



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MARCUS VINICIUS SOARES CORDEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE
PAVIMENTO FLEXÍVEL ATRAVÉS DE CRITÉRIOS
EMPÍRICO-MECANÍSTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APARECIDA DE GOIÂNIA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): **Marcus Vinicius Soares Cordeiro**

Título do trabalho: **Avaliação da influência das variáveis climáticas no desempenho de estruturas de pavimento flexível através de critérios empírico-mecanísticos**

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Liosber Medina Garcia, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2025, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Vinicius Soares Cordeiro, Usuário Externo**, em 02/07/2025, às 19:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5473025** e o código CRC **993EB2DF**.

Referência: Processo nº 23070.049563/2024-53

SEI nº 5473025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MARCUS VINICIUS SOARES CORDEIRO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE
PAVIMENTO FLEXÍVEL ATRAVÉS DE CRITÉRIOS
EMPÍRICO-MECANÍSTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 da graduação em Engenharia de Transportes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Liosber Medina Garcia

APARECIDA DE GOIÂNIA
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Cordeiro, Marcus Vinicius Soares

Avaliação da influência das variáveis climáticas no desempenho de estruturas de pavimento flexível através de critérios empírico - mecânicos [manuscrito] / Marcus Vinicius Soares Cordeiro. - 2025. 54 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Liosber Medina Garcia.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes, Aparecida de Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Pavimento flexível. 2. Clima. 3. Mecânico-empírico. 4. Desempenho do pavimento. I. Garcia, Liosber Medina, orient. II. Título.

CDU 625



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DECLARAÇÃO

CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MARCUS VINICIUS SOARES CORDEIRO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NO DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL ATRAVÉS DE CRITÉRIOS EMPÍRICO-MECANÍSTICOS

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da graduação em Engenharia de Transportes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás.

Aprovada por:

Prof(a). Dr(a). Liosber Medina Garcia - Orientador(a)

Prof(a). Dr(a). João Paulo Souza Silva - Examinador(a) Interno(a)

Prof(a). Dr(a). Walter Manoel Mendes Filho - Examinador(a) Interno(a)/Externo(a)

Data: 25/06/2025



Documento assinado eletronicamente por **Liosber Medina Garcia, Professor do Magistério Superior**, em 25/06/2025, às 10:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walter Manoel Mendes Filho, Professor do Magistério Superior**, em 25/06/2025, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Paulo Souza Silva, Professor do Magistério Superior**, em 25/06/2025, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5460422** e o código CRC **918A5721**.

Referência: Processo nº 23070.049563/2024-53
5460422

SEI nº

"Dedico este trabalho aos meus pais e a toda a minha família. Foi graças ao esforço e amor incondicional deles que me tornei quem sou hoje. Sei que continuarão a ser minha base e inspiração ao longo de toda a minha vida."

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a Deus e a todas as pessoas que estiveram ao meu lado e me apoiaram ao longo desta jornada de aprendizado e crescimento acadêmico.

Em primeiro lugar, expresso minha eterna gratidão aos meus pais, que sempre estiveram presentes, me incentivando, apoiando e acreditando em cada uma das minhas decisões. Foram eles que me guiaram pelos melhores caminhos, e sem sua presença e dedicação, minha trajetória acadêmica não teria sido possível.

Aos meus familiares, que sempre se mantiveram próximos e me apoiaram desde o início, oferecendo palavras de incentivo e exemplos de perseverança, meu muito obrigado. A presença de vocês foi essencial em cada etapa desta caminhada.

Aos meus amigos, tanto dentro quanto fora da universidade, agradeço pelas incontáveis demonstrações de companheirismo. Estiveram comigo nos momentos difíceis e também celebraram as conquistas. Juntos, construímos memórias e criamos laços que certamente levarei para a vida toda. Obrigado por cada momento compartilhado.

De forma especial, agradeço à minha noiva, que esteve ao meu lado desde o início desta jornada. Sua parceria, apoio incondicional e confiança no meu potencial foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Juntos, superamos desafios e celebramos conquistas que marcaram nossas vidas. Sou imensamente grato por sua presença, que tornou essa graduação ainda mais significativa.

Agradeço também a todos os docentes que contribuíram para a minha formação. Seus ensinamentos foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Cada aula, cada orientação e cada conselho deixaram marcas importantes que levarei comigo.

Em especial, registro minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Liosber Medina Garcia, cuja orientação foi de extrema importância para a realização deste trabalho. Agradeço ainda ao Prof. Dr. João Paulo Souza Silva, que despertou em mim a paixão pela Engenharia de Transportes, mostrando-me as possibilidades e os desafios dessa área que tanto admiro.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento a todos que, de alguma forma, fizeram parte da minha trajetória acadêmica. A cada um de vocês, meu sincero agradecimento.

RESUMO

A malha rodoviária brasileira, majoritariamente composta por pavimentos asfálticos, apresenta desempenho sensível a fatores ambientais como temperatura, umidade e precipitação. Métodos empírico-mecanísticos, têm sido adotados para oferecer maior precisão na previsão do comportamento estrutural ao longo do tempo. No entanto, tais métodos, especialmente o MEPDG, carecem de calibração e adaptação aos dados climáticos regionais do Brasil, uma vez que foram desenvolvidos com base em condições dos Estados Unidos. A pesquisa realiza um levantamento bibliográfico dos principais métodos de dimensionamento utilizados no Brasil e no exterior, comparando suas abordagens quanto ao tráfego, materiais e clima. Foram definidos parâmetros de projeto e variáveis de controle a partir das condições locais da cidade de Goiânia (GO). Para a simulação, utilizou-se o software *Desing Guide 2002*, adaptando sua base de dados climáticos — originalmente norte-americana — com informações meteorológicas locais. A estrutura de pavimento estudada inclui revestimento asfáltico, base, sub-base e subleito, cujas características mecânicas foram determinadas com base na literatura. Os resultados obtidos a partir das simulações forneceram informações relevantes acerca da deformação permanente na trilha de roda, do surgimento de trincas do tipo couro de jacaré e do International Roughness Index (IRI). Observou-se que a deformação permanente da trilha de roda apresentou elevada sensibilidade às variações de temperatura e velocidade do vento, na qual avaliou-se que uma elevação de temperatura, juntamente com uma redução na velocidade dos ventos, ambas com variação de 5%, pode comprometer cerca de 11,74% da estrutura, especialmente na camada de revestimento, que registrou variações de até 20,54% entre os cenários simulados. Em relação às trincas do tipo couro de jacaré, foi possível observar um crescimento acentuado ao longo dos anos, seguindo um padrão exponencial. Foi identificada uma tendência relevante, na qual simulações com menores níveis de deformação permanente apresentaram, de forma geral, maior incidência de trincamento. Essa mesma tendência foi observada no comportamento do IRI, que apresentou menores valores nas simulações com maior deformação permanente. Em síntese, estes resultados destacam a importância de, ao utilizar métodos mecanístico-empíricos no dimensionamento de pavimentos flexíveis, considerar critérios climáticos, principalmente em regiões que apresentam climas variados, como o tropical, presente na cidade de Goiânia.

Palavras-chave: Pavimento flexível; Clima; Mecanístico-empírico; Desempenho do Pavimento.

ABSTRACT

The Brazilian road network, predominantly composed of asphalt pavements, exhibits performance that is highly sensitive to environmental factors such as temperature, humidity, and precipitation. Empirical-mechanistic methods, such as MeDiNa and MEPDG, have been adopted to provide greater accuracy in predicting structural behavior over time. However, these methods—especially the MEPDG—lack proper calibration and adaptation to Brazil's regional climatic data, as they were originally developed based on conditions in the United States. This research conducts a literature review of the main pavement design methods used in Brazil and abroad, comparing their approaches regarding traffic, materials, and climate. Project parameters and control variables were defined based on local conditions in the city of Goiânia (GO). For the simulations, the AASHTOWare Pavement ME Design software was employed, with its original North American climate database adapted using local meteorological information. The studied pavement structure includes asphalt surface, base, subbase, and subgrade layers, with mechanical properties determined from the literature. The simulation results provided relevant insights into rutting, alligator cracking, and the International Roughness Index (IRI). It was observed that rutting was highly sensitive to variations in temperature and wind speed, with an evaluation indicating that a 5% increase in temperature combined with a 5% reduction in wind speed could compromise up to 11.74% of the structure, especially in the surface layer, which showed variations of up to 20.54% across the simulated scenarios. Regarding alligator cracking, a significant and exponential increase over the years was noted. A noteworthy trend was identified, in which simulations with lower levels of permanent deformation generally exhibited higher cracking incidence. The same trend was observed for the IRI, which showed lower values in scenarios with higher rutting. In summary, these results highlight the importance of considering climatic criteria when applying mechanistic-empirical methods in the design of flexible pavements, especially in regions with diverse climates, such as the tropical conditions present in Goiânia.

Keywords: Flexible Pavement; Climate; Mechanistic-empirical; Pavement Performance.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xii	
LISTA DE FIGURAS.....	xiii	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xiv	
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA	4
1.2	OBJETIVO.....	6
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	MÉTODO DNER.....	9
2.1.1	Caraterísticas físicas e mecânicas dos materiais da estrutura	10
2.1.2	Tráfego.....	11
2.1.3	Fator climático	12
2.2	MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL (MEDINA)	13
2.2.1	Caraterísticas físicas e mecânicas dos materiais da estrutura	14
2.2.2	Tráfego.....	14
2.2.3	Fator climático	15
2.3	MÉTODO DA AASHTO.....	16
2.3.1	Caraterísticas físicas e mecânicas dos materiais da estrutura	17
2.3.2	Tráfego.....	17
2.3.3	Fator climático	18
2.4	MÉTODO MEPDG	18
2.4.1	Caraterísticas físicas e mecânicas dos materiais da estrutura	20
2.4.2	Tráfego.....	22
2.4.3	Fator climático	22
3	metodologia.....	25
3.1	DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL DE CONTROLE E DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	25
3.1.1	Principais caraterísticas do software <i>Desing Guide 2002</i>	25
3.1.2	Estrutura e Propriedade dos Materiais.....	26
3.1.3	Carregamento e Tráfego	29
3.1.4	Módulo do clima	31
3.1.4.1	A criação da estação climática.....	33
3.2	ANÁLISE DE DADOS.....	34

3.2.1	Composição da análise de sensibilidade	37
4	Resultados da Análise de sensibilidade	38
4.1.1	Deformação permanente da trilha de roda	39
4.1.2	Trinca Tipo Couro de Jacaré	44
4.1.3	IRI	46
5	CONCLUSÕES	48
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de camadas de pavimentos	11
Tabela 2 - Fator Climático - FR.....	12
Tabela 3 - Espessura mínima de revestimento betuminoso	15
Tabela 4 - Características dos níveis hierárquicos do MEPDG	19
Tabela 5 - Valores limites recomendados para projetos teste	21
Tabela 6 - Informações relacionadas ao tempo.....	23
Tabela 7 - Informações gerais do pavimento.....	23
Tabela 8 - Configuração dos materiais de cada camada do pavimento	28
Tabela - 9 Valores das variáveis meteorológicas da cidade de Goiânia	34
Tabela - 10 Valores das variáveis meteorológicas da cidade de Miami	34
Tabela 11 - Tabelas das datas de início e fim, recebidas e utilizadas nos HCDs.....	35
Tabela 12 - Intervalo dos parâmetros alterados	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma de método mecanístico	8
Figura 2- Eixo Padrão Rodoviário	11
Figura 3 - Representação Esquemática do Processo de Dimensionamento pelo MEPDG.....	19
Figura 4 - Ambiente do pré-processo no software.....	26
Figura 5 - Espessuras das camadas do pavimento	27
Figura 6 - Classificação de categoria e veículos da FHWA, adotadas pelo MEPDG.....	29
Figura 7 - Contagem de tráfego na pista experimental (CEASA) - agosto de 2005.....	30
Figura 8 - Módulo tráfego nos dados no software <i>Desing Guide 2002</i>	30
Figura 9 - Módulo Clima no <i>Desing Guide 2002</i>	31
Figura 10 - Mapa das estações meteorológicas de Goiânia	32
Figura 11 - Planilha com o método de interpolação aplicado.....	36
Figura 12 - Formato HCDs	36
Figura 13 - Exemplo do arquivo station.dat com HCDs criados inseridos	37
Figura 14 - Quadro de todas as Análises de Sensibilidade	38
Figura 15 - Gráfico do Afundamento Total de cada Simulação	39
Figura 16 - Gráfico de Deformação do Ponto Máximo por Simulação	40
Figura 17- Gráfico de Deformação do Ponto Máximo por Simulação	41
Figura 18 - Deformação Permanente no Revestimento	42
Figura 19 - Deformação Permanente na Base e Sub-base	42
Figura 20 - Deformação Permanente no Subleito.....	43
Figura 21 - Deformação Permanente Total.....	44
Figura 22 - Gráfico da Trinca Tipo Couro de Jacaré.....	45
Figura 23 - Gráfico de Trinca tipo Couro de Jacaré do Ponto Máximo por Simulação	45
Figura 24 - Gráfico do IRI.....	46
Figura 25 - Gráfico de IRI do Ponto Máximo por Simulação	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

AASHTO	American Association for State Highway and Transport Officials
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CBR	California Bearing Ratio
CEASA-GO	Centrais de Abastecimento de Goiás S.A.
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobras
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNI	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOT's	Departamento de Transporte dos Estados Unidos
EICM	Enhanced Integrated Climate Model
FEM	Método de Elementos Finitos
FHWA	Federal Highway Administration
HCD	Dados climáticos horários (Hourly Climatic Data)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IS	Instruções de Serviços
IRI	International Roughness Index
Kip ESAL	Fator de Carga do Eixo Equivalente (Equivalent Single Axle Load)
LTPP	Long Term Pavement Performance
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MEPDG	Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
MLET	Teoria Elástica Multicamadas
MR	Modulo de Resiliência
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
SisPavBR	Sistema de Pavimentos Brasileiro
TMG	Traffic Monitoring Guide
UTC	Coordenadas Universais de Tempo
ISC	Índice de Suporte California

SÍMBOLOS

%	Porcentagem
cm	Centímetros
d	Dia
FC	Fator de carga
FE	Fator de eixo
FR	Fator climático regional
ft	Pés
FV	Fator de veículo
FV	Fator de Veículo
h	Hora
in	Polegadas
k1, k2, k3, k4	Parâmetros de resiliência
km	Quilômetro
kN	Quilograma Newton
m	Metro
mi	Milhas
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
mph	Milhas por hora
N	Número de passadas equivalentes de eixo padrão
P	Período de projeto
psi	Pressão
t	Toneladas
tonf	Toneladas força
Vm	Tráfego médio diário
°C	Graus Celsius

Letras Gregas

σ	Tensão
ε	Deformação
μ	Índice de Poisson

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia de pavimentos, conforme Santos (2020), o desempenho das estruturas de pavimentos flexíveis refere-se à capacidade de suportar as cargas de tráfego ao longo do tempo, preservando suas características estruturais e funcionais. Esse desempenho é avaliado por meio de modelos que simulam o acúmulo de danos específicos em um pavimento ao longo de um determinado período. Para garantir um bom desempenho, é essencial estudar e observar a situação das condições locais no ambiente onde essas estruturas serão projetadas e instaladas, e entender quais parâmetros são fundamentais para esses comportamentos.

