
- ◆ **Latitude:** equivalente a latitude em graus de um ponto qualquer do pavimento em estudo. Será utilizada para o cálculo da declinação solar na estimativa da radiação solar extraterrestre;
- ◆ **Altura do nó:** fornecida em centímetros, equivale à resolução espacial desejada. Quanto menor a altura do nó, mais estáveis serão as equações e mais precisos serão os resultados, porém, será demandado um maior tempo de processamento. **Importante:** a altura do nó deve ser um divisor comum da altura total de cada uma das camadas do pavimento, permitindo a divisão exata em um sistema de pavimento por diferenças finitas, conforme descrito no capítulo 2.4.1 ;
- ◆ **Altura total:** equivalente à variável Y em centímetros apresentada na Figura 2. Será utilizada para calcular a altura dos nós de terminação e define a profundidade do ponto de temperatura constante. **Importante:** este valor deve ser equivalente a soma da altura de todas as camadas do pavimento, descritas na janela “perfil do pavimento”;
- ◆ **Time step:** passo de tempo em horas, equivale à resolução temporal desejada. **Importante:** deve ser um divisor inteiro de uma hora (ex.: 0,5, 0,25, 0,125, 0,0625...). Valor recomendado de 0,125 h (7,5 minutos) para um período de simulação de 1 ano.
- ◆ **Horário 1 e 2:** identificam os horários em que serão apresentados os resultados da simulação. Caso a opção “intervalo entre horários” esteja desmarcada, os resultados se-

rão fornecidos apenas para os horários solicitados (não é necessário preencher ambos horários). Caso a opção esteja marcada, serão fornecidos resultados de hora em hora para todo o intervalo entre os dois horários fornecidos.

Figura 3: Janela de dados gerais – Módulo 1 (PavHeat).

— Dados gerais —

ID do pavimento

Latitude (graus)

Altura do nó (cm)

Altura total (cm)

Time step (h)

Horário 1

Horário 2

Intervalo entre horários

(fonte: elaboração própria)

A janela “perfil do pavimento” (Figura 4) permite a modelagem das camadas do pavimento em estudo. Esta seção conta com sete caixas de texto para a entrada de dados, um menu *drop-down*, um botão de salvar, um quadro de visualização e um botão de adicionar. As caixas de

texto descrevem a características das camadas do pavimento, e, portanto, devem ser preenchidas para cada camada modelada. Cada um dos itens apresentados é descrito a seguir:

- ◆ **Botão “adicionar”:** adiciona um cartão identificador da camada modelada no quadro de visualizações e limpa os valores preenchidos nas caixas de texto. Este botão só é habilitado a partir do momento em que todos os dados necessários para descrever a camada forem preenchidos;
- ◆ **Nome do perfil:** identificação do perfil modelado. Será o nome do arquivo caso este seja salvo no botão laranja em forma de disquete;
- ◆ **Material:** identificação do material da camada que será adicionada. Este nome será exibido na representação gráfica do perfil nos resultados;
- ◆ **Espessura:** altura total da camada do pavimento em centímetros. **Importante:** este valor apresenta relação direta com a altura do nó e a altura total descritas na janela “dados gerais”;
- ◆ **Massa específica:** dada em kg/m^3 para o material da camada que está sendo especificada;
- ◆ **Capacidade térmica:** dada em Btu/lb-F para o material da camada que está sendo especificada;
- ◆ **Condutividade térmica:** dada em Btu/h-ft-F para o material da camada que está sendo especificada;
- ◆ **Água:** porcentagem de água baseada no peso específico seco para o material da camada que está sendo especificada;
- ◆ **Menu dropdown:** contém a lista de perfis salvos de acordo com a identificação especificada no campo “nome do perfil”;
- ◆ **Quadro de visualizações:** apresenta a lista de camadas de um determinado perfil de pavimento. A primeira camada exibida equivale à camada de superfície (normalmente o revestimento de concreto asfáltico), a seguinte encontra-se imediatamente abaixo e assim por diante. Através dos botões na lateral direita dos cartões identificadores, é possível alterar a ordem ou deletar camadas.

Vale destacar que as variáveis de capacidade e condutividade térmica não estão no mesmo sistema de unidades das demais variáveis. Essa diferença é justificada pela maior quantidade de referências internacionais em relação a valores padrões para estes dois parâmetros, facilitando o preenchimento dos dados. Versões futuras do aplicativo visam padronizar todas as unidades para o sistema métrico, com valores padrões sugeridos nas unidades mais comumente utilizadas no Brasil.

Figura 4: Janela de dados do perfil do pavimento – Módulo 1 (PavHeat).

– Perfil do Pavimento

Nome do perfil

Arquivo

Material

Espessura (cm)

M. Específica (kg/m³)

Cap. Térm. (Btu/lb °F)

Con. Térm. (Btu/h.ft. °F)

Água (%)

ADICIONAR

(fonte: elaboração própria)

A janela “dados climáticos” (Figura 5) permite que o usuário selecione, a partir de um menu *dropdown*, um dos conjuntos de dados baixados no primeiro módulo. Alternativamente, o

aplicativo também aceita a entrada de arquivos do tipo *Hourly Climatic Database* (*.HCD), fornecidos pelo Programa de Desempenho de Pavimentos de Longo Prazo (*Long-Term Pavement Performance* – LTPP), os quais podem ser selecionados por meio do botão laranja em forma de arquivo.

As datas inicial e final determinarão para qual período a simulação será realizada, e devem estar contidas no arquivo de dados climáticos selecionado. É recomendado que o período indicado seja de pelo menos 1 ano, pois a temperatura do nó de temperatura constante é determinada a partir de uma média dos valores de temperatura do ar fornecidos pelo período de dados climáticos escolhidos, portanto, para que esta média seja significativa e esteja próxima da temperatura real do solo, o ideal é que estejam contidas todas as estações do ano.

Ao pressionar o botão “carregar”, o arquivo de dados climáticos selecionado será lido, e seus valores serão armazenados em variáveis internas. Este processo, em geral, é instantâneo para arquivos baixados a partir do módulo 1, enquanto que pode levar alguns minutos para processar arquivos HCD, sendo o *status* do processo exibido logo acima do botão “carregar”.

Figura 5: Janela de dados climáticos – Módulo 1 (PavHeat).

— Dados Climáticos —

Arquivo

Data inicial

Data final

Sem dados

CARREGAR

(fonte: elaboração própria)

Todas as equações para a determinação da temperatura em um determinado nó do pavimento, após um passo de tempo, dependem da temperatura atual do nó. Sendo assim, para que a simulação seja iniciada, primeiro é necessário que seja fornecida uma temperatura inicial para cada um dos nós do perfil. Para evitar que o usuário tenha que estimar um perfil de temperatura inicial, o aplicativo considera todos os nós com temperatura equivalente ao nó de temperatura constante. Desta forma, os primeiros resultados fornecidos podem ainda não ter convergido para as temperaturas corretas, sendo recomendado descartar pelo menos os primeiros 20 dias simulados.

Por fim, o botão de configurações no canto superior direito do módulo 2 permite que sejam alteradas variáveis importantes para o modelo, tais como a absorvidade e emissividade do pavimento, o fator de base de nuvem e a pressão de vapor d'água em milímetros de mercúrio.

3.1.3 Módulo 3 – Leitura dos resultados

O terceiro módulo do aplicativo é dedicado exclusivamente para a leitura e obtenção dos resultados produzidos pelo modelo de transferência de calor do módulo 2. A visualização dos dados pode ser feita diretamente pelo aplicativo, basta selecionar alguma data e alguma hora do período simulado, para que uma representação gráfica do pavimento seja exibida na tela. Na lateral direita são apresentados os resultados de temperatura, em graus Celsius, para cada nó da estrutura. Além disso, os nós são coloridos em uma escala de vermelho para os pontos mais quentes e amarelo para os mais frios, facilitando a compreensão da variação de temperatura.

Neste módulo também é possível exportar os resultados para planilhas digitais (*.xlsx), de modo a facilitar a análise dos dados e manipulá-los matematicamente. As planilhas são geradas com o nome fornecido para o arquivo no módulo 2, e são estruturadas de forma que cada linha representa uma das datas simuladas e cada coluna representa um nó do perfil modelado.

3.2 Validação do aplicativo

Este capítulo descreve a metodologia de validação do aplicativo através de uma aplicação prática comparada com dados de campo coletados em estudos anteriores. Colpo (2019) realizou uma coleta de dados de temperatura do pavimento da BR-116 no km 298+560, entre as cidades de Guaíba e Porto Alegre, localizadas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. As medições foram realizadas a uma profundidade de 10 cm, na interface entre a camada de revestimento asfáltico e a base de brita graduada simples, e apresentam frequência horária a partir das 15:00 do dia 30 de setembro às 00:00 do dia 03 de outubro do ano de 2016.

Sendo assim, o pavimento da BR-116 serviu como objeto de análise na aplicação prática do aplicativo *PavHeat*. Os materiais componentes do seu perfil foram modelados e a simulação foi executada para todo o ano de 2016, sendo analisados os resultados para o período coincidente com as medições de campo efetuadas por Colpo (2019).