A malha rodoviária brasileira é composta, na maioria, por pavimentos asfálticos (MADUREIRA, 2022). Esses pavimentos, são estruturas de múltiplas camadas cujas espessuras variam em função das propriedades mecânicas do material que as compõem. Convencionalmente são divididas em quatro camadas principais, sendo elas, revestimento asfáltico que é composto por misturas de agregados de diferentes graduações, fíler e ligantes asfálticos derivados de petróleo, que impermeabiliza e protege as demais camadas contra as ações do clima, como temperatura e umidade (BERNUCCI *et. al.* 2022). Os materiais da base são constituídos por agregados, solos e, caso necessário, aditivos como cimento e emulsão asfáltica. A sub-base possui a função de auxiliar a base diminuindo sua espessura, tornando-se uma solução com menos recursos, e podendo conter os mesmos materiais. O reforço do subleito contribui para as camadas superiores, aliviando as solicitações caso o subleito, que por sua vez é o próprio terreno natural, seja de baixa capacidade de suporte (FERNANDES, 2016).

Essas estruturas, são sensíveis a diversas variáveis que ao longo do tempo podem provocar patologias no pavimento, como fendas, fissuras, trincas desgaste e afundamento (DNIT 005, 2003). De acordo com Albano (2005) e Franco (2007) o tráfego expressado em carga por eixos e número de repetições, as propriedades dos materiais, as condições de suporte do subleito, as particularidades dos processos construtivos e a influência do clima podem atentar contra o bom desempenho dos pavimentos flexíveis.

Desde o ponto de vista estrutural, os pavimentos asfálticos estão sujeitos a deformações significativas sob o carregamento aplicado pelo tráfego de veículos. Dessa forma, a carga é distribuída em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006). Um dos métodos mais conhecidos para calcular essa carga é através do número equivalente (N), na qual é determinado a quantidade de eixos simples de roda dupla padrão com peso de 8,2 t que

irá passar durante o período de projeto escolhido. Alguns métodos como o *American Association for State Highway and Transport Officials 1997* (AASHTO) e o DNIT 2006, convertem a passagem de veículos de diferentes cargas e configurações de eixos, em um número de repetições de eixo padrão para o período de projeto. (BERNUCCI et al. 2022). No entanto, existem outras metodologias de dimensionamento que tratam o tráfego a partir de espectros de carga onde são consideradas a configuração, distribuição, número e magnitudes das repetições de carga de maneira independente (FONTENELE, 2011).

Conforme o pavimento resiste as solicitações feitas pelo tráfego, as condições dos materiais das camadas do suporte do subleito são afetadas. Diante disto, conhecer as principais características e propriedades mecânicas dos materiais da região, é essencial para selecionar as melhores opções de projeto. Ensaios mecânicos como o I.S.C., CBR, Módulo de Resiliência e Resistência à Fadiga são os principais para essa avaliação (SANTOS, 2020).

De acordo com o DNIT (2006) é recomendado que os materiais da base possuam um valor que seja igual ou superior a 80% com uma expansão menor ou igual a 0,5%. Para o sub-base é preciso apresentar CBR maior ou igual a 20% e uma expansão menor ou igual a 1%. Já para o reforço do subleito somente é necessário ter um CBR maior que o subleito, que por sua vez precisa ter um valor superior a 2%, caso contrário, é fundamental realizar a troca de material.

O Modulo de Resiliência (MR), é utilizado para o cálculo de tensões e deformações nos diferentes pontos do pavimento. Os materiais de cada camada possuem deformações elásticas recuperáveis, plásticas ou permanentes. Mesmo que o solo seja homogêneo, o valor do MR aumentará com a profundidade, e as tensões-desvio diminuiram, em vista disso, o solo do subleito, onde as tensões solicitadas pelas cargas do tráfego já estão bastante reduzidas, resulta em um MR consideravelmente maior que se o mesmo material fosse utilizado como base ou sub-base do pavimento (BERNUCCI, 2022).

Assim, entender como o subleito se comporta mecanicamente é fundamental, já que a partir desses conceitos é possível dimensionar a espessura das demais camadas. Como já visto, o subleito deve ter como mínimo um CBR de 2% para se manter no local, nesses casos em geral sugere trocar o solo, ou reforça-lo com cimento ou cal. Também é possível adicionar uma camada de material pétreo com dimensões acima de 60mm, para aumento do valor de suporte (BERNUCCI, 2022).

Além das camadas de solos, as propriedades do revestimento asfáltico também são determinadas pelo ensaio de MR juntamente com o de Resistência à Fadiga, que por sua vez, é a capacidade do material suportar a submissão de tensões e deformações repetidas vezes sem danificar a estrutura, expressada pelo número total de carga executada até sua ruptura. (DNIT 183/2018 - ME). De acordo com COLPO (2014), agregados com maior microtextura, junto ao formato angular do material, eleva a resistência a fadigas em misturas asfálticas, pelo fato do ligante possuir maior adesividade. O conhecimento desses parâmetros proporciona uma escolha adequada da mistura asfáltica usada no projeto.

A interação entre esses fatores estruturais e o ambiente climático desempenha um papel crucial no desempenho do pavimento. A influência climática, como temperatura e umidade, afeta diretamente a durabilidade e resistência do revestimento asfáltico, alterando as propriedades dos materiais (FACCIN, 2024). Isso ocorre porque variações climáticas, como temperatura, umidade relativa, precipitação, e incidência solar, afetam tanto os solos quanto o ligante asfáltico, interferindo no desempenho de resistência à fadiga (NCHRP, 2004). Portanto, considerar o clima regional torna-se fundamental para o projeto. No Brasil existe uma grande diversidade climática, havendo lugares com temperaturas elevadas e outros com temperaturas baixas, no entanto o clima tropical é o predominante na maioria do território (IBGE - Educa, 2024). Mattos (2014) afirma que existem diversos métodos, como o Murilo Lopez de Souza e Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), desenvolvidos no Brasil, e o norte-americano AASHTO, que analisam de forma mecânica - empírica o desempenho de pavimentos com base em dados de entrada do tráfego e clima.

O Método Murilo Lopes trás o nome do seu engenheiro desenvolvedor, que propôs um modo de desempenho do pavimento com base no Método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, no que se refere ao tráfego em função do número N de repetições. Seu cálculo é estimado pela taxa de crescimento de tráfego, período de projeto, fator de veículo, na qual considera um fator de carga e de eixo, e o fator climático regional. Nessa última variável, ao levar em conta as alterações da umidade do solo no pavimento durante as diferentes estações do ano, deve-se multiplicar o número N por um coeficiente (F.R.), que varia de 0,2, quando domina baixos teores de umidade, e a 5,0 quando os materiais estão praticamente saturados. Além disso, a capacidade de Suporte do Subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo C.B.R. (SOUZA, 1981).

Em relação ao Método MeDiNa, trata-se de um método mecanístico-empírico que verifica através de um software o dimensionamento de estruturas de pavimentos. O modelo calcula o desempenho através dos critérios de ruptura, utilizando informações baseadas em danos de deformação permanente ou afundamento de trilha de roda (ATR), dano de fadiga e espessura das camadas (ALMEIDA, 2021). Contudo, o fator climático não está como dados de entradas do programa, porém ele é levado em consideração nos cálculos de desempenho, mediante a umidade ótima dos materiais.

O guia da AASHTO *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) é um método que utiliza princípios mecanístico-empíricos para avaliar o desempenho de pavimentos. Através do software simula como a estrutura do pavimento se comporta diante das cargas e condições ambientais, estimando as deformações e deteriorações, como trincas tipo couro de jacaré e o *International Roughness Index* (IRI) ao longo do tempo (AASHTO, 2008). Desenvolvido para substituir o Guia AASHTO de 1993, o MEPDG se diferencia ao prever múltiplos indicadores de desempenho e ao integrar diretamente materiais, projeto estrutural, clima, tráfego e sistemas de gerenciamento de pavimentos. No Brasil, o uso do software ainda se baseia em bancos de dados climáticos norte-americanos, sem uma equivalência direta para as condições climáticas brasileiras (BRITO, 2016; IBGE, 2024).

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente existe a tendência tanto no âmbito nacional quanto internacional de utilizar métodos empírico-mecanísticos para o dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis, em que relacionam ensaios laboratoriais e de campo com o desempenho do pavimento. Para isso, é essencial estabelecer uma estrutura e avaliar as respostas estruturais do pavimento em termos de tensão, deslocamento e deformação. Logo, por meio de funções de transferência de evolução de danos, é possível prever o comportamento da estrutura durante certo período. A maioria dos métodos empírico-mecanísticos utilizados no Brasil apresentam algumas deficiências relacionadas com as variações dos fatores climáticos e sua influência no comportamento das estruturas de pavimento. Por exemplo, o método do DNER aborda o tema de forma padronizada utilizando coeficientes para inferir a influência da umidade no solo durante a vida útil do projeto. O MeDiNa, carecia de dados relacionados a curva característica, que são importantes em regiões com climas e microclimas diversos, por não ser exigida em seus estudos (TEIXEIRA, 2022).

De outra forma, o MEPDG oferece um amplo banco de dados com as variações horárias dos parâmetros climáticos, temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa e cobertura de nuvens. Porém, estes dados estão disponíveis apenas para estações climáticas dos Estados Unidos da América. Os trabalhos de Fontenele (2011) e Pelisson (2013 e 2015) foram desenvolvidos no Brasil utilizando o MEPDG e tomaram como base climática as disponíveis no software. Este procedimento requer bastante atenção, ao determinar um ambiente similar entre cidades brasileiras e norte-americanas, buscando uma semelhança climática, menores que sejam suas diferenças, ainda não permitem uma associação direta, para efeitos de comportamento das estruturas. A variação dos fatores climáticos pode proporcionar diferenças significativas na avaliação da estrutura do pavimento entre dois países. (BRITO, 2016).

A efetivação do MEPDG exige uma quantidade significativa de dados, assim como a calibração local do desempenho do pavimento e funções de transferência (Li 2019). Segundo Witczak (2012), as causas de alguns problemas envolvidos na implementação do MEPDG em países latino-americanos são:

- Os dados climáticos pertencem às estações meteorológicas dos Estados Unidos e Canadá;
- O MEPDG é aplicado a somente treze categorias de veículos, enquanto países como o Brasil contêm mais de trinta tipos de veículos;
- As características dos materiais presentes na América Latina são diferentes às dos utilizados nos Estados Unidos;
- As funções de transferência foram calibradas para condições de clima, materiais e cargas distintas às do Brasil.

Apesar das dificuldades existentes, o MEPDG ainda é um dos métodos de dimensionamento mecânico-empírico mais importantes para o continente americano. E isto serve de guia para a maioria das propostas de novas metodologias na América Central e do Sul (KURNIA, 2017). Nesse contexto, torna-se essencial avaliar a influência das variáveis climáticas no desempenho de estruturas de pavimento flexível, utilizando critérios mecânico-empíricos do guia MEPDG, através da modificação da base de dados climáticos

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência das condições climáticas da cidade de Goiânia no desempenho de uma estrutura de pavimento flexível a partir dos critérios empíricos mecanísticos do guia *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)*.

Objetivos específicos

A partir do objetivo principal, surgiu a necessidade de planejar os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico detalhado sobre os principais métodos de dimensionamentos utilizados no Brasil e no Exterior, a fim de entender qual o estado da arte da problemática estudada.
- Definir as variáveis de controle que serão utilizadas para avaliar o desempenho de estruturas de pavimento na região objeto de estudo.
- Estudar a formatação dos dados climáticos necessários para as simulações de desempenho do pavimento flexível.
- Avaliar a formatação e disponibilidade de dados climáticos na região objeto de estudo, de tal maneira que possa ser utilizado no guia MEPDG.
- Definir uma estrutura de pavimento flexível objeto de estudo e avaliar seu desempenho em função das variações climáticas regionais.
- Realizar, por meio de simulações, uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros climáticos no desempenho de estruturas de pavimentos flexíveis na região objeto de estudo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho será dividida em quatro etapas, listadas a seguir:

1. Revisão bibliográfica: onde será apontado os principais métodos de dimensionamentos mecanístico-empírico utilizados no Brasil e nos Estados Unidos, buscando mostrar como são abordadas as variáveis de projeto e entender suas limitações.

2. Metodologia: onde se definem os parâmetros para o dimensionamento de acordo com os critérios do guia MEPDG. Se estabelecem as variáveis de projeto, como o tráfego, materiais do subleito e das camadas de suporte junto com o revestimento, a partir de estudos e materiais característicos da região. A base climática será adaptada no software MEPDG a partir da formatação e disponibilidade de dados da região.
3. Análise dos Resultados: Após a realização das simulações utilizando o método do guia MEPDG, serão analisados os resultados obtidos por meio de uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros climáticos no desempenho de estruturas de pavimento flexível."
4. Referências: Divulgação das referências bibliográficas que servirão como consulta e citações para a elaboração do documento.

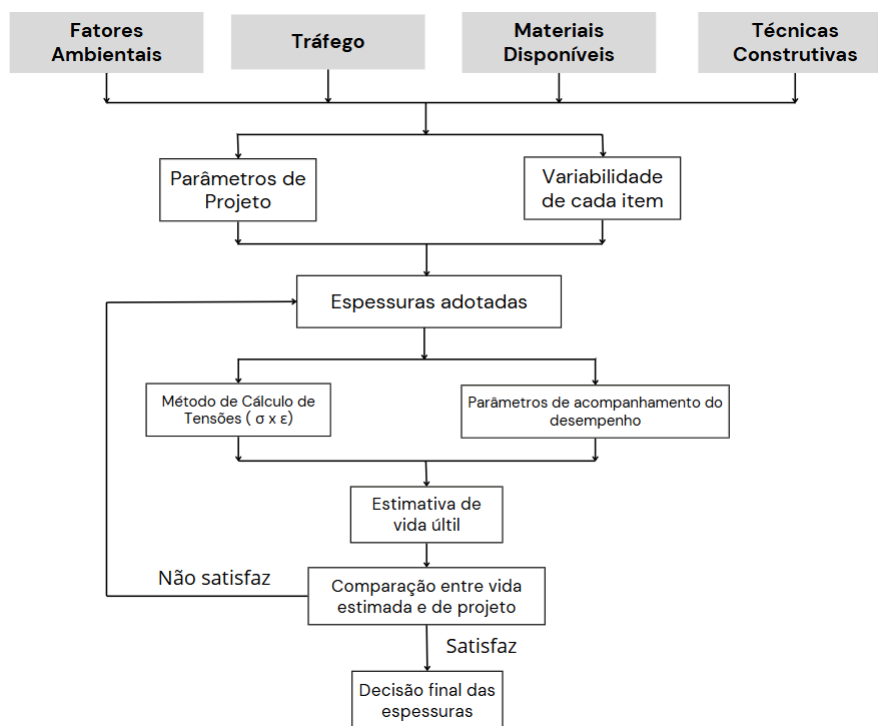
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As metodologias para dimensionar uma estrutura de pavimento podem variar amplamente, dependendo dos tipos de materiais, normas aplicadas, técnicas adotadas e experiências locais. Dessa forma, a aplicação de diferentes métodos resulta em estruturas distintas, que podem ou não suportar os esforços previstos durante o período de projeto. Por isso, é fundamental contar com uma metodologia de dimensionamento que permita a concepção de um modelo de pavimento próximo ao comportamento real esperado. Por meio de simulações, é possível definir a estrutura mais adequada às condições específicas do ambiente (SANTIAGO, 2017).

A evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos pode ser observada desde os métodos empíricos, que inicialmente serviam para classificar solos e determinar as espessuras das camadas dos pavimentos, através do Índice de Grupo e CBR. Esses métodos, embora úteis, apresentam limitações significativas, pois dependem de condições climáticas, materiais e cargas específicas, o que restringe sua aplicação. Para superar essas limitações, os métodos mecanístico-empíricos surgiram como uma alternativa mais desenvolvida, considerando as propriedades mecânicas dos materiais por meio de avaliações de desempenho e ensaios de laboratório, permitindo prever falhas, como deformações permanentes e trincamento por fadiga (HUANG, 2004).

No Brasil, Motta (1991) foi uma das pioneiras a propor um método mecanístico-empírico, sugerindo que ajustar progressivamente as variáveis de projeto e utilizar uma base teórica sólida, proporciona estruturas mais racionais e eficientes de dimensionamento. A Figura 1 apresenta o esquema desse método. A importância dessa abordagem é evidenciada pela tendência crescente entre os pesquisadores brasileiros de comparar os resultados desses modelos com os obtidos por métodos empíricos e semiempíricos ainda amplamente utilizados (RODRIGUES, 2023).

Figura 1- Fluxograma de método mecanístico.



Fonte: Adaptada pelo autor, baseado em Motta, 1991.

Franco (2007) afirma que o procedimento para o dimensionamento mecanístico-empíricos consiste basicamente em:

- Reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais;
- Correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;
- Escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;
- Relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas pode causar ao pavimento por meio de modelos de previsão;

- Verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

Ao observar o fluxograma e os procedimentos apresentados, é possível perceber que os dados de entrada, como o os materiais, clima e tráfego, e os modelos de comportamento e desempenho do pavimento são tratados de maneira particulares, variando suas características em função da situação da região e cultural dos países que os desenvolveram (FRANCO, 2007). Ao adotar essa metodologia, é observado que ao aumentar as espessuras das camadas não necessariamente resulta em maior resistência às solicitações de tráfego, diferentemente do que ocorre nos métodos empíricos (PELISSON, 2015).

Diversos métodos empíricos e mecanístico-empíricos são aplicados globalmente, com adaptações específicas para cada região. A busca contínua por melhorias e inovações nesses métodos é impulsionada pela evolução do conhecimento e da tecnologia, permitindo que sejam mais adequados às realidades locais (SANTIAGO, 2017). Assim, analisar as experiências internacionais é crucial para desenvolver modelos de dimensionamento que reflitam com precisão as condições regionais e contribuam para a eficiência e durabilidade das estruturas de pavimento.

2.1 MÉTODO DNER

Uns dos métodos oficiais de dimensionamento de pavimentos flexíveis adotado no Brasil é fundamentado no Índice de Suporte Califórnia (CBR - *California Bearing Ratio*), que representa um método empírico de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido em 1966 pelo DNER, que é o atual DNIT (FERNANDES, 2016).

Na atualidade esse método empírico ainda é utilizado, em alguns casos, para a realização de projetos no Brasil e pelo mundo, porém com a evolução do tráfego e conseqüentemente com o aumento das cargas transportadas, esse método se tornou ultrapassado e foram precisos estudos para desenvolver novas técnicas, com base literária, para dimensionar as novas estruturas (BERNUCCI et. al. 2022). Em referência ao método CBR, as razões estão ligadas ao congelamento do subleito, a não considerar as propriedades dos solos tropicais, a descrição do tipo de carregamento, ao método construtivo, as condições climáticas, entre outros. (FRANCO, 2007).

A maior limitação método empírico DNER é não ser um modelo universal com confiabilidade adequada para outras condições senão as quais foram desenvolvidos, possuindo

uma análise resumida sobre a situação e as individualidades das inúmeras variáveis que influenciam no desempenho estrutural e funcional do pavimento. Apesar dessas limitações, o modelo mecânico-empírico não deixou de ser utilizado (FRANCO, 2007; FERNANDES, 2016).

No entanto foram desenvolvidos métodos nacionais que buscaram utilizar o estado adequado e as condições reais do país. O método Murilo Lopes propôs um modo de desempenho de pavimento baseado no Método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER, e baseia-se resultados do *The AASHTO Road Test.*, O tráfego é expressado em função do número equivalente de repetições de um eixo tomado como padrão N, estimado pela taxa de crescimento de tráfego, período de projeto, fator de veículo, na qual considera um fator de carga e de eixo, por último o fator climático regional (SOUZA, 1981).

2.1.1 Características físicas e mecânicas dos materiais da estrutura

Nesse método, a capacidade de Suporte do Subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo C.B.R., adotando o procedimento de ensaio orientado pelo DNER, através de corpos-de-prova adaptados em laboratório para as condições de massa específica aparente e umidade para o serviço. Considera tanto aspectos estruturais quanto ambientais, para garantir a durabilidade do pavimento em função de variações de tráfego e clima. Além disso, o método adota coeficientes de equivalência estrutural para ajustar as espessuras das camadas de pavimentos (SOUZA, 1981).

O DNIT recomenda valores mínimos de CBR, e de outros ensaios, para os materiais constituintes do pavimento do suporte do subleito, havendo uma espessura máxima de compactação das camadas granulares de 20 cm e a espessura mínima construtiva das camadas com o mesmo material é de 15 cm (SOUZA, 1981). Esses materiais estão classificados da seguinte forma (Tabela 1)

Tabela 1- Características de camadas de pavimentos.	
Material	Características
Materiais para reforço do subleito	CBR maior que o subleito Expansão $\leq 2\%$
Materiais para sub-base	CBR $\geq 20\%$ IG = 0
Materiais para base	Expansão $\leq 1\%$
	CBR $\geq 80\%$
	Expansão $\leq 0,5\%$
	Limite de Liquidez $\leq 25\%$
	Índice de Plasticidade $\leq 6\%$

Fonte: SOUZA (1981).

2.1.2 Tráfego

O tráfego é um dos principais elementos considerados no dimensionamento, onde utiliza o conceito de número de passadas equivalentes de eixo padrão (N), calculado com base no tráfego médio diário (Vm), período de projeto (P), fator de veículo (FV) e um fator climático regional (FR). Esse último ajusta o dimensionamento de acordo com a intensidade de chuvas e outras condições climáticas adversas, como altas temperaturas (SOUZA, 1981). Na Figura 2 se mostra um esquema do eixo rodoviário padrão utilizado no dimensionamento.

Figura 2- Eixo Padrão Rodoviário.



Fonte: FRANCO (2023).

Os dados do eixo padrão são os seguintes: carga de eixo de 8,2 tonf, pressão dos pneus de 0,56 MPa, raio da área de contato de 10,79 cm e distância entre rodas de 32,4 cm.

Para o cálculo do Vm para as solicitações ao longo dos anos, é necessário adotar uma taxa de crescimento de tráfego para o período de projeto. Essa taxa de crescimento deve ser considerada, o histórico de crescimento do tráfego da via a ser pavimentada, no caso de uma via nova, analisa a contribuição das vias existentes que atendem à mesma ligação. Além disso,

é importante somar o tráfego gerado, que passa a existir a partir das melhores condições oferecidas pela pavimentação (DNIT, 2006).

O fator de veículos (FV) permite que o tráfego real que solicita o pavimento durante o período de projeto, se transforma em eixos padrão durante o mesmo período, através do produto do FE (fator de eixo) pelo FC (fator de carga), na qual, para realizar o cálculo, é necessário conhecer a composição de tráfego (SOUZA, 1981).

Além disso, para calcular o Fator de Veículos FV, são utilizados os dados obtidos por uma balança de controle de carga. Por meio de cálculos dos fatores de eixo, é possível definir o volume de tráfego médio diário, que junto com outros elementos, é capaz de determinar o dimensionamento do tipo de material mais apropriado e da espessura de cada camada do pavimento. Os tipos de eixos são características próprias dos veículos, que podem ser de rodas simples e duplas, tandem duplos e triplos, visto que para cada tipo de eixo corresponde um fator, relacionado a um eixo padrão de 8,2t (FRANCO, 2007).

2.1.3 Fator climático

As variações de umidade dos materiais do pavimento durante o ano alteram a capacidade de sustentação na estrutura, esse agente é o Fator Climático Regional. Com o objetivo de considerar as mudanças de umidade dos materiais do pavimento ao longo as diferentes estações do ano, é necessário utilizar o parâmetro de tráfego do número equivalente de operações de eixo padrão, para multiplicar por um coeficiente (FR), podendo variar de 0,2 em ocasiões que prevalecem baixos teores de umidade, a 5,0 em casos que os materiais estão praticamente saturados pela água (DNIT, 2006).

No Brasil são sugeridos fatores climáticos regionais, em função da altura média anual de chuva em mm, representados na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Fator Climático - FR.

Altura Média Anual De Chuva (Mm)	Fator Climático Regional (Fr)
Até 800	0,7
De 800 a 1.500	1,4
Mais 1.500	1,8

Fonte: SOUZA (1981)

2.2 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO NACIONAL (MeDiNa)

O MeDiNa é o outro método oficial de dimensionamento adotado no Brasil, representado por um programa computacional desenvolvido por meio de um acordo entre o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade do Rio de Janeiro (COPPE), e com o apoio do Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) e de outras Universidades brasileiras, com o objetivo de investigar o dimensionamento mecânico-empírico das estruturas de pavimento asfáltico e atualizar as técnicas utilizadas no Brasil (DNIT, 2020).

Segundo o Franco; Motta (2020) as premissas fundamentais do programa Medina são baseadas na solução dos problemas de elasticidade linear em sistemas de análise de múltiplas camadas, sendo elas:

1. Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
2. A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
3. As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
4. Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
5. A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
6. Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
7. A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
8. A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
9. As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

De forma abrangente, o MeDiNa dimensiona o reforço da estrutura do pavimento com base na curva de fadiga do material de reforço, na deformabilidade dos materiais, e na previsão de trincamento. Os módulos de elasticidade das camadas são determinados por retroanálise das bacias de deflexão, utilizando o software BackMeDiNa para obter esses parâmetros. (BERNUCCI *et.al.* 2022).

2.2.1 Caraterísticas físicas e mecânicas dos materiais da estrutura

No programa, a estrutura inicial é composta pelo subleito e quatro camadas que podem ser todas alteradas para atender às necessidades do projeto, permitindo no mínimo três e, no máximo oito, contando com o Subleito.

Os dados do subleito e das outras camadas do pavimento, a respeito da curva de deformação permanente e das propriedades dos materiais utilizados, precisam ser obtidos por meio de ensaios de laboratório. No entanto, existem parâmetros pré-estabelecidos que o programa fornece, como as misturas asfálticas e cimentos. (FRANCO, 2023).

O autor ainda comenta que os materiais para os subleitos são representados pelos parâmetros de Módulo de Resiliência e Coeficiente de Poisson e Deformação Permanente, por meio de representações semelhante aos granulares, finos, siltosos e argilosos. Contudo, o dano por fadiga nem a tensão limite no topo do subleito são avaliados no programa MeDiNa.

A respeito do cálculo para deformações permanentes, o programa MeDiNa utiliza o modelo proposto por Guimarães (2009) para avaliar os materiais, que consiste em um modelo mecanístico-empírico para previsão de deformação permanente situados em solos tropicais e também outros componentes que constituem a estrutura. O estado de tensões é calculado nos pontos sob a roda e entre as rodas, com uma profundidade de 25cm do topo do subleito. A deformação permanente calculada para cada camada é somada para compor a deformação permanente total utilizada no dimensionamento (FRANCO; MOTTA 2020).