3.2.1 Dados climáticos

Os dados climáticos utilizados foram obtidos através da API da segunda versão do *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications* (MERRA-2) integrada ao primeiro módulo do *PavHeat*. Por padrão, o aplicativo realiza o *download* de dados do subproduto “M2T1NXSLV_5.12.4” (GMAO, 2015a) das variáveis de temperatura do ar, velocidade do vento na direção norte e velocidade do vento na direção oeste para uma altura de 2 m da superfície terrestre, e do subproduto “M2T1NXRAD_5.12.4” (GMAO, 2015b) da variável de cobertura de nuvens. Porém, é possível alterar as variáveis desejadas a partir do modo avançado de *download*. Portanto, foram baixados os dados de três conjuntos de dados diferentes, com o objetivo de verificar quais variáveis do MERRA-2 mais se aproximam dos resultados observados em campo. Os conjuntos escolhidos são descritos a seguir:

Conjunto 1 (BR-116_a):

- a) Subproduto M2T1NXSLV_5.12.4 (GMAO, 2015a):
 - T2M: temperatura do ar a 2 m da superfície;
 - V2M: velocidade do vento na direção norte a 2 m da superfície;
 - U2M: velocidade do vento na direção oeste a 2 m da superfície.
- b) Subproduto M2T1NXRAD_5.12.4 (GMAO, 2015b):
 - CLDTOT: cobertura de nuvens.

Conjunto 2 (BR-116_b):

- a) Subproduto M2T1NXSLV_5.12.4 (GMAO, 2015a):
 - T10M: temperatura do ar a 10 m da superfície;
 - V10M: velocidade do vento na direção norte a 10 m da superfície;
 - U10M: velocidade do vento na direção oeste a 10 m da superfície.
- b) Subproduto M2T1NXRAD_5.12.4 (GMAO, 2015b):
 - CLDTOT: cobertura de nuvens.

Conjunto 3 (BR-116_c):

- c) Subproduto M2T1NXSLV_5.12.4 (GMAO, 2015a):
 - T10M: temperatura do ar a 10 m da superfície;
 - V50M: velocidade do vento na direção norte a 50 m da superfície;
 - U50M: velocidade do vento na direção oeste a 50 m da superfície.
- d) Subproduto M2T1NXRAD_5.12.4 (GMAO, 2015b):
 - CLDTOT: cobertura de nuvens.

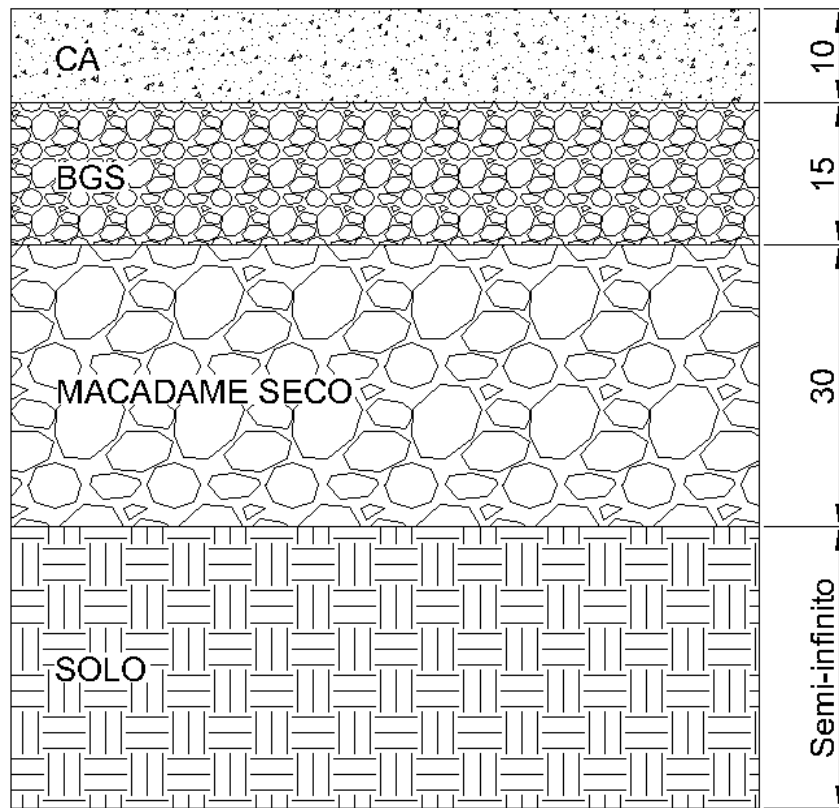
O *download* dos dados foi realizado para o período de um ano, de 01/01/2016 a 31/12/2016, para cada um dos conjuntos descritos. Foi considerado a localização do ponto analisado da rodovia, com uma latitude de $-30,10^\circ$ e uma longitude de $-51,34^\circ$. A célula do conjunto de dados do MERRA-2 que contém este ponto é uma área de 50x50 km, identificada pelo número "63567", com as coordenadas do ponto central de $-30,00^\circ$ e $-51,25^\circ$ para latitude e longitude, respectivamente.

É importante salientar que as simulações são realizadas para conjuntos específicos de dados climáticos, e, portanto, foram realizadas um total de três simulações para o mesmo pavimento. Todas compartilham os mesmos dados gerais, mas diferem no conjunto de dados climáticos utilizados, a fim de realizar a análise comparativa entre os resultados.

3.2.2 Perfil do pavimento

Conforme descrito por Colpo (2019), a Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre S/A – Concepa executou o pavimento da BR-116 com uma camada de revestimento de concreto asfáltico (CA) de 10 cm, uma base de brita graduada simples (BGS) de 15 cm e uma sub-base de macadame seco (MS) de 30 cm, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6: Perfil de pavimento BR-116.



(fonte: elaboração própria)

Para modelar as camadas no software, além da geometria, é necessário conhecer a massa específica, γ_d , a condutividade térmica, K_u , e a capacidade térmica, C_u , dos materiais. Essas não são informações fornecidas e, portanto, foram estimadas com base na literatura. A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores utilizados:

Tabela 2: Propriedades dos materiais.

Material	Massa específica, γ_d [kg/m ³]	Condutividade térmica, K_u [Btu/h-ft-F]	Capacidade térmica, C_u [Btu/lb-F]
Concreto asfáltico (CA)	2371	0,700	0,220
Brita graduada simples (BGS)	2131	1,926	0,250
Macadame seco (MS)	2025	1,535	0,237
Solo	1762	0,952	0,299

(fonte: elaboração própria)

Para a camada de concreto asfáltico, utilizou-se valores padrão, conforme sugerido por Dempsey (1969). Para as demais camadas, os valores da massa específica também foram estimados com base em valores comumente observados na literatura. Com relação à capacidade térmica, esta foi obtida a partir da equação 36, apresentada no capítulo 2.5, utilizando a capacidade térmica do material seco, C_m , de 0,18 Btu/lb-F, conforme proposto por Kersten (1949) para temperaturas mais elevadas. A condutividade térmica também foi estimada por equações desenvolvidas por Kersten (1949), sendo elas as equações 37 e 38 utilizadas respectivamente para solos de grãos finos e grossos.

Para a base de BGS foi considerada uma umidade de 9,4%, conforme sugerido por Dempsey (1969) para um material de classificação AASHTO A-1-b (0). A capacidade térmica foi estimada pela equação 36. O material é considerado de grossa granulometria e, portanto, utilizou-se a equação 38 para a estimativa da condutividade térmica.

Para o macadame seco foi considerada uma umidade de 7,5%, obtido através do banco de dados do *software* MeDiNa para o material denominado de “Brita Graduada – Gnaisse C6”, que, segundo Chiarello et al. (2019), possui semelhanças com o macadame seco e pode ser utilizado na falta de valores específicos do material. A capacidade e condutividade térmica foram calculadas respectivamente pelas equações 36 e 38.

A camada semi-infinita de solo foi modelada com uma espessura de 4,45 m, de forma que todo o perfil de solo apresentasse uma altura total de 5 m, considerada como a profundidade de temperatura constante para este estudo. Bressani et al. (2009) apresentaram um perfil de sondagem SPT para a BR-116 no km 293, distante 5,5 km do ponto analisado neste trabalho; os resultados demonstram que, para uma camada de até 5 m de profundidade, o solo é composto basicamente por uma argila arenosa de consistência mole. Dessa forma, utilizou-se um γ_d com 17% de umidade, conforme sugerido por Dempsey (1969) para um solo argiloso de classificação AASHTO A-6. A capacidade térmica foi calculada a partir da equação 36 e a condutividade térmica para solos de granulometria fina a partir da equação 37.

3.2.3 Dados gerais da simulação

Em relação às características gerais necessárias para iniciar a simulação no *PavHeat*, a latitude informada, correspondente ao ponto exato das medições em campo, equivale a -30.097904° , utilizada pelo *software* para calcular a radiação extraterrestre incidente.

A resolução espacial adotada foi uma altura de 5 cm para cada nó normal, totalizando em 5 m para todo o perfil de pavimento. Desta forma, o aplicativo divide o perfil em 1 nó de superfície, de 2,5 cm de altura, 3 nós de interface e 47 nós normais com 5 cm cada, e 3 nós de terminação com 82,5 cm cada. Para a resolução temporal foi adotado um passo de tempo de 0,125 h, equivalente a 7 minutos e 30 segundos, resultando em 70272 passos decorridos para o ano bissexto de 2016, e garantindo a estabilidade matemática das equações.

Os valores da emissividade e do fator de base de nuvem foram utilizados conforme sugerido por Dempsey (1969) e equivalem respectivamente a 0,93, 0,85. Ademais, Scott (1964) sugere que a absorvidade do concreto betuminoso varia entre 0,85 e 0,90, portanto, o valor adotado foi de 0,90 para pavimento da BR-116.