2.2.2 Tráfego

O novo método determina um procedimento de cálculo pelo resultado das tensões, deformações e deflexões nas estruturas, conforme o tráfego previsto ao longo dos anos, assim obtendo os dados acumulados com o tempo. No programa, a carga da roda do veículo é uma das primeiras variáveis a serem definidas, sendo representada uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre a superfície do pavimento e o pneu. Dessa forma, a pressão de contato entre os dois elementos é assumida como se fossem iguais a pressão interna dos pneus, pelo fato de não existir um padrão e nem dados o suficiente sobre as configurações das rodas e pneus brasileiros. Contudo, a área de contato depende da pressão dos pneus e da carga de roda (FRANCO, 2023).

Ainda no software, o Eixo Padrão Rodoviário é utilizado nas análises de estruturas de pavimento. Essa escolha foi feita com base na calibração dos modelos de fadiga, que consideram a comparação entre a evolução da área trincada e o número estimado de passagens do eixo padrão (FRANCO; MOTTA 2020).

Assim, o tráfego é representado e calculado no programa como o Número Equivalente de Passagens do Eixo Padrão Rodoviário de maneira similar ao exposto no método do DNER. O Número N, se mostra sensível a pequenas variações, portanto uma base apurada é bastante crucial para o programa, sendo recomendável utilizar os dados com precisão adequada, a fim de impedir erros de projeto (BERNUCCI *et. al.* 2022). Com base nessas informações, o Medina calcula o Número Anual Equivalente de Eixos (N anual) automaticamente.

No programa, a espessura da camada asfáltica depende do tráfego, estando limitada entre 5 cm e 15 cm, já as camadas granulares estão sujeitas em um intervalo de 15 cm a 40 cm (FRANCO, 2023). O DNIT 2006 recomenda espessuras mínimas da camada de revestimento betuminoso para diferentes faixas de valores do Número N, representado na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Espessura mínima de revestimento betuminoso.

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: DNIT (2006)

O software MeDiNa também adota como critérios de ruptura as informações relacionadas aos danos por deformação permanente ou afundamento do trilho de roda (ATR) e dano por fadiga. Esses critérios são fundamentados em modelos de previsão de desempenho que permitem quantificar a diminuição do nível de serventia e o surgimento de patologias ao longo da vida útil do pavimento (ALMEIDA, 2022).

2.2.3 Fator climático

Nesta metodologia, o fundamento mecânico é utilizado para prever o comportamento do pavimento quando é submetido as ações do tráfego e clima, além disso, dedica-se a

compatibilizar as tensões atuantes no pavimento com a resistência dos materiais utilizados na estrutura (FRANSOZI, 2014).

O método apresenta uma novidade, onde possibilita a criação de catálogo de materiais e a utilização de curvas de desempenho, na qual proporciona uma melhor representação das previsões do comportamento no pavimento, resultantes das análises em condições reais observadas em campo. Esse cenário é vinculado por meio de estudos dos materiais e do clima em nível regional, sendo necessários procedimentos específicos para seu ajuste (RODRIGUES, 2023).

Dentre eles, o Instrução de Serviço - 247, é um estudo, desenvolvido pelo DNIT (2021), para elaboração de projetos de implantação usando o MeDiNa, na qual afirma que na versão atual do software é considerado todas as drenagens necessárias, sendo elas profundas ou superficiais, de forma que garante o rebaixamento do lençol freático abaixo do subleito, o bastante para não haver como saturar o solo até uma camada de 1,50 m a baixo da cota de greide da terraplanagem, assim, garante que o pavimento se mantenha na umidade ótima ou abaixo.

No entanto, existem algumas controvérsias em relação ao uso do fator climático no método MeDiNa. Segundo Teixeira e Pitangui (2022), em um artigo que análise e aponta sugestões para a IS-247, implica que, com base nas propriedades mineralógicas e físico-químicas dos materiais, a umidade contida no solo irá alterar ao decorrer do tempo até atingir uma determinada faixa de equilíbrio. Convencionalmente, essa consideração é realizada baseada na média anual, porém, existem regiões com climas diversos no Brasil, sendo necessário levar em conta a diferença em termos da curva característica e do comportamento do solo, para obter uma umidade crítica, mais compatível para o estudo do comportamento mecânico do solo para o projeto, que por sua vez, a curva característica não é exigida pela IS-247.

2.3 MÉTODO DA AASHTO

Um dos métodos de projeto mais utilizados na América do Norte é o Guia AASHTO. Em 1996, uma pesquisa revelou que 80% dos estados americanos utilizavam as edições de 1972, 1986 ou 1993. Versões posteriores do Guia AASHTO se basearam amplamente em dados exagerados dos resultados originais do *AASHTO Road Test*, com revisões publicadas em 1986 e 1993, além de um acréscimo ao Guia de 1993 lançado em 1998. Apesar de representarem avanços, esses métodos apresentaram limitações como deficiências no carregamento do tráfego,

dificuldades na reabilitação, efeitos ambientais restritos, limitações relacionadas ao subleito e incertezas na determinação da vida útil. (RODEZNO, 2011; AASHTO, 1986)

2.3.1 Caraterísticas físicas e mecânicas dos materiais da estrutura

O método AASHTO 93 apresenta limitações decorrentes de sua natureza empírica, baseando-se em equações desenvolvidas para condições específicas de subleito, ambiente e carga. Embora diferentes tipos de solos para subleitos existam nos Estados Unidos, o método considera parâmetros padronizados, resultando em desempenhos variados dependendo da região (AGUIB, 2021). No AASHTO 93, as equações de desempenho relacionam ciclos de carga ao comportamento da estrutura em termos de praticidade, considerando desgastes superficiais naturais. (FONTENELE, 2011; RODEZNO, 2011).

2.3.2 Tráfego

No modelo empírico AASHTO-93, o dimensionamento baseia-se na expectativa de acumulação dos 18 kip ESAL (Fator de Carga do Eixo Equivalente). Esse método converte o tráfego misto em ESALs, mas suas equações de dimensionamento foram projetadas para cargas inferiores a 2 milhões de ESALs, limitando sua viabilidade em situações de tráfego mais intenso. Além disso, os dados de entrada e saída são absolutos e não consideram incertezas no projeto, comprometendo a confiabilidade da solução proposta (AGUIB, 2021; RODEZNO, 2011).

O desempenho esperado do pavimento não pode ser totalmente garantido e deve ser avaliado pela probabilidade de sucesso em atender aos critérios de desempenho baseado no número de repetições de carga, utilizando o eixo padrão equivalente de 80 kN, ao longo da vida útil. A confiabilidade é definida como a chance de as cargas aplicadas não excederem o número suportado até o nível mínimo de serviço planejado. A evolução do tráfego, com aumento do volume e da pressão dos pneus após a década de 60, demandou o desenvolvimento de modelos mecanístico-empíricos, mais precisos e adequados às condições atuais (AASHTO, 1993; FONTENELE, 2011).

Um estudo de Aguib (2021) revelou que pavimentos projetados pelo AASHTO-93 frequentemente apresentam desempenho inferior ao esperado no final de sua vida útil. O Índice de Manutenção Atual (IMA) varia significativamente conforme os níveis de tráfego e as condições locais, evidenciando a necessidade de modelos mais avançados para o dimensionamento de pavimentos.

2.3.3 Fator climático

O método empírico AASHTO-93 apresenta limitações significativas na determinação da vida útil dos pavimentos, pois seus testes foram realizados em um período curto de dois anos, insuficiente para avaliar os efeitos de longo prazo das condições climáticas e do envelhecimento dos materiais. Além disso, os experimentos ocorreram em uma única localidade, Ottawa, Illinois, com ajustes limitados ao módulo de resiliência do subleito e coeficientes de drenagem para diferentes estações do ano, enquanto pavimentos são projetados para uma vida útil de 20 anos ou mais (RODEZNO, 2011; HALL, 2006).

Essas limitações tornam o método menos eficiente em várias regiões, já que as equações originais do projeto de pavimento foram desenvolvidas para um grupo restrito de pavimentos, com condições do subleito e tráfego específicos (OLIDIS; HEIN, 2004). A metodologia empírico-mecanística do "*AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*" (2008) surge como uma alternativa atualizada, calibrada com dados teóricos e experimentais, possibilitando análises mais detalhadas e coerentes do comportamento estrutural dos pavimentos.

De acordo com Fontenele (2011) e Rodezno (2011), o AASHTO 2008 é o guia mais recente e eficaz disponível. Ele combina modelos teóricos calibrados com dados experimentais, fornecendo uma abordagem mecanística-empírica que aprimora significativamente a avaliação do desempenho de pavimentos.

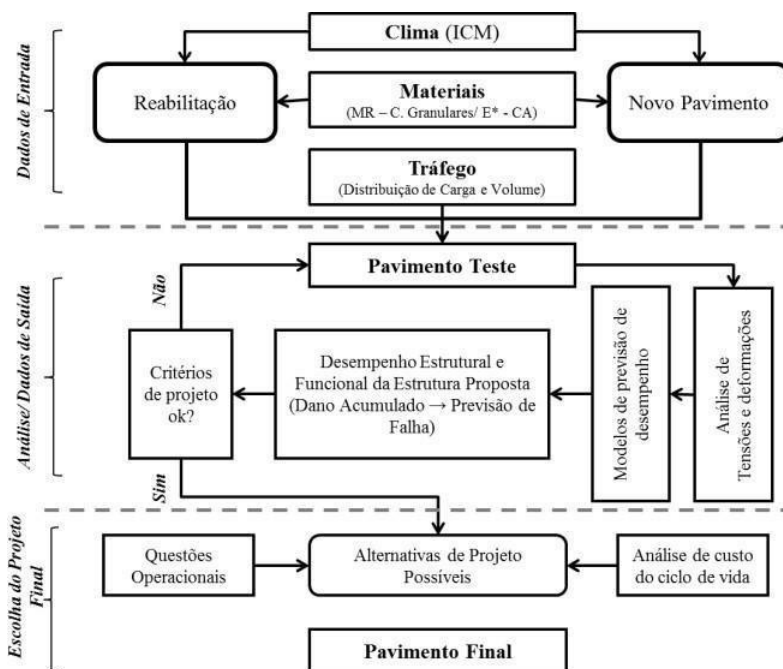
2.4 MÉTODO MEPDG

O *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)* foi desenvolvido para atualizar o Guia AASHTO de 1993, introduzindo uma metodologia mecanístico-empírica avançada. Criado no âmbito do *National Cooperative Highways Research Program (NCHRP) 1-37A* e projetos subsequentes, o guia foi concluído em 2004 e disponibilizado para revisão pública. (FONTENELE, 2011)

Em 2008, a AASHTO lançou uma edição provisória, com o objetivo de corrigir deficiências teóricas dos métodos anteriores e integrar materiais, projeto estrutural, construção, clima, tráfego e gerenciamento de pavimentos. Junto com o guia, a AASHTO desenvolveu o software *AASHTOWare Project*, iniciado no NCHRP 1-40 e continuamente atualizado desde 2002. Este programa oferece modelos sofisticados para calcular a resposta do pavimento e prever desempenho. (AASHTO, 2008; SANTIAGO, 2017)

Dessa forma, a sua modelagem segue os fundamentos básicos de um método mecanístico-empírico, conforme observado na Figura 3. O processo começa com a entrada de dados, como tráfego, clima e materiais; segue para análises estruturais e de desempenho; e finaliza com a interpretação dos resultados para tomada de decisão (NCHRP, 2004).

Figura 3 - Representação Esquemática do Processo de Dimensionamento pelo MEPDG.



Fonte: Elaborado por Santiago (2017), baseado em AASHTO (2008)

O Guia de Projeto utiliza um procedimento hierárquico que permite a liberdade do projetista na seleção de 3 níveis de entrada, com base na relevância do projeto e nas informações disponíveis. A hierarquia é apresentada na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Características dos níveis hierárquicos do MEPDG.

Nível	Fonte dos dados de entrada	Qualidade dos dados	Nível de recursos envolvido	Recomendado para:
1	Testes de Campo e de laboratório	Alto grau de certeza	Alto	Projetos específicos ou vias de maior importância
2	Fontes de dados secundários, equações de regressão, correlações ou testes limitados	Médio grau de certeza	Médio	Quando há limitações financeiras para realizar testes do nível 1
3	Valores estimados ou padrão para determinada região	Baixo grau de certeza	Baixo	Vias de menor importância

Fonte: Adaptada pelo autor, baseado em Kurnia (2017)

Embora o método MEPDG apresente grandes vantagens em relação ao método anterior, sua implementação nos departamentos de transportes estaduais dos EUA (DOT's) não ocorreu de imediato. Desde sua publicação inicial em 2004, várias agências rodoviárias estaduais começaram a avaliar o guia e planejar sua adoção. No Brasil, também foram realizados estudos sobre sua aplicação (SANTIAGO, 2017; AASHTO, 2008).

O MEPDG utiliza três modelos principais para calcular os resultados estruturais dos pavimentos. A Teoria Elástica Multicamadas (MLET) calcula tensões, deformações e deslocamentos para sistemas de pavimentos com materiais elásticos. Já o Método de Elementos Finitos (FEM) é usado para análises mais complexas, especialmente em materiais não lineares, enquanto o *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) avalia variações de temperatura e umidade que afetam o comportamento dos materiais (NCHRP, 2004; AGUIB, 2021).

Os modelos de análise do MEPDG estimam o desempenho ao longo da vida útil do pavimento, considerando problemas críticos como deformação permanente (trilha de roda), rachaduras por fadiga (de baixo para cima e de cima para baixo), trincamento térmico e rugosidade. A MLET apresenta limitações em lidar com não linearidades e segue premissas básicas, como a elasticidade linear e homogeneidade das camadas, enquanto o FEM calcula tensões e deformações em unidades subdivididas, sendo mais preciso, porém mais exigente em termos computacionais (HUANG, 2004; AGUIB, 2021).

2.4.1 Características físicas e mecânicas dos materiais da estrutura

Por meio do MEPDG, os parâmetros de análise de critérios por desempenho certificam uma apropriada avaliação do pavimento durante sua vida de serviço. No guia é permitido ao usuário fixar limites críticos, a fim de avaliar adequadamente um dimensionamento específico. Os valores padrão de defeitos em revestimentos asfálticos são ajustáveis de acordo com a necessidade do projeto, ou condições específicas. A Tabela 5 apresenta esses valores sugeridos pelo MEPDG (RODEZNO, 2011).

Tabela 5 - Valores limites recomendados para projetos teste.

Critério de Desempenho	Valor Máximo ao final da Vida de Serviço
Trincas Interligadas	Rodovias interestaduais: 10% da área da faixa Rodovias primárias: 20% da área da faixa Rodovias Secundárias: 35% da área da faixa
Deformação Permanente (Trilha de Roda)	Rodovias interestaduais: 0,40 in (10 mm) Rodovias primárias: 0,5 in (13 mm) Outras (< 45 mph, 75 km/h): 0,65 in (17 mm)
Trincas Térmicas	Rodovias interestaduais: 500 ft/mi (100 m/km) Rodovias primárias: 700 ft/mi (140 m/km) Rodovias Secundárias: 700 ft/mi (140 m/km)
IRI (Irregularidade)	Rodovias interestaduais: 160 in/mi (2,7 m/km) Rodovias primárias: 200 in/mi (3,3 m/km) Rodovias Secundárias: 200 in/mi (3,3 m/km)

Fonte: RODEZNO (2011).

Segundo Olidis e Hein, na publicação do NCHRP (2004), os materiais do pavimento e subleito foram divididos em nove categorias principais conforme o Projeto Mecanístico-Empírico de Novas Estruturas e de Pavimentos Reabilitados. Os grupos incluem:

- Materiais asfálticos misturados a quente (todas as camadas ligadas com cimento asfáltico incluindo estabilizado bases, camadas de drenagem graduadas abertas, etc.);
- Concreto de cimento Portland (usado como revestimento de pavimento);
- Materiais estabilizados quimicamente ou com cimento (materiais estabilizados com cimento, cinza volante e cal);
- Materiais não ligados (base/sub-base granular e subleito);
- Concreto reciclado (rachadura e vedação);
- Mistura asfáltica a quente reciclada (usada em novas misturas de concreto asfáltico);
- Concreto asfáltico misturado a frio reciclado (usado ou reciclado no local);
- Pavimento asfáltico reciclado (usado como base/sub-base granular);
- Base rochosa.

Materiais granulares, como os usados em bases e subleitos, podem apresentar comportamento dependente da tensão. Solos finos, como siltes e argilas, absorvem tensões, mas perdem capacidade de carga em níveis mais altos. Já materiais como areias e cascalhos se tornam mais resistentes com o aumento da tensão, refletindo sua capacidade de suportar cargas adicionais (OLIDIS; HEIN 2004).

2.4.2 Tráfego

A análise estrutural do pavimento pelo MEPDG depende fortemente dos dados de tráfego, que incluem o espectro completo de carga por eixo para cada tipo de eixo, diferente do método ESAL usado em versões anteriores, o MEPDG permite análises especializadas com configurações de eixos como tandem, tridem e quad, oferecendo maior precisão na representação do tráfego (AGUIB, 2021; AASHTO, 2008).

Segundo Rodezno (2011), não são todas as agências possuem ferramentas detalhadas para coleta de dados locais de projeto, então, o guia disponibiliza sistemas de tráfego padrão para entrada de informações. Alguns dados como volume inicial de caminhões, velocidade operacional, tipo e configuração de eixos, pressão dos pneus e fatores de crescimento de tráfego são essenciais para prever o carregamento na via e a frequência de solicitações durante a vida útil do pavimento. O MEPDG utiliza a classificação da *Federal Highway Administration (FHWA)* para estimar o número acumulado de caminhões pesados. A distribuição de classes de veículos funciona como um fator de ajuste, ajudando a calcular a carga total aplicada sobre a via, com foco em veículos da classe 4 ou superior (RODEZNO, 2011; AASHTO, 2008).

2.4.3 Fator climático

A inclusão dos efeitos climáticos no MEPDG, por meio do EICM, representou um grande avanço no projeto de pavimentos. O EICM avalia condições de temperatura e umidade dentro das camadas do pavimento e fundação, utilizando dados como temperatura horária, precipitação, velocidade do vento, cobertura de nuvens e umidade relativa, coletados de estações meteorológicas nos EUA. Estas informações se integram com a profundidade da água subterrânea, propriedades da superfície e da drenagem, além das características estruturais e materiais do pavimento (LEHMERT, 2020). Com base nos resultados do EICM, o método também calcula a tensão de tração na camada de revestimento (LEE, 2017) e assim é possível prever o desgaste do pavimento e ajustar as análises ao longo de sua vida útil, considerando os impactos ambientais (AASHTO, 2008; RODEZNO, 2011).

Segundo Lehmert (2020), a Tabela 6 e Tabela 7, a seguir, indicam as informações relacionadas as variáveis climáticas e a as informações gerais do pavimento respectivamente.

Tabela 6 - I formações relacionadas ao tempo.

Efeitos Climáticos Ambientais	Definição
Temperatura do ar por hora	Dados necessários para a fórmula do balanço de calor no EICM, a fim de calcular a radiação de longas ondas emitidas pelo ar, e para a transferência de calor convectiva da superfície para o ar e o período e número de ciclo de congelamento e descongelamento;
Precipitação horária	É utilizado para calcular a infiltração e envelhecimento do ligante asfáltico;
Velocidade do vento por hora	É utilizado para o cálculo da convecção de transferência de calor na superfície do pavimento;
Incidência solar	É inserida no cálculo do balanço de calor na superfície do pavimento.

Fonte: Adaptado pelo autor, baseado em Lehmert (2020).

Tabela 7 - Informações gerais do pavimento.

Informações gerais do pavimento	Definição
Mês e ano da construção do pavimento existente	Auxilia na determinação da rigidez e resistência da camada asfáltica, utilizados para identificar o tempo de vida do pavimento no momento da renovação. Se não tiver a informação, deve-se usar o mês mais comum de execução de pavimentos na região;
Mês e ano de abertura do tráfego	Estes parâmetros definem condições climáticas na data e relacionada com gradiente de temperatura e os módulos da camada asfáltica e as demais. Se não tiver a informação, deve-se usar o mês mais comum de execução de pavimentos na região;
Tipo de projeto.	Esta informação determina os insumos dos parâmetros de inicialização do modelo climático, esquemas das camadas do pavimento, tipos de saídas exigidas para análise climática, entre outros, que são necessários no projeto.

Fonte: Adaptado pelo autor, baseado em Lehmert (2020).

Como já mencionado, a umidade e temperatura são fatores críticos que influenciam diretamente a capacidade de suporte dos materiais do pavimento e do subleito. De acordo com Rodezno (2011), existem alguns efeitos climáticos nos materiais de pavimento, que destacam a importância de considerá-los no projeto, sendo eles:

- Os materiais asfálticos apresentam variações significativas no módulo, que pode atingir 2-3 milhões psi no inverno e cair para cerca de 100.000 psi no verão;
- A temperaturas abaixo de zero causam o congelamento da água nos solos, elevando o módulo resiliente em até 120 vezes;
- O excesso de umidade pode causar falta de adesividade, nas misturas asfálticas ou, a longo prazo, comprometer a integridade estrutural de materiais cimentícios.

Os dados climáticos usados pelo MEPDG são coletados em aproximadamente 800 estações meteorológicas nos EUA e Canadá, incorporadas ao software para facilitar sua implementação. Por esse motivo, é necessário informar o maior número possível de estações para que haja uma interpolação de dados, uma vez que o programa necessita de no mínimo 24 meses (2 anos) de dados e algumas estações não fornecem o suficiente (LEHMERT, 2020).

O projetista precisa apenas informar as coordenadas da longitude e a latitude do local, e o software selecionará automaticamente as seis estações meteorológicas mais próximas daquela região de projeto. Além disso, ao selecionar as estações, o usuário pode visualizar informações como longitude, latitude, elevação e o número de meses de dados disponíveis. Com base nessas informações, o software cria uma estação meteorológica para o local do projeto, possibilitando previsões relacionadas aos riscos climáticos (AASHTO, 2008).

No Brasil, a utilização do MEPDG e o EICM exige calibração para modelar dados locais, como precipitação acumulada e propriedades específicas dos materiais. Apesar dessa limitação, os dados padrão fornecidos pelo software são próximos aos valores reais. Estudos futuros devem abordar fatores como absorção de ondas curtas, módulo dinâmico, condutividade térmica e resistência à tração para adaptar o modelo às condições brasileiras (LEHMERT, 2020).

3 METODOLOGIA

A fim de atingir o objetivo deste trabalho, é necessário seguir a seguinte metodologia.

3.1 DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL DE CONTROLE E DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Como definido anteriormente na revisão bibliográfica as principais patologias que afetam as estruturas de pavimentos flexíveis se dividem em dois grandes grupos, trincas de diversos tipos e afundamentos por trilhas de rodas. A evolução destas patologias depende da relação de um grupo de fatores como o tráfego, propriedades dos materiais componentes, condições climáticas dentre outras.

Com objetivo de avaliar o desempenho de estruturas de pavimento flexível diante de variações climáticas na cidade de Goiânia será tomado como variável de controle a evolução do afundamento por trilha de rodas. Esta avaliação será realizada através de simulações computacionais utilizando o software *Desing Guide 2002*. As simulações serão realizadas tomando, como dados de entrada, as espessuras de camadas, propriedades de materiais e contagem de tráfego utilizadas por Novato (2021), onde é efetuado uma retroanálise de bacias de deflexão e dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos, das Centrais de Abastecimento de Goiás S.A (CEASA-GO). Já os dados climáticos serão obtidos a partir das bases de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3.1.1 Principais características do software *Desing Guide 2002*

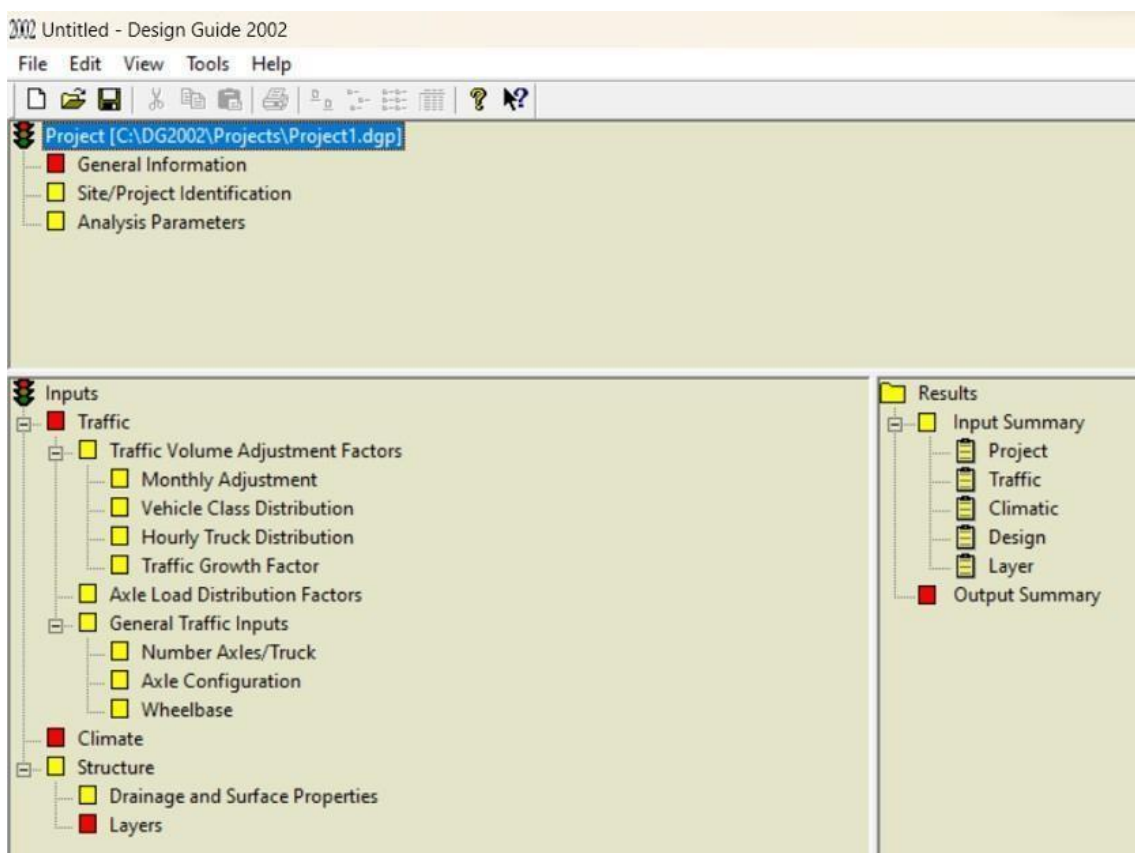
Inicialmente, é fundamental compreender a estrutura e a configuração do software, para então iniciar com os dados referentes à área de estudo. Na tela inicial do programa, representada na Figura 4, é possível definir as características básicas do projeto a ser desenvolvido. Na aba "Projetos", o usuário pode inserir informações gerais, como a data e o período de projeto, além de especificar a localidade e seus parâmetros gerais de desempenho, como os limites máximos de deformação permanente e do IRI.

Logo abaixo, encontram-se os locais para se inserir os dados de entrada, dentre eles, a configuração dos dados de tráfego, nos quais é possível incluir informações detalhadas sobre os veículos, como o volume de tráfego por hora, peso por tipo de veículo e a configuração de eixos. Além disso, o software disponibiliza um espaço para dados climáticos de entrada,

inicialmente fornecidos em unidades norte-americanas, com a possibilidade de importar estações meteorológicas dos Estados Unidos. Por fim, o projetista pode configurar a estrutura do pavimento, adicionando e editando os materiais específicos para cada camada, sejam elas de pavimento flexível ou rígido.

A partir disso, baseado nas informações disponíveis nesse trabalho, o nível hierárquico escolhido para compor estudo foi o Nível 3, na qual dispõe de valores estimados ou padrão para determinada região. A Figura 4 apresenta o ambiente do pré-processo no software.

Figura 4 - Ambiente do pré-processo no software.