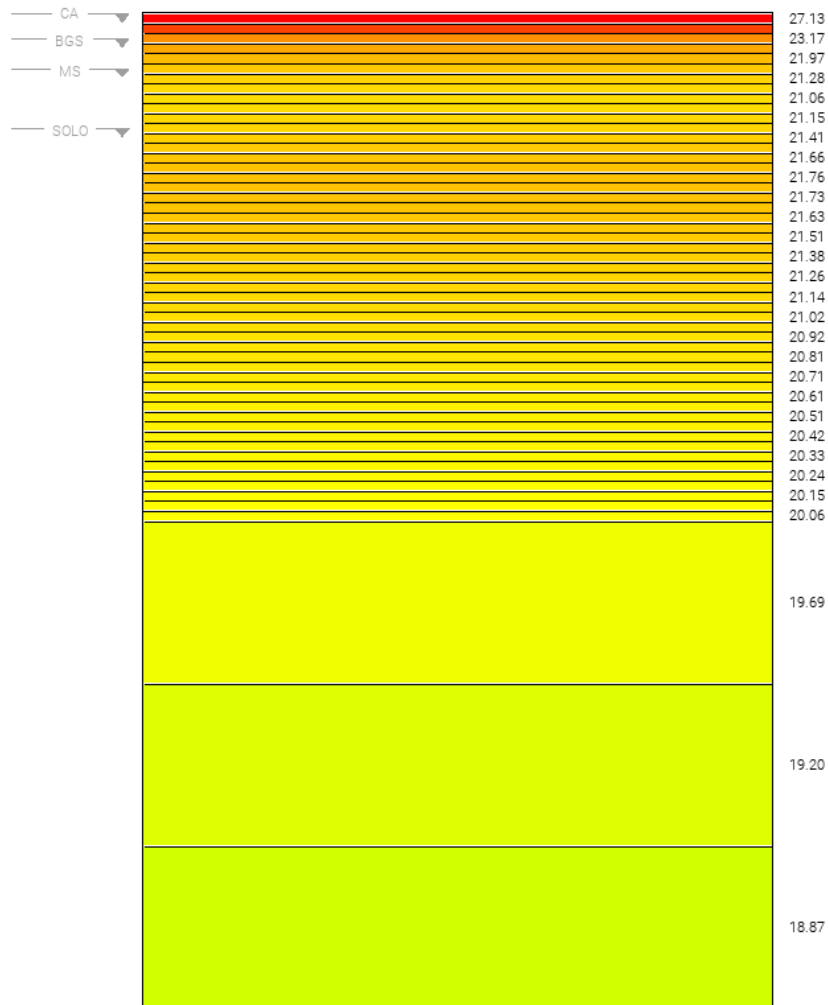
O valor da pressão d'água varia de acordo a temperatura a qual o líquido está submetido. Para o ano de 2016, a temperatura média do ar foi de 18,6 °C, resultando em uma pressão de vapor d'água de aproximadamente 16 mmHg.

Por fim, a simulação foi executada do dia 01 de janeiro de 2016 até o dia 31 de dezembro de 2016, sendo registrados resultados com frequência horária para o período de 24 horas de cada dia simulado.

4 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados fornecidos pela simulação do pavimento da BR-116 km 298+560, por meio do aplicativo *PavHeat*, para o período entre o dia 30 de setembro e 02 de outubro do ano de 2016. O módulo de resultados permite que sejam selecionados o dia, mês, ano e horário para os quais deseja-se observar os resultados. Os resultados são fornecidos de forma gráfica, conforme o exemplo apresentado na Figura 7, com nós coloridos em uma escala de vermelho para as regiões mais quentes e amarelo para as regiões mais frias. Na esquerda observa-se as marcas indicativas do início de cada camada, e na direita estão os valores de temperatura, em graus Celsius, correspondentes de cada nó.

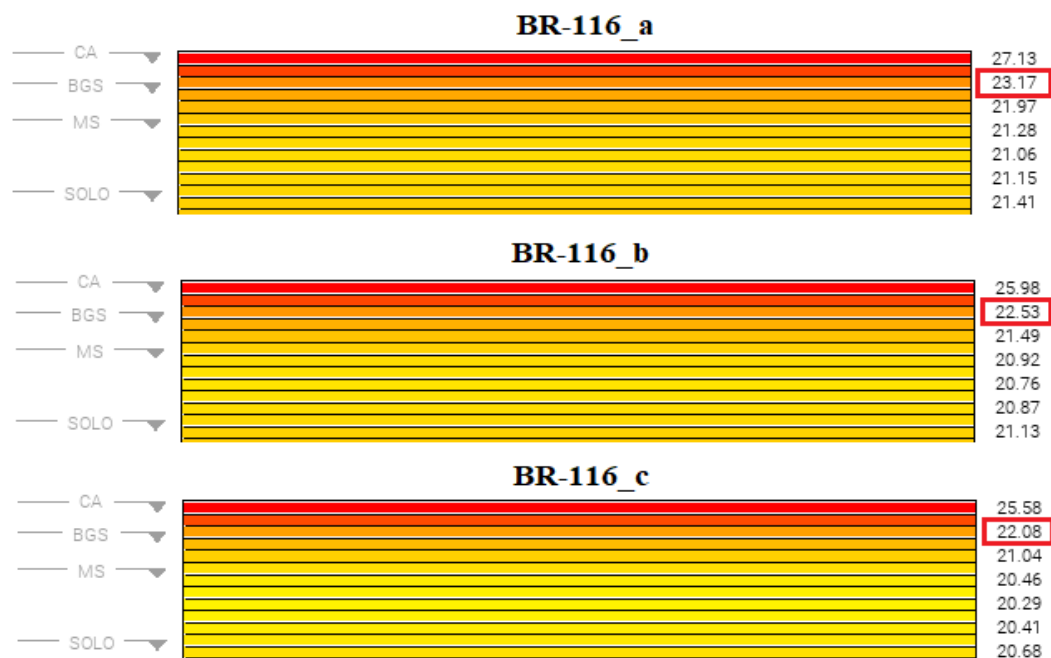
Figura 7: Perfil de temperatura BR-116 para o dia 30/09/2016 às 15:00.



(fonte: elaboração própria)

As medições em campo, realizadas por Colpo (2019), correspondem a uma profundidade de 10 cm da superfície. Portanto, os resultados de interesse são as temperaturas obtidas para o terceiro nó do perfil (1º nó: 2,5 cm, 2º nó: 5 cm, centro do 3º nó: 2,5 cm, totalizando uma profundidade de 10 cm), no ponto central, onde ocorre a interface da camada de concreto asfáltico com a de brita graduada simples. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para o dia 30/09/2016 às 15:00 para cada um dos subconjuntos de dados climáticos simulados. Note que as temperaturas estão fornecidas apenas para os nós de número ímpar, portanto, o segundo valor apresentado corresponde ao terceiro nó.

Figura 8: Temperatura estimada a 10 cm de profundidade para o pavimento da BR-116 para o dia 30/09/2016 às 15:00 para os diferentes conjuntos de dados climáticos.



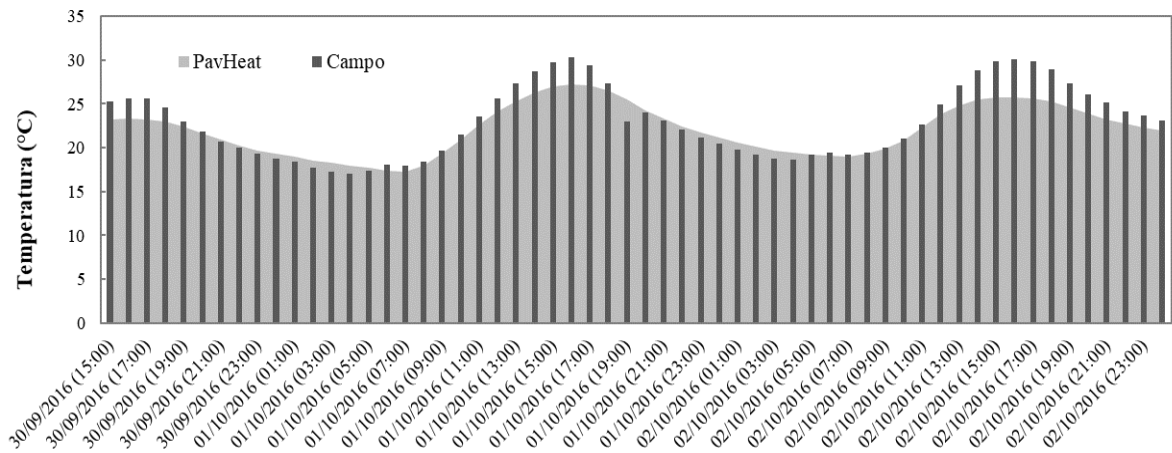
(fonte: elaboração própria)

Resultados semelhantes aos apresentados na Figura 8 são gerados para cada hora do período simulado, para cada um dos três subconjuntos de dados climáticos. Portanto, para facilitar a validação dos resultados, utilizou-se a opção de exportá-los para uma planilha eletrônica, para então compará-los ponto a ponto com os dados obtidos em campo.

O Gráfico 1 apresenta, sombreado em cinza claro, os resultados de temperatura obtidos no 3º nó para todo o período de análise, através do 1º subconjunto de dados climáticos (BR-116_a). As barras em cinza escuro representam os valores de temperatura horária obtidos em campo na profundidade de 10 cm para o mesmo período.