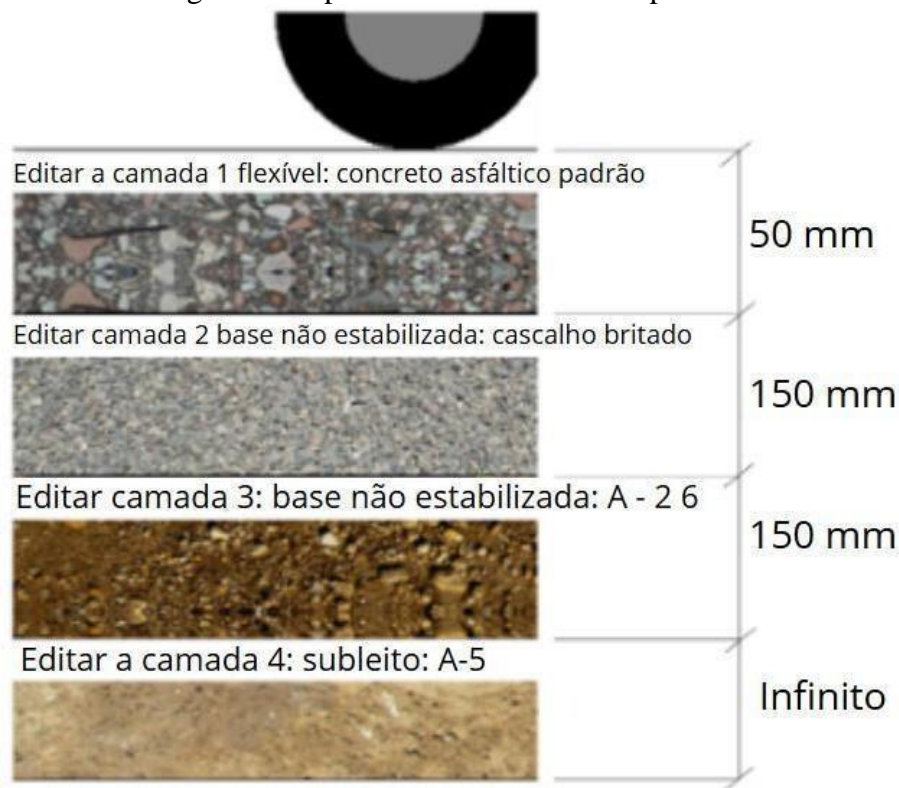


Fonte: Autor (2024)

3.1.2 Estrutura e Propriedade dos Materiais

A estrutura do pavimento utilizada será a natural do pavimento flexível, formada pelas camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base apoiadas no subleito, na qual a Figura 5 representa a espessura de cada uma delas.

Figura 5 - Espessuras das camadas do pavimento.



Fonte: Autor (2024)

Os dados do Módulo de Resiliência dos materiais utilizados pelo Novato (2021), foram provenientes de experiências de outros dois autores, Oliveira (2007) e Guabiroba (2020), onde os valores de MR adotados para as camadas de subleito, sub-base, base e revestimento foram de, respectivamente, 270 MPa, 368MPa, 369 MPa e 7658 MPa, na qual, configurados para o modelo resiliente não linear.

No entanto, outros valores, como a fadiga para o revestimento asfáltico, foram estimados de acordo com o material padrão do software Medina, que mais se aproximou do material utilizado no pavimento estudado. Os valores dos parâmetros de resiliência (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) para cada camada da estrutura foram retirados dos dados de laboratório de Oliveira (2007), também disponível no material do Novato (2021). As Tabela 8, a seguir apresenta a configuração dos materiais das camadas, fornecidas pelo software MeDiNa, que serão usadas como variáveis fixas de projeto para as simulações neste trabalho.

Tabela 8 - Configuração dos materiais de cada camada do pavimento.

REVESTIMENTO	
Propriedades do Concreto Asfáltico	Dados
Coefficiente de Poisson	0,30
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	7658
Tipo de CAP	CAP 50/70
Coefficientes de Regressão (k1)	$3 \cdot 10^{-11}$
Coefficientes de Regressão (k2)	-3,426
BASE	
Propriedades da Base	Dados
Coefficiente de Poisson	0,40
Modelo Constituinte	Resiliente Não Linear
Módulo (MPa)	369
Descrição do Material	87% RCD e 13% Solo Argiloso
Coefficientes de Regressão (k1)	0,0775
Coefficientes de Regressão (k2)	-0,2304
Coefficientes de Regressão (k3)	1,1428
Coefficientes de Regressão (k4)	0,0857
SUB-BASE	
Propriedades da Sub-Base	Dados
Coefficiente de Poisson	0,40
Modelo Constituinte	Resiliente Não Linear
Módulo (MPa)	368
Descrição do Material	75% RCD e 25% Solo Argiloso
Coefficientes de Regressão (k1)	0,0775
Coefficientes de Regressão (k2)	-0,2304
Coefficientes de Regressão (k3)	1,1428
Coefficientes de Regressão (k4)	0,0857
SUBLEITO	
Propriedades da Subleito	Dados
Coefficiente de Poisson	0,45
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	270
Descrição do Material	Argiloso Laterítico
Coefficientes de Regressão (k1)	0,32
Coefficientes de Regressão (k2)	-0,09
Coefficientes de Regressão (k3)	1,21
Coefficientes de Regressão (k4)	0,05
































Fonte: Adaptada pelo autor, baseado em Novato (2021)

3.1.3 Carregamento e Tráfego

Como mencionado anteriormente, o *Desing Guide 2002* considera como tráfego de projeto espectros de carregamento distribuídos em 13 categorias diferentes de veículos, levando em conta as configurações de eixos e os pesos por eixo (

Figura 6). Isso difere do método utilizado no Brasil, onde o tráfego de projeto é determinado pelo cálculo do número N, que representa a "conversão" de todo o espectro de cargas para um eixo padronizado, configurado como um eixo simples de roda dupla com uma carga de 8,2 toneladas.








Figura 6 - Classificação de categoria e veículos da FHWA, adotadas pelo MEPDG.

Classe 1 Motocicletas		Classe 7 Quatro ou mais eixos, quadro único	
Classe 2 Carros de passageiros		Classe 8 Quatro ou menos eixos, reboque único	
			
			
Classe 3 quatro pneus, único quadro		Classe 9 Semi reboque de trator de 5 eixos	
			
Classe 4 Ônibus		Classe 10 Seis ou mais eixos, reboque único	
			
			
Classe 5 Dois eixos, seis pneus, único quadro		Classe 11 Cinco ou menos eixos, multireboque	
			
Classe 6 Três eixos, único quadro		Classe 12 Seis eixos, multireboque	
			
			
		Classe 13 Sete ou mais eixos, multireboque	
			
			

Fonte: Classes de veículos FHWA adotadas pelo MEPDG (FHWA, 2014)

Para esse trabalho, foi utilizado os dados do tráfego de Oliveira (2007), na qual foi feita uma contagem volumétrica e classificatória de veículos no trecho experimental da CEASA em agosto de 2005, durante o período de duas semanas (Figura 7).

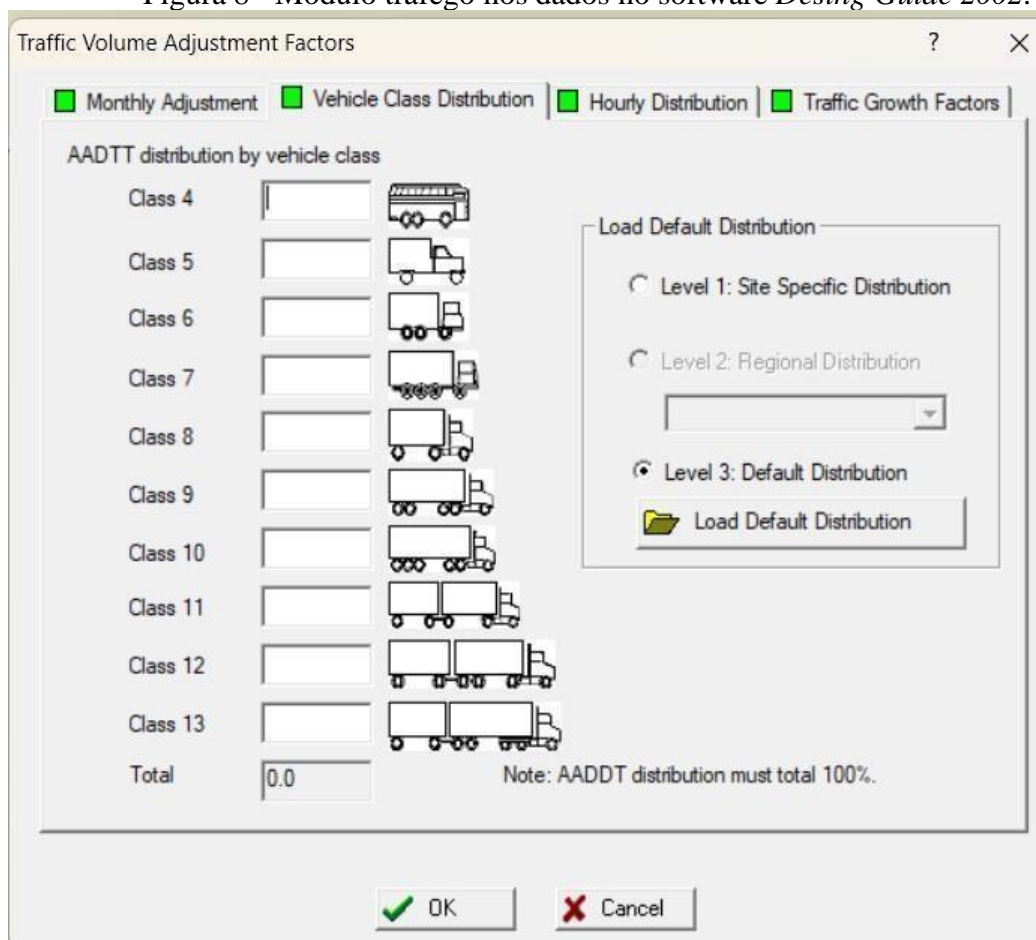
Figura 7 - Contagem de tráfego na pista experimental (CEASA) - agosto de 2005.

Veículo	Carro de passeio (Leve)	Caminhoneta (Leve)	Ônibus	Caminhão Simples	Caminhão Duplo	Semi-Reboque 2S2	Semi-Reboque 3S2	Total
								
VDM (UN)	947	292	1	242	63	3	1	1549
Percentual	61,1	18,8	0,1	15,6	4,1	0,2	0,1	99,9

Fonte: Oliveira (2007)

Apesar da contagem ter sido realizada 2005 e os dados estarem desatualizados, o objetivo do trabalho é somente alterar e as variáveis climáticas, por esse motivo não é necessário atribuir uma taxa de crescimento anual do tráfego, a fim de converter a carga dos veículos para os dias atuais. A Figura 8 apresenta os dados de entrada no módulo tráfego com configurações padrão do programa. Pelo fato de não possuir informações o suficiente dos pesos próprios dos veículos, foram utilizados os dados *default* do software.

Figura 8 - Módulo tráfego nos dados no software *Desing Guide 2002*.



Fonte: Autor (2024)

3.1.4 Módulo do clima

Em relação as informações do clima, o software *Desing Guide 2002*, utiliza o EICM, que se baseia em uma série histórica de dados climáticos para modelar os perfis de temperatura e umidade, avaliando a influência de diferentes variáveis no comportamento da estrutura. Estes bancos de dados estão disponíveis em unidades norte-americana e são organizados na seguinte sequência: data e hora, temperatura, velocidade do vento, porcentagem de incidência solar, precipitação e umidade relativa do ar. Na Figura 9 apresenta o módulo do clima assim como a base de dados histórico de todas as estações meteorológicas americanas.

Figura 9 - Módulo Clima no *Desing Guide 2002*.

Environment/Climatic

Climatic data for a specific weather station.
 Interpolate climatic data for given location.

Latitude (degrees.minutes)
Longitude (degrees.minutes)
Elevation (ft)

Seasonal

Depth of water table (ft)	
Annual average	10

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

Select weather station

- ANCHORAGE, AK
- ANCHORAGE, AK
- ANNETTE, AK
- BARROW, AK
- BETHEL, AK
- BETTLES, AK
- COLD BAY, AK
- CORDOVA, AK
- DEADHORSE, AK
- DEERING, AK
- DELTA JUNCTION/FT GREELY, A
- EAGLE, AK

Station Location:
(none)

Select Station
Cancel

Fonte: Autor (2024)

Dessa forma, é possível criar uma nova estação climática, seguindo a formatação do software, com os dados específicos da região do estado de Goiás, mais precisamente da cidade de Goiânia. O procedimento, essencialmente, consiste em aproveitar os valores meteorológicos de uma estação do EICM e inserir os dados necessários da cidade de Goiânia, disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), criando assim uma estação referentes à região de estudo. A partir disso, será criado uma HCD (*Hourly Climatic Data*, ou Dados

climáticos horários), a partir de dados, geralmente fornecidos por estações climáticas automáticas, que permitam a utilização do software. Para isso, é necessário verificar e adequar o formato dos dados fornecidos pelas estações meteorológicas disponíveis no INMET. Esse procedimento será baseado no relatório de Brito e Heller (2016).

Para a criação do HCD, que servirá como referência para o uso do EICM, é preciso entender como são fornecidos os dados pelo INMET. O site disponibiliza dados das estações meteorológicas convencionais, contendo três entradas por dia, com umidade relativa do ar, temperatura, precipitação, pressão e velocidade do vento, enquanto os dados climáticos das estações automáticas fornecem os mesmos dados, entretanto, com uma base horária completa. De acordo com o mapa de estações do INMET, Goiânia possui 2 estações convencionais e 1 estação automática, todas com dados desde a sua instalação Figura 10.

Figura 10 - Mapa das estações meteorológicas de Goiânia.



Fonte: INMET (2024)

Foram escolhidas como a principal fonte de dados para a elaboração do HCD, as planilhas das estações automáticas, incluindo os parâmetros de temperatura horária, precipitação, velocidade do vento, cobertura de nuvens e umidade relativa. Visto que as bases de dados se

encontram em formato UTC (Coordenadas Universais de Tempo), há a possibilidade de os dados exibirem algumas falhas de leitura ou de exibição ao baixá-las. Com esse pensamento, será necessário reduzir 3 horas das leituras feitas pela estação meteorológica, a fim de adequar o horário oficial de Brasília, restringindo assim, o último dia do período determinado para cada simulação que for realizada. Também será necessário realizar uma interpolação dos dados, caso algumas informações estejam faltando. Após estas formatações será possível inserir os dados no programa do EICM.

Em seguida, será realizado um estudo de sensibilidade dos parâmetros climáticos sobre o desempenho da estrutura do pavimento, por meio da execução de diversas simulações. Com o auxílio do módulo EICM será possível analisar a evolução do comportamento estrutural ao longo dos diferentes períodos simulados, identificando o grau de sensibilidade das variáveis climáticas na previsão da deformação permanente em pavimentos flexíveis.

3.1.4.1 A criação da estação climática

Em estudos feitos no Brasil, autores como Fernandes (2018), Pelisson (2015) e Brito (2016) utilizaram as bases de dados climáticas com circunstâncias semelhantes à da região de estudo. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar como orientação, para a criação de uma nova estação climática do HCD, a estação meteorológica de Miami, na Flórida (EUA), devido à semelhança dos valores climáticos com os de Goiânia. A escolha foi baseada na comparação das médias anuais das condições meteorológicas. O parâmetro utilizado dessa estação na criação do HCD foi a incidência solar, por não constar esse dado na base meteorológica do INMET.

Em Goiânia, a temperatura média mensal é de 23,44 °C, enquanto em Miami é de 24,60 °C. De forma similar, as precipitações médias mensais também apresentaram valores próximos: 105 mm para Goiânia e 92 mm para Miami (COELHO, 2021). No entanto, a escolha dessa estação como referência não leva em consideração a condição da umidade, tornando assim uma limitação nesse estudo. A Tabela 9 e Tabela - 10 a seguir, revela os valores mensais das condições climáticas da cidade de Goiânia e de Miami. Estes fatores evidencia a importância da definição da estação climática que será futuramente utilizada no software, como referência nos dados meteorológicos de Goiânia. Após feita essa escolha, no próprio software é possível realizar a criação e a importação da nova estação meteorológica. Esse procedimento está detalhado no tópico a seguir.

Tabela - 9 Valores das variáveis meteorológicas da cidade de Goiânia.

Goiânia	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Média mensal
Temperatura média (°C)	25	25	25	24	23	22	22	24	26	26	25	24	23,44
Temperatura mínima (°C)	21	21	21	19	17	15	15	17	19	21	21	21	20
Temperatura máxima(°C)	30	30	30	30	30	29	30	31	32	32	30	29	30
Chuva (mm)	225	200	176	84	21	8	4	12	46	110	185	229	105
Umidade (%)	85	84	88	82	36	7	1	5	5	28	85	8	32
Dias chuvosos (d)	24	21	21	11	4	1	0	2	7	15	21	25	13
Horas de sol (h)	13	13	12	12	11	11	11	12	12	12	13	13	12

Fonte: Weather Spark (2024).

Tabela - 10 Valores das variáveis meteorológicas da cidade de Miami.

Miami	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Média mensal
Temperatura média (°C)	20	21	22	24	26	28	28	28	28	26	24	22	24,60
Temperatura mínima (°C)	17	18	19	21	23	25	26	26	25	24	21	19	22
Temperatura máxima(°C)	24	25	26	28	29	31	32	32	31	29	27	25	28,5
Chuva (mm)	39	42	50	57	96	160	119	132	143	101	52	33	92
Umidade (%)	38	35	36	45	60	94	100	100	100	95	66	49	63
Dias chuvosos (d)	5	5	6	7	10	17	18	18	17	11	6	5	8,5
Horas de sol (h)	11	11	12	13	14	14	13	13	12	11	11	11	12

Fonte: Weather Spark (2024).

3.2 ANÁLISE DE DADOS

A primeira etapa metodológica deste estudo consistiu na elaboração de uma base de dados climáticos customizada, compatível com o software *Desing Guide 2002*, com o objetivo de viabilizar simulações do desempenho de pavimentos flexíveis. Para isso, foram coletados dados da Estação Meteorológica Automática de Goiânia, disponibilizados pelo Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET), abrangendo um período de seis anos, com início em 2019. Os dados foram obtidos em formato CSV.

Como os registros temporais da base estavam em horário UTM, foi necessário aplicar um ajuste de fuso horário, subtraindo três horas para adequação ao horário oficial de Brasília. Essa conversão resultou na perda de dados completos no último dia da série temporal, impossibilitando seu uso integral nas simulações. A Tabela 11 a seguir apresenta o período utilizado nas simulações.

Tabela 11 - Tabelas das datas de início e fim, recebidas e utilizadas nos HCDs.

Período de Anos	INMET UTM			Horário de Brasília		
	Início	Fim	Horas	Início	Fim	Horas
2019 até 2024	01/01/2019	31/12/2024	00h à 23h	31/12/2018	31/12/2024	00h à 21h

Fonte: Autor (2025)

Dos diversos parâmetros disponíveis, apenas seis foram considerados essenciais para a modelagem no software com as seguintes unidades de medida: data e hora, temperatura do ar (°F), umidade relativa (%), velocidade do vento (mph), precipitação (in) e incidência solar (%). Ressaltando que, como o parâmetro de incidência solar não é diretamente fornecido pela estação meteorológica local, para a criação do novo HCD, foi adotado o valor *default* (parâmetro padrão) do HCD da estação de Miami do próprio software, dado o perfil climático semelhante ao de Goiânia.

Durante a análise dos dados, foram identificadas lacunas e falhas de leitura na série histórica. Para solucionar esse problema, foi realizada interpolação dos dados faltantes. Após a interpolação, foi efetuado à conversão de unidades e à consolidação dos dados em uma única planilha, padronizada para a futura integração com o software.

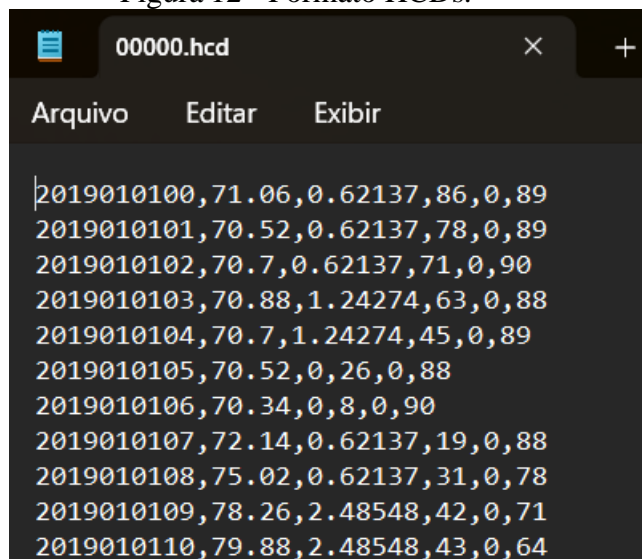
O formato requerido pelo programa é HCD (*Hourly Climatic Data*), o qual exige os dados organizados em ordem específica (data/hora temperatura, velocidade do vento, incidência solar, precipitação e umidade), separados por vírgula. Para atender a esse requisito, foi utilizada a função CONCAT no Excel, como mostra a Figura 11, de modo a unir todas as variáveis horárias em uma única célula por linha, facilitando a conversão da base para o formato HCD (Figuras 12).

Figura 11 - Planilha com o método de interpolação aplicado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		Data/Hora	Temp. Ins. (°F)	Vel. Vento (mph)	Incidência Solar (%)	Chuva (in)	Umi. Ins. (%)			Formato HCD
3		2019010100	71,06	0,62137	86	0	89			2019010100,71,06,1,86,0,89
4		2019010101	70,52	0,62137	78	0	89			2019010101,70,52,1,78,0,89
5		2019010102	70,7	0,62137	71	0	90			2019010102,70,7,1,71,0,90
6		2019010103	70,88	1,24274	63	0	88			2019010103,70,88,1,63,0,88
7		2019010104	70,7	1,24274	45	0	89			2019010104,70,7,1,45,0,89
8		2019010105	70,52	0	26	0	88			2019010105,70,52,0,26,0,88
9		2019010106	70,34	0	8	0	90			2019010106,70,34,0,8,0,90
10		2019010107	72,14	0,62137	19	0	88			2019010107,72,14,1,19,0,88
11		2019010108	75,02	0,62137	31	0	78			2019010108,75,02,1,31,0,78
12		2019010109	78,26	2,48548	42	0	71			2019010109,78,26,2,42,0,71
13		2019010110	79,88	2,48548	43	0	64			2019010110,79,88,2,43,0,64
14		2019010111	79,7	3,10685	43	0	61			2019010111,79,7,3,43,0,61
15		2019010112	80,78	1,24274	44	0	57			2019010112,80,78,1,44,0,57
16		2019010113	83,66	3,10685	29	0	52			2019010113,83,66,3,29,0,52
17		2019010114	85,64	3,10685	15	0	50			2019010114,85,64,3,15,0,50
18		2019010115	83,84	3,10685	0	0	51			2019010115,83,84,3,0,0,51
19		2019010116	84,38	2,48548	0	0	54			2019010116,84,38,2,0,0,54
20		2019010117	86,18	6,21371	0	0	47			2019010117,86,18,6,0,0,47
21		2019010118	83,84	3,72823	0	0	50			2019010118,83,84,4,0,0,50
22		2019010119	77,9	5,59234	0	0	60			2019010119,77,9,6,0,0,60
23		2019010120	75,92	0,62137	0	0	67			2019010120,75,92,1,0,0,67
24		2019010121	74,3	0	0	0	73			2019010121,74,3,0,0,0,73
25		2019010122	73,76	0,62137	0	0	72			2019010122,73,76,1,0,0,72
26		2019010123	72,5	3,10685	0	0	79			2019010123,72,5,3,0,0,79
27		2019010200	71,24	0,62137	0	0	83			2019010200,71,24,1,0,0,83
28		2019010201	71,78	2,48548	0	0	80			2019010201,71,78,2,0,0,80

Fonte: Autor (2025)

Figura 12 - Formato HCDs.



Fonte: Autor (2025)

Ao finalizar o HCD é preciso inserir a nova base de dados no programa. Todos os HCDs devem receber um código numeral, a fim de serem reconhecido pelos softwares e serem inseridos dentro da pasta HCD nos arquivos da *Desing Guide 2002*. Como as novas bases de dados geradas não possuem uma numeração pré-definida, é preciso adotar um código que esteja disponível no sistema e inserir dentro do arquivo *station.dat* nas pastas *Default* e dos HCDs,

contendo em ordem na linha inserida a numeração, código do estado, cidade, estado, nome da estação, latitude, longitude, elevação e data de início, como mostrado no exemplo da Figura 13.

Figura 13 - Exemplo do arquivo station.dat com HCDs criados inseridos.

```
station.dat
Arquivo  Editar  Exibir

00000,GOO,GOIANIA | GO,GOIANIA INMET,-16.40,-49.15,749,20190101
25704,ADK,ADAK | AK,ADAK NAS,51.53,-176.39,17,19960701
26409,MRI,ANCHORAGE | AK,ANCHORAGE MERRILL FIELD,61.13,-149.51,131,19971101
26451,ANC,ANCHORAGE | AK,TED STEVENS ANCHORAGE INTL,61.1,-149.59,130,19980601
26491,LHD,ANCHORAGE | AK,LAKE HOOD SEA PLANE BASE,61.11,-149.58,93,19980201
25308,ANN,ANNETTE | AK,ANNETTE ISLAND AIRPORT,55.02,-131.34,111,19960901
27502,BRW,BARROW | AK,POST ROGERS MEMORIAL AIRPT,71.17,-156.46,35,19980601
26615,BET,BETHEL | AK,BETHEL AIRPORT,60.47,-161.5,142,19981101
26533,BTT,BETTLES | AK,BETTLES AIPIORT,66.55,-151.31,649,19991101
25624,CDB,COLD BAY | AK,COLD BAY AIRPORT,55.13,-162.43,95,19980701
26410,CDV,CORDOVA | AK,M.K. MUDHOLE SMITH ARPT,60.29,-145.27,49,19991201
27406,SCC,DEADHORSE | AK,DEADHORSE AIRPORT,70.11,-148.29,66,19990601
26643,OZ0,DEERING | AK,DEERING AIRPORT,66.04,-162.46,14,19980701
26415,BIG,DELTA JUNCTION/FT GREELY | AK,ALLEN ARMY AIR FIELD,63.59,-145.43,1306,19980101
26422,EAA,EAGLE | AK,EAGEL AIRPORT,64.47,-141.09,899,19980201
26411,FAI,FAIRBANKS | AK,INTERNATIONAL AIRPORT,64.49,-147.51,461,19971201
```

Fonte: Autor (2025)

Com a base de dados final consolidada e integrada ao sistema, a próxima etapa da metodologia consiste na avaliação do impacto de parâmetros meteorológicos — como temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento — sobre o desempenho do pavimento. Para isso, propõe-se a padronização das variações desses parâmetros com base em uma unidade de referência equivalente a 1 °C, expressa em termos percentuais da média anual de temperatura da cidade de Goiânia.

3.2.1 Composição da análise de sensibilidade

Considerando a média anual de temperatura de 23 °C, conforme dados da plataforma Weather Spark (2024), 1 °C representa aproximadamente 5% desse valor. Essa variação percentual será utilizada como base para a definição dos incrementos e decréscimos aplicados aos demais parâmetros meteorológicos, adotando-se como referência, o zero de variação, a condição climática média local.

Cabe destacar que, durante esse processo, foram respeitadas as restrições físicas dos parâmetros: a velocidade do vento não pode assumir valores negativos e a umidade relativa do ar não pode ultrapassar 100%. A Tabela 12 apresenta os parâmetros ajustados, detalhando os critérios adotados para a aplicação das variações positivas e negativas.

Tabela 12 - Intervalo dos parâmetros alterados.

Parâmetros	Média	Negativo	Referência	Positivo
Temperatura (°C)	23	-1	0	+1
Umidade (%)	65	-3,25	0	+3,25
Vel. do Vento (km/h)	9,1	-0,5	0	+0,5

Fonte: Autor (2025)

Desse modo, após a realização de uma análise combinatória dos possíveis conjuntos de variáveis, foram conduzidas 27 simulações no software com o objetivo de realizar a análise de sensibilidade, como mostra a Figura 14. Essa etapa visa identificar os fatores que exercem maior influência sobre a deformação permanente do pavimento flexível, bem como avaliar o impacto das variações desses parâmetros nos resultados obtidos. Importante destacar que a simulação de número 14 é a referência, onde nenhum dos valores foram alterados.

Figura 14 - Quadro de todas as Análises de Sensibilidade.