A diferença média entre as temperaturas medidas em campo e as estimadas pelo aplicativo corresponde a 1,3 °C, com um desvio padrão de 1,2 °C. Analisando ponto a ponto, a máxima diferença observada foi de 4,4 °C para o dia 02/10/2016 às 16:00, correspondente ao período com as temperaturas mais elevadas; a mínima diferença observada foi de 0,0 °C, onde o aplicativo previu exatamente a temperatura observada em campo no dia 02/10/2016 às 05:00, correspondente ao período com as temperaturas mais baixas. Ademais, o coeficiente de determinação, R^2 , e o coeficiente de Pearson obtidos foram respectivamente de 81,0% e 92,4%.

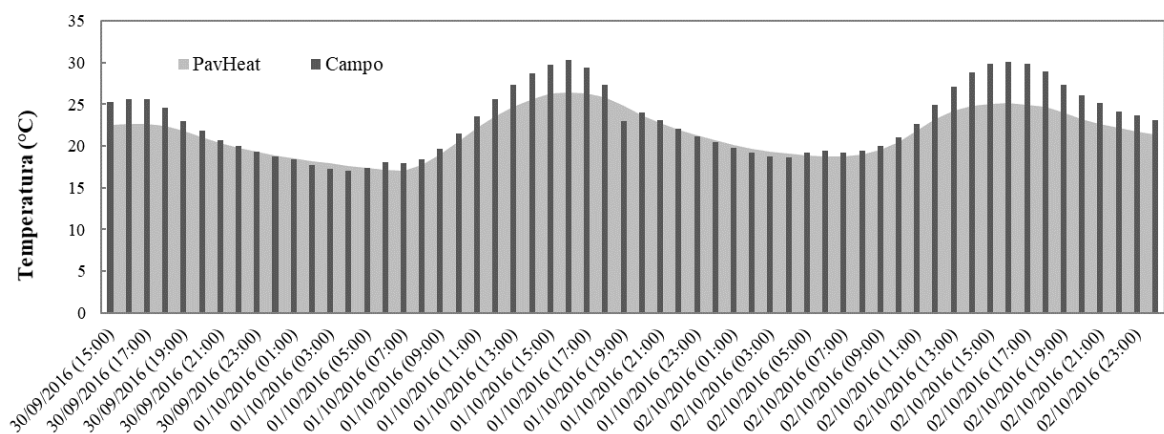
Gráfico 1: Comparação entre temperaturas medidas e estimadas (BR-116_a).



(fonte: elaboração própria)

O Gráfico 2 possui as mesmas características que o gráfico anterior, porém, seus resultados levam em consideração o 2º subconjunto de dados climáticos (BR-116_b). Para este caso, a diferença média entre as temperaturas observadas e estimadas corresponde a 1,6 °C, com desvio padrão de 1,4 °C. A máxima diferença observada foi de 5,0 °C também para o dia 02/10/2016 às 16:00, enquanto que a mínima diferença observada também foi de 0,0 °C, porém, para o dia 30/09/2016 às 23:00. O coeficiente de determinação, R^2 , e o coeficiente de Pearson obtidos foram respectivamente de 72,4% e 92,5%.

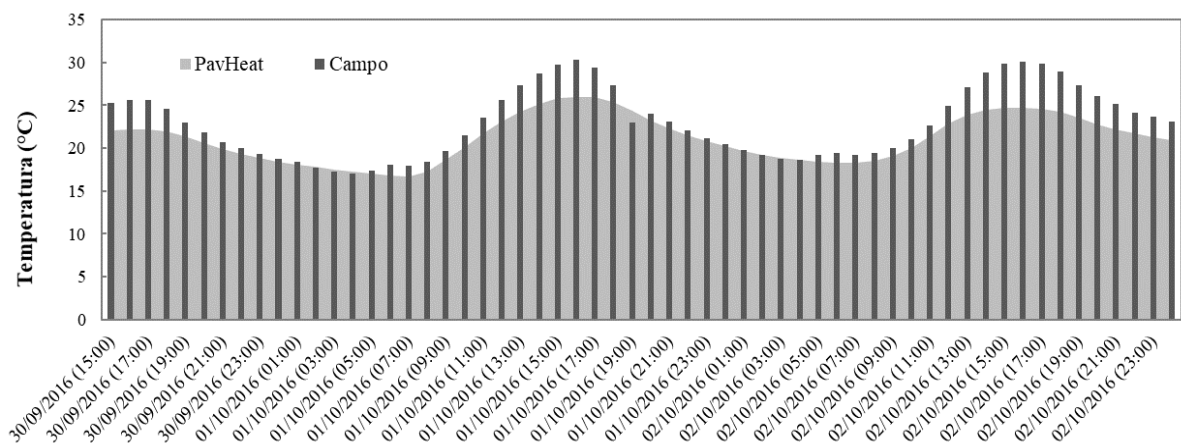
Gráfico 2: Comparação entre temperaturas medidas e estimadas (BR-116_b).



(fonte: elaboração própria)

Os resultados apresentados no Gráfico 3 correspondem ao 3º subconjunto de dados climáticos (BR-116_c). Para este caso, a diferença média entre as temperaturas observadas e estimadas equivale a 1,9 °C, com desvio padrão de 1,5 °C. A máxima diferença observada foi de 5,4 °C também para o dia 02/10/2016 às 16:00, enquanto que a mínima diferença observada também foi de 0,0 °C, porém, para o dia 01/10/2016 às 02:00. O coeficiente de determinação, R^2 , e o coeficiente de Pearson obtidos foram respectivamente de 63,8% e 92,8%.

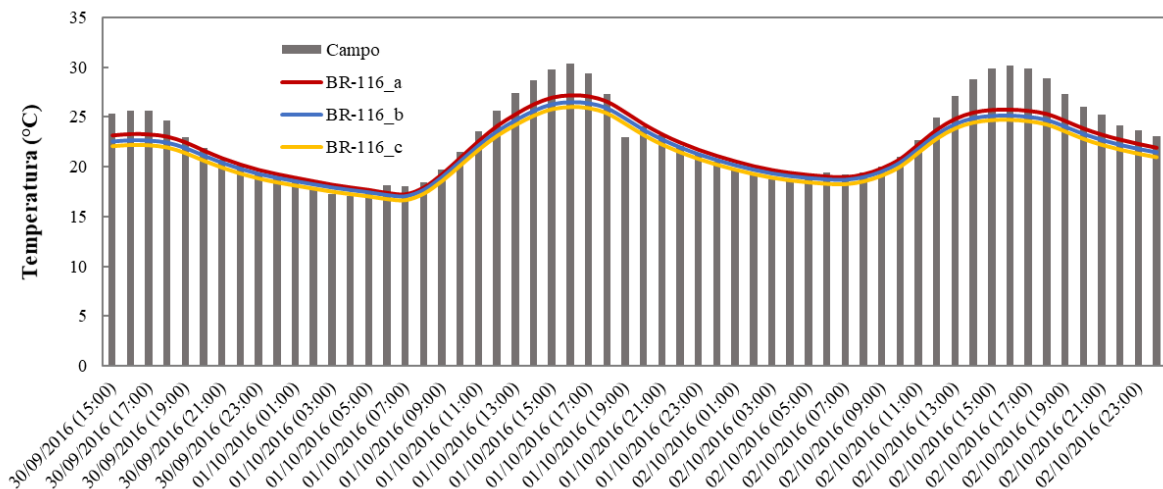
Gráfico 3: Comparação entre temperaturas medidas e estimadas (BR-116_c).



(fonte: elaboração própria)

Observando separadamente os Gráficos 1, 2 e 3, é difícil perceber suas diferenças. Portanto, o Gráfico 4 apresenta conjuntamente os resultados obtidos para os três subconjuntos de dados climáticos, em comparação com os resultados de campo, para a profundidade de 10 cm (nó 3) para o pavimento da BR-116 no período de 30/09/2016 às 15:00 até 03/10/2016 às 00:00. Nota-se que os três resultados apresentam variação muito semelhantes, porém, se diferenciam na magnitude, onde o subconjunto BR-116_b apresenta um deslocamento médio de -0,5 °C em comparação com o BR116_a; além disso, o subconjunto BR-116_c apresenta um deslocamento médio de -0,4 °C, desta vez em comparação com o subconjunto BR116_b.

Gráfico 4: Comparação entre temperaturas de diferentes conjuntos de dados climáticos.

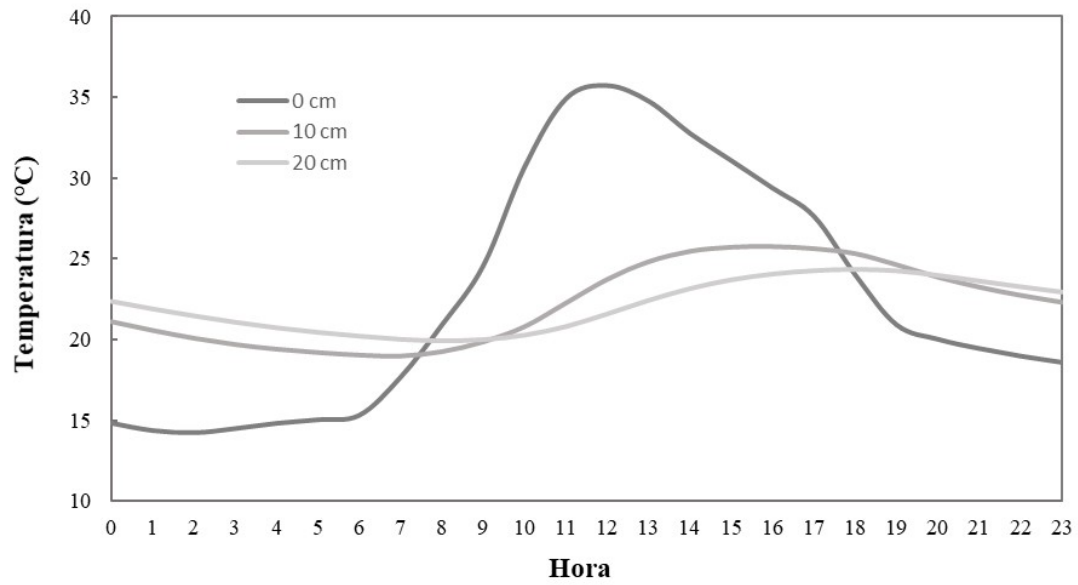


(fonte: elaboração própria)

No dia a dia, é comum observar o fenômeno da inversão térmica em pavimentos flexíveis, o qual se caracteriza pela ocorrência natural de temperaturas mais baixas na superfície do pavimento durante a madrugada, em relação às camadas inferiores. À medida que o sol aquece o pavimento, a temperatura da superfície se eleva mais rapidamente do que as camadas inferiores, para voltar a diminuir quando a noite chega. O conhecimento dos horários em que essas inversões ocorrem é importante para o dimensionamento adequado de pavimentos flexíveis e a observação delas indica um funcionamento adequado das transferências internas de calor.

Sendo assim, o Gráfico 5 apresenta a variação de temperatura do pavimento na superfície e nas profundidades de 10 e 20 cm, para as 24 horas do dia 02/10/2016, utilizando os resultados obtidos a partir do 1º subconjunto de dados climáticos (BR-116_a). A partir do gráfico observa-se que o primeiro ponto de inversão ocorre entre 07:00 e 08:00, e o segundo entre 17:00 e 18:00, havendo o maior pico de temperatura da superfície próximo às 12:00.

Gráfico 5: Inversão de temperatura estimada no dia 02/10/2016 no pavimento da BR-116.



(fonte: elaboração própria)

5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através do Gráfico 4, fica evidente que o primeiro subconjunto de dados climáticos (BR-116_a) apresenta os resultados mais próximos dos observados em campo. Enquanto que os outros dois subconjuntos, apesar de apresentarem uma variação muito semelhante ao primeiro, possuem um deslocamento nos resultados, subestimando as previsões de temperatura. O primeiro subconjunto apresenta medições dos parâmetros de temperatura e velocidade do vento a uma altura de 2 m da superfície, enquanto o segundo e o terceiro apresentam respectivamente para 10 e 50 m. Isso demonstra que quanto mais longe da superfície terrestre são feitas as medições, menores serão as temperaturas obtidas pelo modelo, e menos precisos serão os resultados.

Também é possível verificar numericamente a vantagem do primeiro subconjunto sobre os demais. O seu coeficiente de determinação, R^2 , é de 81%, 8,6% maior do que o do segundo subconjunto e 17,2% maior que o terceiro. O seu coeficiente de Pearson é o menor dos três, equivalente a 92,4%, contra 92,5% e 92,8% dos demais, porém, a diferença é muito pequena (0,4% em relação ao melhor valor obtido), e não se sobressai ao resultado do coeficiente de determinação.

O coeficiente de determinação, R^2 , é uma medida de ajuste em modelos de regressão que indica o grau de variação dos dados que pode ser explicado pelo modelo. Seu valor é variável entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1 ele estiver, significa que melhor o modelo se ajusta aos dados. Em outras palavras, um valor de R^2 próximo de 1 indica que o modelo é capaz de explicar uma grande parte da variação dos dados, enquanto um valor próximo de 0 indica que o modelo não é capaz de explicar muito bem essa variação.

O coeficiente de Pearson é uma medida de correlação entre duas variáveis, seu valor varia entre -1 e 1. Resultados próximos de 1 indicam uma correlação positiva forte, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra também aumenta, e uma delas pode ser usada para prever a outra com alta precisão. Por outro lado, um valor próximo de -1 indica uma correlação negativa forte, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui na mesma proporção. Em oposição, um valor próximo de 0 indica que não há correlação linear entre as variáveis.

Sendo assim, o primeiro subconjunto de dados climáticos possui a maior capacidade de justificar a variação em relação aos dados de campo. Porém, os resultados de todos os três subcon-

juntos possuem uma forte correlação positiva (diretamente proporcional) com os dados de campo, conforme já evidenciado pelo Gráfico 4, onde os vales e picos dos dados estimados, coincidem com boa precisão aos dados medidos.

Devido ao fato de o primeiro subconjunto de dados climáticos ter apresentado a melhor previsão de temperatura para o pavimento da BR-116, uma comparação mais detalhada deste resultado ajuda a compreender os pontos fortes e fracos do modelo de transferência de calor.

De acordo com o Gráfico 1, as temperaturas observadas em campo, no período entre 30/09/2016 às 15:00 e 03/10/2016 às 00:00, apresentam uma média de 22,9 °C, com desvio padrão de 4 °C. As temperaturas máximas diárias ocorreram sempre às 16:00 e equivalem a 25,6 °C, 30,3 °C e 30,1 °C respectivamente para os dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro. As temperaturas mínimas diárias ocorreram sempre às 04:00 e equivalem a 17,0 °C e 18,7 °C respectivamente para os dias 01 e 02 de outubro.

Ainda observando o Gráfico 1, as temperaturas obtidas pelo aplicativo, para o mesmo período de dados medidos em campo, apresentam uma média de 22,1 °C, com desvio padrão de 2,8 °C. As temperaturas máximas diárias também ocorreram sempre às 16:00, nos dias 30 de setembro, 01 e 02 de outubro, e equivalem respectivamente a 23,3 °C, 27,2 °C e 25,8 °C. As temperaturas mínimas diárias ocorreram 3 horas mais tarde em relação aos dados observados, às 07:00, nos dias 01 e 02 de outubro, e equivalem respectivamente a 17,3 °C e 19,0 °C.

Com base na análise matemática dos dois parágrafos anteriores, fica evidente que o modelo apresenta as melhores previsões para valores médios e mínimos diários. A média obtida para todo o período possui uma diferença de 0,8 °C, correspondente a 3,5%. As mínimas temperaturas diárias apresentam uma diferença de 0,3 °C, correspondente a 1,73% para dia 01 e 1,58% para o dia 02 de outubro. O único contraponto observado na previsão das temperaturas mínimas diárias foi a defasagem de 3 horas em sua ocorrência em relação à observação em campo. Porém, as temperaturas entre 04:00 e 07:00 pouco variam, indicando que esta diferença não é alarmante.

Em oposição aos resultados anteriores, as previsões das máximas temperaturas diárias apresentaram valores com um menor grau de precisão. A mínima diferença observada, entre as temperaturas máximas calculadas e medidas, foi de 2,3 °C, equivalente a 8,98%, para o dia 30 de setembro; a máxima diferença observada foi de 4,3 °C, equivalente a 14,29%, para o dia 02 de outubro. Nos três dias, a temperatura prevista pelo aplicativo foi subestimada. Consideran-

do que a temperatura diária varia de forma semelhante a uma onda senoidal, o aplicativo previu uma amplitude de onda inferior à observada em campo, e, por esse motivo, o desvio padrão das temperaturas fornecidas pelo *PavHeat* é inferior ao observado em campo.

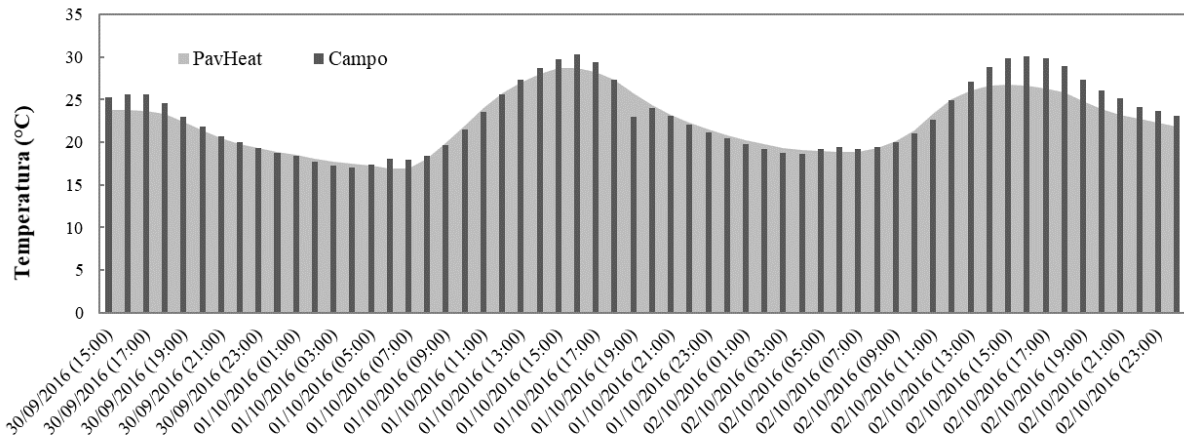
O motivo de as temperaturas máximas diárias estarem subestimadas pode ter relação com as duas principais propriedades térmicas dos materiais: a capacidade e a condutividade térmica, visto que estas propriedades foram estimadas com base em fórmulas empíricas e valores comumente observados na literatura, podendo não corresponder ao valor exato observado em campo.

Materiais com alta condutividade térmica tendem a ter uma variação de temperatura mais rápida, em resposta a mudanças de calor, ao serem comparados com materiais de baixa condutividade térmica. Isso ocorre pois esta propriedade está relacionada à capacidade de transferência de calor através do material. Logo, uma alta condutividade térmica permite que o calor se propague rapidamente, enquanto que uma baixa condutividade retarda o processo de transferência de calor.

Em oposição, materiais com alta capacidade térmica possuem a característica de absorver mais calor, em comparação com materiais de baixa capacidade térmica, antes de um aumento expressivo em sua temperatura. Isso significa que, quando esses materiais são aquecidos, eles podem armazenar mais calor antes de ser observado um aumento em sua temperatura. No entanto, uma vez que um material de alta capacidade térmica absorveu uma quantidade de calor suficiente, sua temperatura aumentará mais rapidamente do que a de materiais com baixa capacidade térmica.

Desta forma, é esperado que um aumento na condutividade térmica e/ou uma redução na capacidade térmica resultem em maiores picos de temperatura, e, por consequência, produzam maiores temperaturas máximas diárias. Levando em consideração que a capacidade térmica é uma propriedade pouco variável nos materiais componentes do asfalto, há uma maior probabilidade da existência de erros na propriedade de condutividade térmica. Sendo assim, a fim de exemplificar numericamente o efeito da variação da condutividade térmica, foi realizada uma nova simulação para o pavimento da BR-116 utilizando o primeiro subconjunto de dados climáticos (BR-116_a). Todos os parâmetros foram mantidos iguais à simulação anterior, porém, desta vez a condutividade térmica de cada um dos materiais foi aumentada em 0,5 Btu/h-ft-F. Os resultados são apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6: Efeito da condutividade térmica dos materiais.



(fonte: elaboração própria)

O novo resultado apresentou um erro médio de apenas 0,9 °C, com desvio padrão de 0,9 °C. A mínima diferença observada, em comparação com os dados de campo, se manteve em 0 °C, já a máxima diferença foi reduzida para 3,5 °C. O coeficiente de Pearson apresentou um valor de 92,7%, enquanto que o coeficiente de determinação, R^2 , apresentou o melhor de todos os resultados, equivalente a 89,1%. Assim, um aumento da condutividade térmica dos materiais na ordem de 30% resultou em um aumento de 8,1% no coeficiente de determinação e 0,3% no coeficiente de Pearson.

A temperatura média fornecida pelo aplicativo foi de 22,4 °C, com desvio padrão de 3,4 °C. A diferença entre a temperatura média fornecida pelos dados de campo foi de apenas 0,5 °C, correspondente a 2,2%, além de o desvio padrão estar muito mais próximo do observado em campo, em relação à simulação sem a modificação na condutividade térmica.

Dessa forma, fica evidente que um aumento na condutividade térmica produziu resultados mais satisfatórios que os anteriores. No entanto, vale ressaltar que este aumento foi um recurso utilizado para comprovar a hipótese de que alterações nas propriedades térmicas dos materiais poderiam trazer melhores resultados. Porém, somente através da retirada de corpos de prova e da realização de ensaios laboratoriais seria possível determinar o real valor das propriedades térmicas do pavimento em análise.

Em relação ao Gráfico 5 de inversão de temperatura, também é possível comprovar que o comportamento de transferência de calor foi simulado conforme esperado fisicamente, pois

este é um fenômeno que ocorre em pavimentos compostos por camadas com propriedades térmicas diferentes. Durante o dia, a camada de revestimento aquece mais rapidamente, transmitindo o calor para as camadas subjacentes. À noite, a camada de revestimento resfria mais rapidamente do que as demais, apresentando temperaturas inferiores, devido às suas propriedades térmicas diferentes.

Outro ponto importante a se observar é a possível influência nos resultados com origem nos dados climáticos de entrada. Conforme mencionado anteriormente, Faccin et al. (2022) verificaram que o MERRA-2, de maneira geral, subestima os valores de temperatura do ar, com erros médios menores que 0,9 °C. Além disso, Gopiseti et al. (2019) indicam que a porcentagem de luz solar obtida a partir da cobertura de nuvens do MERRA-2 é uma propriedade muito imprecisa para o uso na modelagem de desempenho de pavimentos, e como alternativa os autores recomendam como dado de entrada diretamente o valor da radiação de ondas curtas da superfície.

6 CONCLUSÕES

Levando em consideração os resultados e os objetivos propostos neste trabalho, as seguintes conclusões foram obtidas:

- ◆ O aplicativo foi capaz de obter dados climáticos com frequência horária, através da API do MERRA-2, para a aplicação na metodologia de transferência de calor;
- ◆ O aplicativo foi capaz de prever as temperaturas do pavimento da BR-116, a uma profundidade de 10 cm, para o período de 30/09/2016 às 15:00 a 03/10/2016 às 00:00, utilizando a metodologia de transferência de calor proposta por Dempsey (1969), com um coeficiente de determinação, R^2 , de 81%, estando os resultados validados para a análise proposta;
- ◆ Considerando quatro turnos: madrugada (01:00 às 06:00), manhã (07:00 às 12:00), tarde (13:00 às 18:00) e noite (19:00 às 00:00), a diferença média, observada entre os dados medidos e os estimados foi respectivamente de 0,7 °C, 0,6 °C, 2,7 °C e 1,0 °C. Desta forma, evidencia-se que o aplicativo apresenta um maior erro ao estimar as temperaturas mais elevadas, no período da tarde, em relação às temperaturas mais baixas, observadas nos turnos da madrugada, manhã e noite;
- ◆ O subconjunto de dados climáticos com temperatura do ar e velocidade do vento medidos a 2 metros de altura forneceram os resultados mais coerentes com os observados em campo;
- ◆ Dados climáticos medidos a 10 e 50 m de altura da superfície terrestre fornecem resultados subestimados na simulação, sendo os resultados mais coerentes, em relação aos dados de campo, obtidos a partir de dados climáticos medidos a 2 m de altura da superfície; e
- ◆ A condutividade térmica é uma variável que apresenta significativa influência, podendo ser utilizada como calibração dos modelos simulados.

O presente trabalho evidenciou a comparação entre diferentes subconjuntos de dados climáticos para um mesmo pavimento, porém, existem diversas análises que podem ser realizadas para avançar no entendimento da aplicação da metodologia. Estas análises ficam de sugestões para trabalhos futuros:

- ◆ A comparação entre os resultados de um mesmo pavimento inserido em diferentes climas do planeta terra;
- ◆ O efeito de um mesmo conjunto de dados climáticos em pavimentos com camadas formadas por diferentes materiais, com diferentes propriedades térmicas;
- ◆ A análise de qual resolução espacial e temporal fornecem resultados satisfatórios com o menor tempo computacional possível;
- ◆ A aplicação do modelo para dados de sensação térmica, no lugar das temperaturas reais; e
- ◆ Verificação da aplicabilidade do aplicativo a pavimentos rígidos.

REFERÊNCIAS

- ADWAN, I. et al. Asphalt pavement temperature prediction models: a review. **Appl. Sci.**, v. 11, n. 9: 3794, p. 1-19, 2021.
- ALDRICH JR., H. P. Frost penetration below highway and airfield pavements. **Boletim do Conselho de Pesquisa Rodoviária**, n. 135, p. 124-149, 1956.
- ANÁLISE retrospectiva da era moderna para pesquisa e aplicações, versão 2. **Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA)**, Washington, D.C., 09 set. 2022. Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- ARIAWAN, I. M. A.; SUBAGIO, B. S.; SETIADJI, B. H. Development of asphalt pavement temperature model for tropical climate conditions in West Bali region. **Procedia Engineering**, v. 125, p. 474-480, 2015.
- ASAEDA, T.; CA, V. T.; WAKE, A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 3, p. 413-427, 1996.
- BAKER, D. G.; HAINES, D. A. **Solar radiation and sunshine duration relationships in the north-central region and Alaska**. Minneapolis: Agricultural Experimental Station - University of Minnesota, 1969.
- BARBER, E. S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports. **Boletim do Conselho de Pesquisa Rodoviária**, n. 168, p. 1-8, 1957.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 p.
- BOSILOVICH, M. G. et al. Technical report series on global modeling and data assimilation. **National Aeronautics and Space Administration**, v. 43, p. 1-139, set. 2015.
- BRESSANI, L. N.; NUÑEZ, W. P.; SCHMITT, L. A. Caracterização preliminar de depósitos de argilas moles na região metropolitana de Porto Alegre e estudo preliminar de melhorias desses solos por meio da adição de cal. **Revista ANTT**, v. 3, p. 1-52, 2009.
- BRYCE, J.; IHNAT, Z. Improved models of solar radiation and convective heat transfer for pavement temperature prediction. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 7, p. 2123-2134, nov. 2020.
- CHAPMAN, L.; THORNES, J. E. The influence of traffic on road surface temperatures: implications for thermal mapping studies. **Meteorol. Appl.**, v. 12, p. 371-380, 2005.

CHIARELLO, G. P. et al. Avaliação estrutural e financeira de pavimento flexível dimensionado pelo método do Dner (1981) e Medina (2019): estudo de caso da duplicação da BR 287 – trecho Santa Cruz do Sul à Tabaí/RS. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú-SC. **Anais [...]**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2019. Disponível em: <http://www.anpet.org.br/33anpet/index.php/pt/>. Acesso em 10 mar. 2023.

COLPO, G. B. **Comportamento à fadiga de misturas asfálticas**: ensaios laboratoriais e instrumentação in situ. 2019. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

COMO usar a API de serviços da Web para subconjunto de dados MERRA-2. **GES DISC**, Washington, D.C., [a]. Disponível em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/information/howto?title=How%20to%20Use%20the%20Web%20Services%20API%20for%20Subsetting%20MERRA-2%20Data>. Acesso em: 11 mar. 2023.

DEMPSEY, B. J. **A heat-transfer model for evaluating frost action and temperature related effects in multilayered pavement systems**. 1969. 217 f. Tese (Doutorado de Filosofia em Engenharia Civil) – University of Illinois, Chicago, 1969.

DEMPSEY, B. J.; THOMPSON, M. R. A heat-transfer model for evaluating frost action and temperature-related effects in multilayered pavement systems. In: REUNIÃO ANUAL DO CONSELHO DE PESQUISA DE RODOVIAS, 49., 1970, Washington, D.C. **Anais [...]**. Washington: Conselho de Pesquisa de Rodovias, 1970. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1970/342/342-005.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas em Transportes, 2006. 274 p. (IPR. Publ., 719).

EARTHDATA login para acesso a dados. **GES DISC**, Washington, D.C., [b]. Disponível em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/earthdata-login>. Acesso em: 11 mar. 2023.

EARTHDATA login registro do usuário. **GES DISC**, Washington, D.C., [c]. Disponível em: <https://urs.earthdata.nasa.gov/users/new>. Acesso em: 13 mar. 2023.

FACCIN, C. et. al. Análise estatística de séries de temperatura do ar da reanálise MERRA-2: estudo de caso – Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES DA ANPET, 36., 2022, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Universidade Federal de Santa Maria, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet-2022/trabalhos/analise-estatistica-de-series-de-temperatura-do-ar-da-reanalise-merra-2-estudo-d?lang=pt-br>. Acesso em: 19 abr. 2023

FLACK, W. J. **The application of termination strips to one-dimensional transient heat-flow solutions**. 1965. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Clarkson College of Technology, Nova York, 1965.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020. 78 p.

GAME MAKER. **GameMaker™**. Versão 2023.2.0.71. [Escócia]: Game Maker, 1999.

GEIGER, Z. R. **The Climate near the Ground**. 2th ed. Cambridge: Harvard University Press, 1959.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015a), **MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx: 2d,1-Hourly, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4**, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [13 mar. 2023], 10.5067/VJAFPLI1CSIV.

Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015b), **MERRA-2 tavg1_2d_rad_Nx: 2d, 1-Hourly, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Radiation Diagnostics V5.12.4**, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [13 mar. 2023], 10.5067/Q9QMY5PBNV1T.

GOPISETTI, L. S. P.; CETIN, B.; FORMAN, B. A.; DURHAM, S.; SCHWARTZ, C. W.; CEYLAN, H. Evaluation of four different climate sources on pavement mechanistic-empirical design and impact of surface shortwave radiation. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 22, n. 9, p. 1155-1168, set. 2019.

GUI, J. et al. Impact of pavement thickness on surface diurnal temperature. **Journal of Green Building**, v. 2, n. 2, p. 121-130, mai. 2007.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. 2th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

JOHNSON, A. W. **Frost action in roads and airfields: a review of the Literature**. 1765-1951. Washington, D.C.: Highway Research Board, 1952.

JUMIKIS, A. R. **Thermal soil mechanics**. New Jersey: Rutgers University Press, 1966. p. 267.

KERSTEN, M. S. Thermal properties of soils. **Bulletin No. 28**, v. 52, n. 21, p. 1-227, jun. 1949.

LIANG, R. Y.; NIU, Y. Temperature and curling stress in concrete pavements: analytical solutions. **Journal of Transportation Engineering**, v. 124, n. 1, p. 91-100, jan./fev. 1998.

MATÍĆ, B. et al. A model for the pavement temperature prediction at specified depth. **Metalurgija**, v. 52, n. 4, p. 505-508, 2013.

MINHOTO, M. J. C.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Asphalt pavement temperature prediction. **Road Materials and Pavements Design**, v. 10, n. 10, p. 1-15, 2005.

NASCIMENTO, L. A. H. Novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos. In: SEMINÁRIO NACIONAL MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS, 10., 2018, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Associação Catarinense de Engenheiros, 2018. Disponível em: <https://criatividadecoletiva.wixsite.com/modernastecnicas2018/presentations>. Acesso em: 13 mar. 2023.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION GODDARD EARTH SCIENCE DATA INFORMATION AND SERVICES CENTER (GES DISC). **Readme Document for Merra-2 Data Products**. Washington, D.C., 03 jan. 2021. GES DISC: Documento para os produtos MERRA-2. Disponível em: <https://goldsmr4.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/MERRA2/M2T1NXSLV.5.12.4/doc/MERRA2.README.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2023.

PARK, D.-Y.; BUCH, N.; Chatti, K. Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections. **Journal of the Transportation Research Board**, v. 1764, p. 97–111, 2001.

PORTELA, E. L. **Análise viscoelástica de materiais asfálticos considerando os efeitos da temperatura e do dano**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.

PREVITERA FILHO, J. **Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos**. 1974. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1974.

PYTHON. **Python™**. Versão 3.11.2. [Países Baixos]: Python, 1991.

QIN, Y.; ZHANG, X.; TAN, K.; WANG, J. A review on the influencing factors of pavement surface temperature. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 67659–67674, ago. 2022.

SANTOS, A. B. V.; SOARES, J. B.; BABADOPULOS, L. F. A. L. Influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada e dimensionamento de pavimentos nacionais. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camboriú-SC. **Anais [...]**. Balneário Camboriú-SC: Universidade Federal do Ceará, 2019. Disponível em: https://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20e%20Gest%C3%A3o%20de%20Pavimentos%20II/3_365_AC.pdf. Acesso em: 19 abr. 2023.

SCHENK JR., H. N. **Fortran methods in heat flow**. New York: Ronald Press, 1963.

SCOTT, R. F. **Heat exchange at the ground surface**. Hanover, N.H.: U.S. Army Material Command, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1964.

SOLAIMANIAN, M.; KENNEDY, T. W. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation. **Transportation Research Record**, 1417, p. 1-11, 1993.

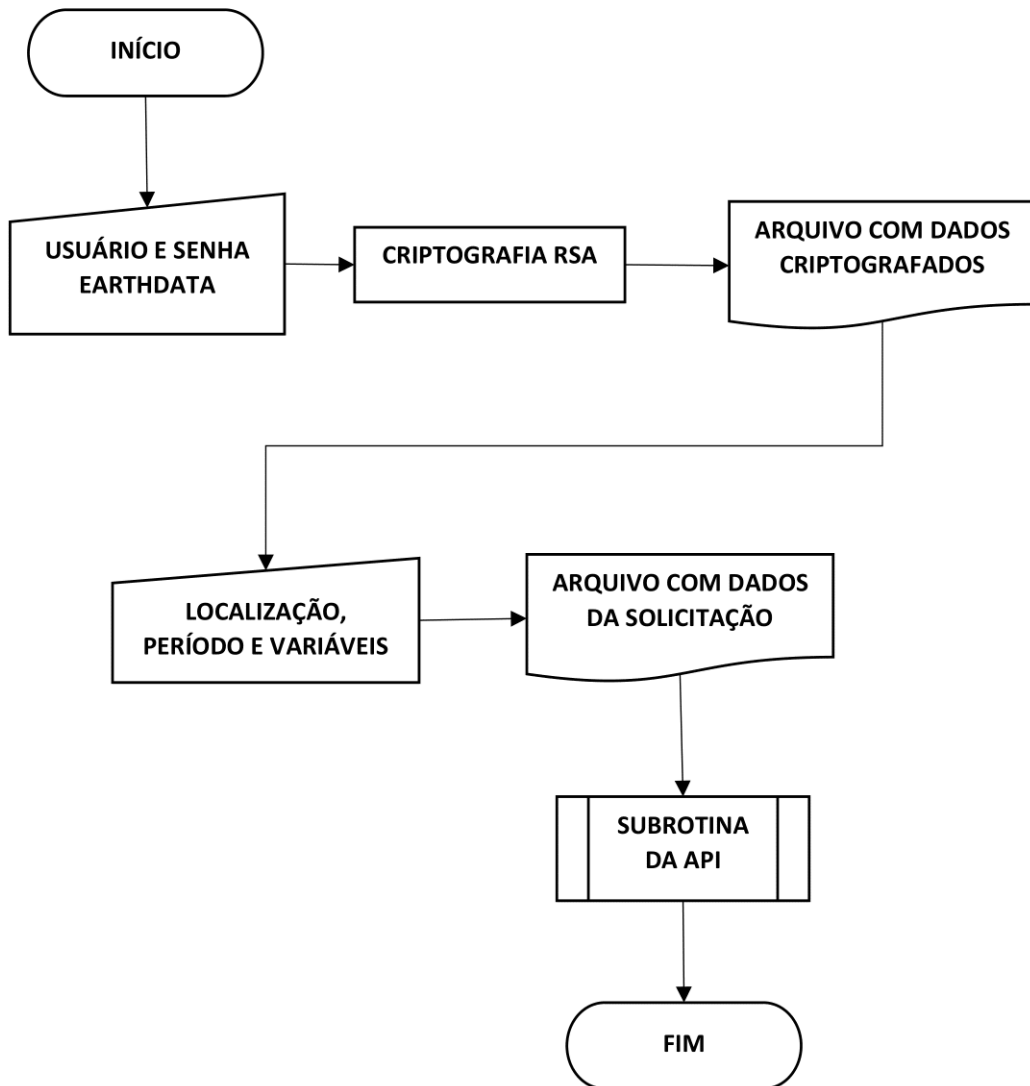
STRAUB, A. L.; SCHENK JR., H. N.; PRZYBYCIEN, F. E. Bituminous pavement temperature related to climate. In: COMMITTEE ON MECHANICAL PROPERTIES OF BITUMINOUS PAVING MIXTURE, 47.,1968. **Anais** [...]. 1968. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1968/256/256-005.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

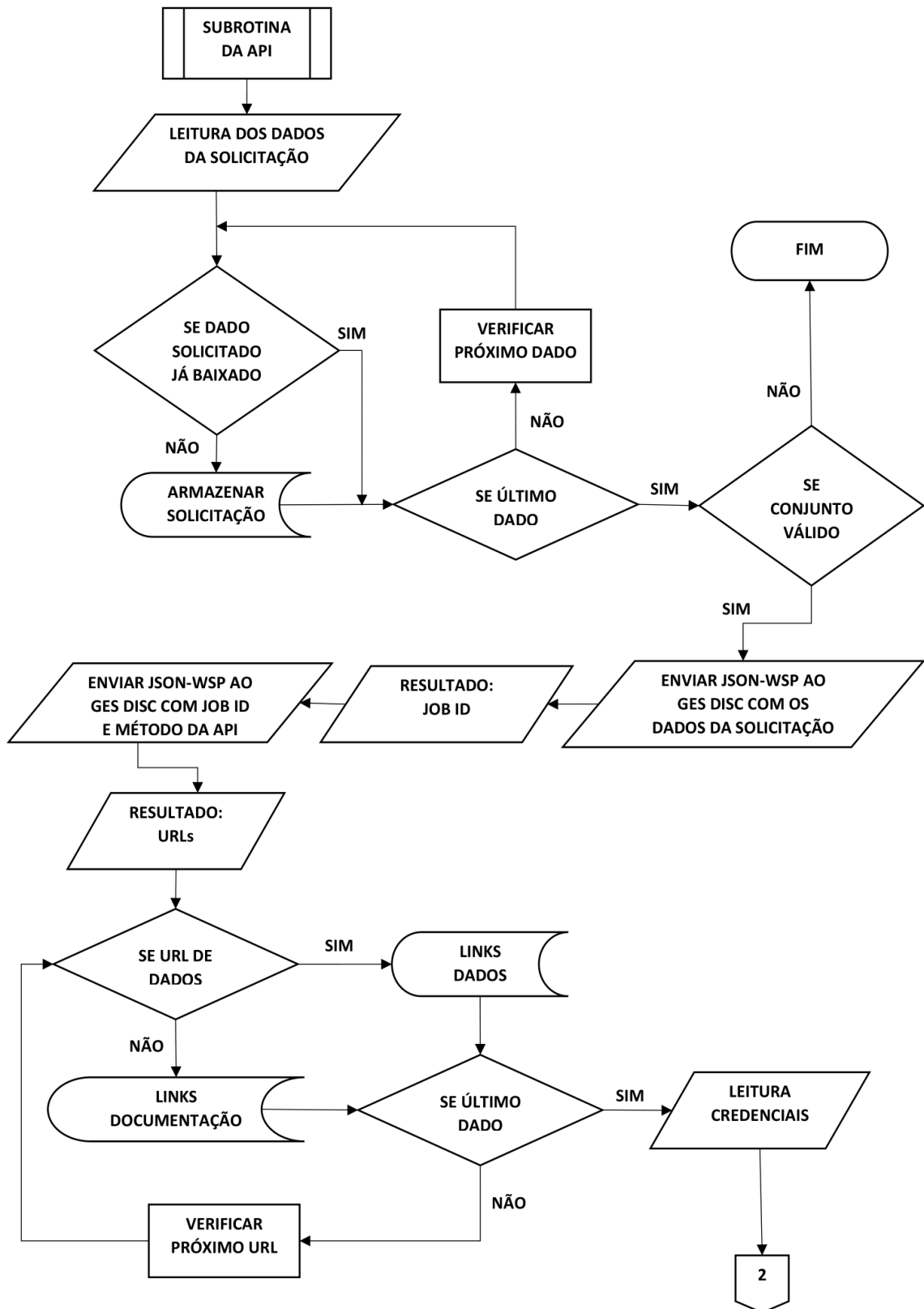
VEHRENCAMP, J. E. Experimental investigation of heat transfer at an air-earth interface. **Trans., Amer. Geophysical Union**, v. 34, n. 1, p. 22-29, 1953.

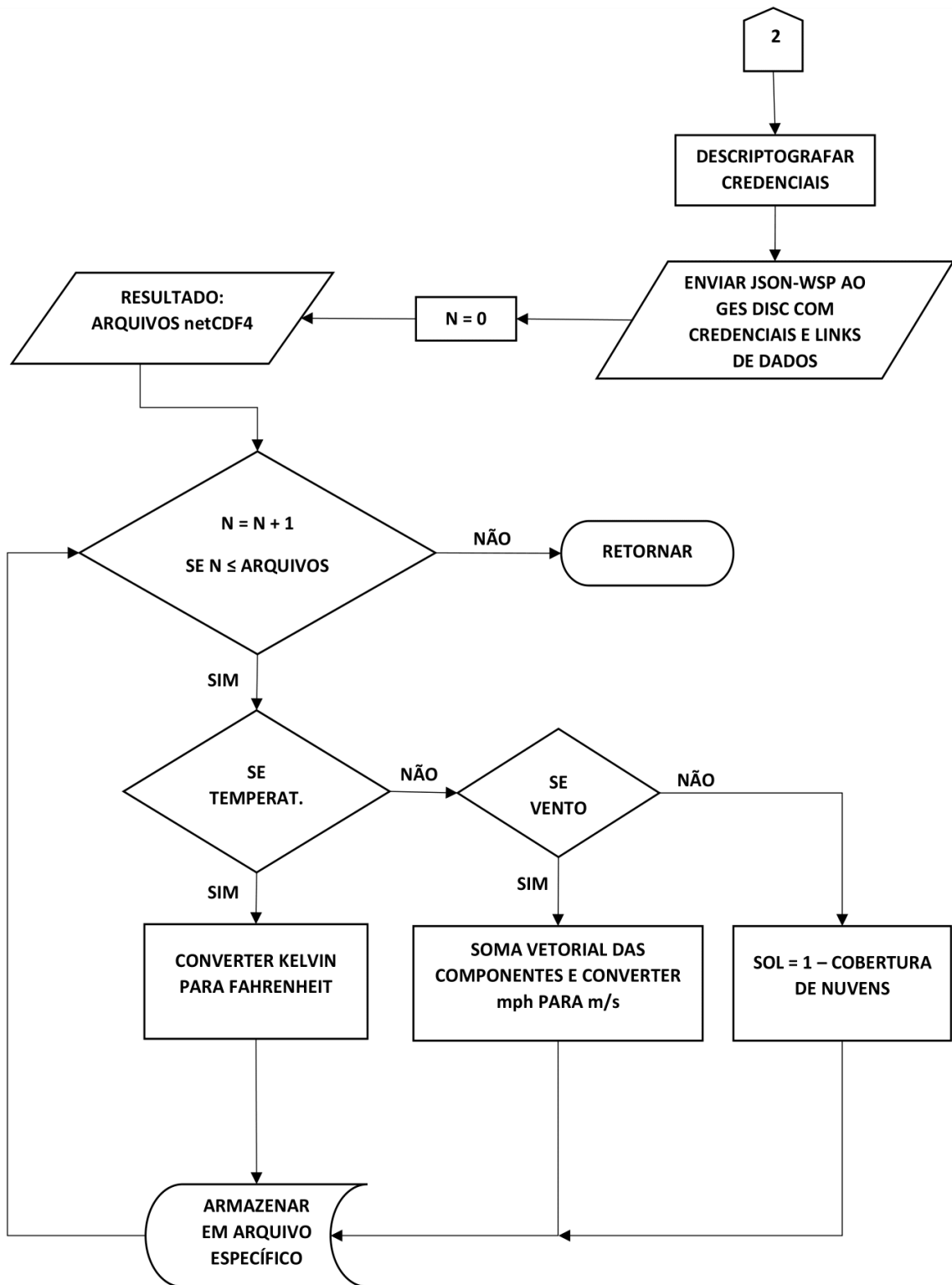
WANG, D. Simplified analytical approach to predicting asphalt pavement temperature. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 12, p. 1-7, dez. 2015.

ZAPATA, C.E.; HOUSTON, W. N. **Calibration and validation of the enhanced integrated climactic model for pavement design**. Final Research Report, Washington: National Cooperative Highway Research Program Report 602, 2008.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DO CÓDIGO DA API







APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO CÓDIGO PRINCIPAL