Simulações	Quadro de Análise de Sensibilidade				Simulações	Quadro de Análise de Sensibilidade							
1	-	T	-	U	-	V	19	+	T	-	U	-	V
2	-	T	-	U	0	V	20	+	T	-	U	0	V
3	-	T	-	U	+	V	21	+	T	-	U	+	V
4	-	T	0	U	-	V	22	+	T	0	U	-	V
5	-	T	0	U	0	V	23	+	T	0	U	0	V
6	-	T	0	U	+	V	24	+	T	0	U	+	V
7	-	T	+	U	-	V	25	+	T	+	U	-	V
8	-	T	+	U	0	V	26	+	T	+	U	0	V
9	-	T	+	U	+	V	27	+	T	+	U	+	V
10	0	T	-	U	-	V	LEGENDA T Temperatura + Positivo U Umidade 0 Referência V Velocidade - Negativo						
11	0	T	-	U	0	V							
12	0	T	-	U	+	V							
13	0	T	0	U	-	V							
14	0	T	0	U	0	V							
15	0	T	0	U	+	V							
16	0	T	+	U	-	V							
17	0	T	+	U	0	V							
18	0	T	+	U	+	V							

Fonte: Autor (2025)

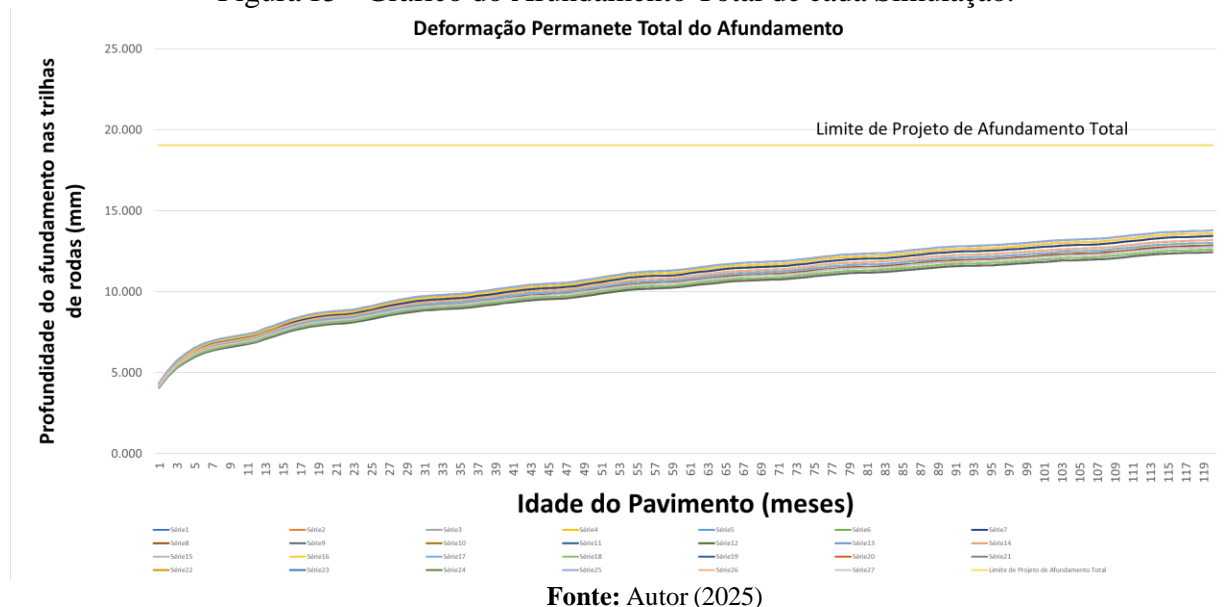
4 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os resultados obtidos a partir das simulações forneceram informações relevantes acerca da deformação permanente na trilha de roda, do surgimento de trincas do tipo couro de jacaré e do *International Roughness Index* (IRI). A análise foi conduzida de forma isolada para cada parâmetro, de modo a possibilitar a observação individualizada do comportamento e evolução ao longo do tempo.

4.1.1 Deformação permanente da trilha de roda

A Figura 15 apresenta o gráfico gerado com base nos valores previstos para um horizonte de projeto de 10 anos, contemplando a deformação permanente da trilha de roda. Destaca-se que, nenhum dos valores da deformação permanente e dos outros resultados dessa análise, ultrapassou o limite de projeto estabelecido pelo software. Lembrando que, para a realização destas análises, não foram promovidas alterações na estrutura do pavimento nem nas condições de tráfego, mantidas constantes as características da estrutura. As modificações restringiram-se unicamente à base de dados meteorológicos, com o objetivo de avaliar exclusivamente a sensibilidade dos parâmetros climáticos sobre o desempenho do pavimento ao longo do período de análise.

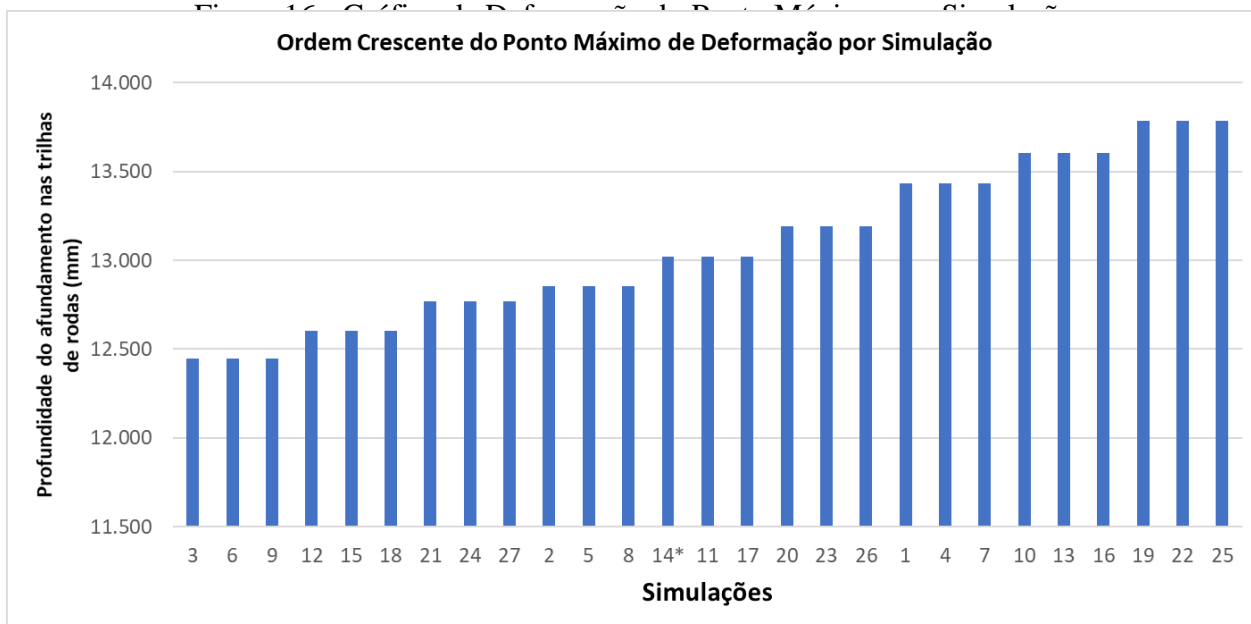
Figura 15 - Gráfico do Afundamento Total de cada Simulação.



Em relação ao comportamento do afundamento total, observou-se uma variação discreta entre os pontos de máxima deformação obtidos nas diferentes simulações. A Figura 16 apresenta o gráfico elaborado a partir das deformações finais, organizadas em ordem crescente. Verifica-se a formação de um padrão, no qual grupos de três resultados apresentam valores idênticos para cada simulação realizada, tendo em comum, o padrão observado, a estabilidade dos valores da velocidade dos ventos e da temperatura, só alterando os dados da umidade relativa do ar.

Esse comportamento sugere que a variação de 5% da umidade relativa do ar, utilizada no modelo, não exerceu influência expressiva nos cálculos de deformação permanente, indicando

uma baixa sensibilidade do afundamento total a variações nas condições específicas nos casos de variação somente da umidade relativa do ar, mantendo inalterável os demais parâmetros.

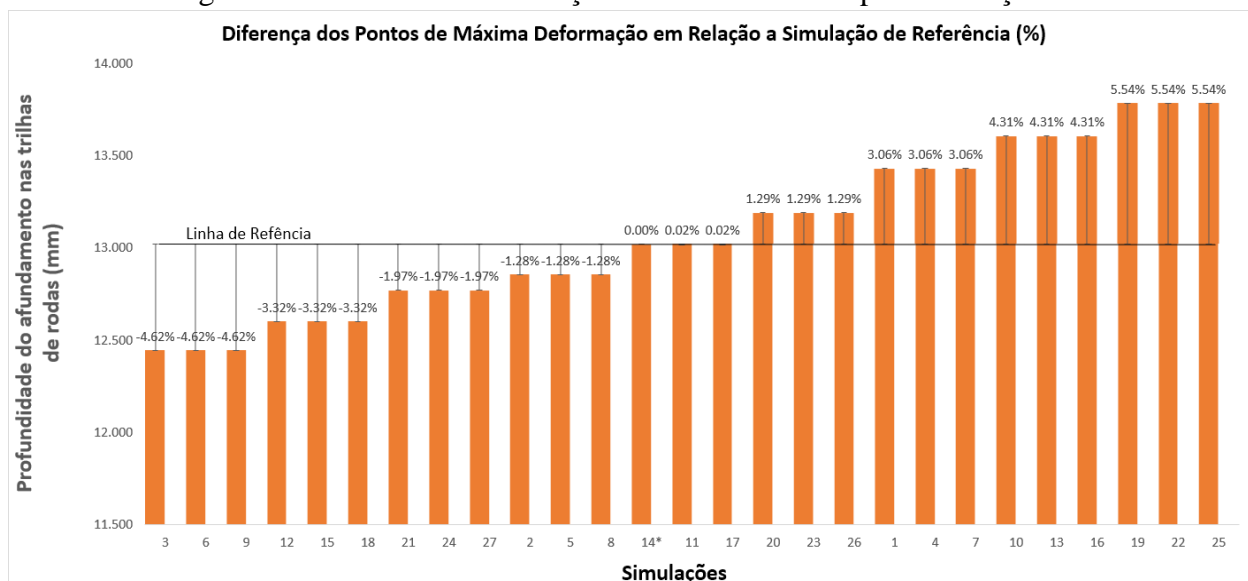


Fonte: Autor (2025)

A partir da análise do Quadro de Análises de Sensibilidade (Figura 14), verificou-se que as simulações que resultaram em menores valores de deformação permanente foram aquelas configuradas com temperaturas negativas associadas a uma velocidade do vento positiva. Em contrapartida, as maiores deformações foram observadas justamente nas simulações com a configuração oposta, ou seja, com a temperatura positiva e a velocidade negativa.

Ademais, foi elaborado um gráfico com uma variação porcentual entre os pontos de máxima deformação e a simulação de referência, expressa na Figura 17, a fim de encontrar como o que não influenciou diretamente nos resultados apontados. A partir desse gráfico foi possível observar que as respostas obtidas com o mesmo valor foram aquelas onde a configuração da base climática manteve fixo os valores de temperatura e velocidade dos ventos, só alterando a umidade relativa do ar. As simulações nas quais só alteraram a umidades, deixando os demais parâmetros estáveis, teve uma variação de apenas 0,02% nos resultados. Isso significa que possivelmente a porcentagem utilizada para alterar a umidade não influenciou tanto nos resultados obtidos.

Figura 17- Gráfico de Deformação do Ponto Máximo por Simulação.

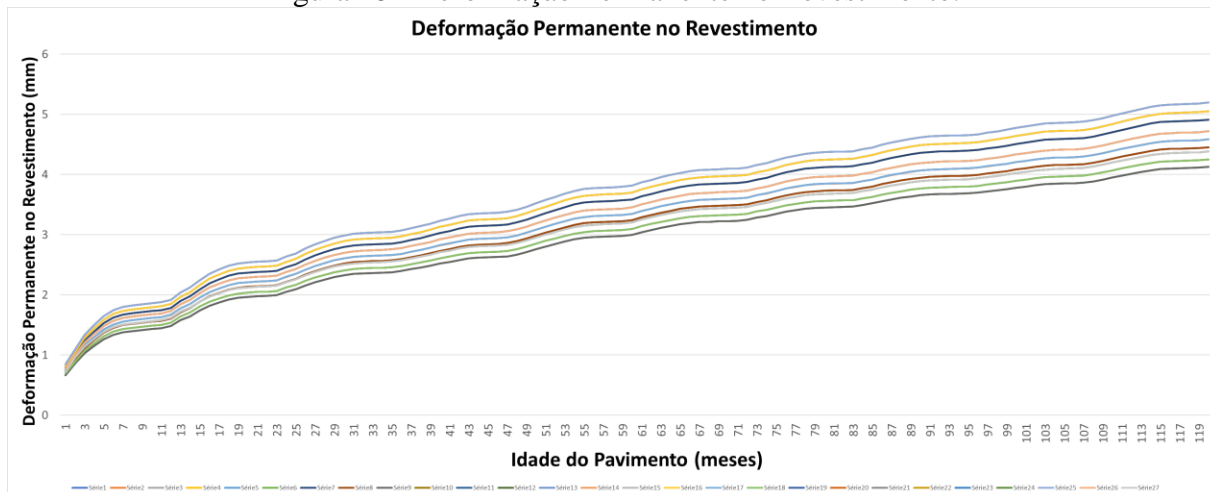


Fonte: Autor (2025)

Além desses resultados apresentados, também é importante avaliar a deformação permanente associada ao afundamento da trilha de roda em cada uma das camadas típicas do pavimento. As Figuras 18, 19, 20 e 21 ilustram os gráficos que representam a evolução da deformação permanente, respectivamente, no revestimento asfáltico, na base, no subleito, bem como o valor total acumulado dessas deformações.

Os resultados indicam que a camada de revestimento asfáltico apresentou a maior relevância na deformação, o que é coerente com o comportamento geológico dos materiais que a compõem e com sua posição estrutural, estando diretamente exposta às solicitações induzidas pelo tráfego. Por sua vez, as camadas inferiores — base, sub-base e subleito — demonstraram variações menos expressivas na deformação permanente.

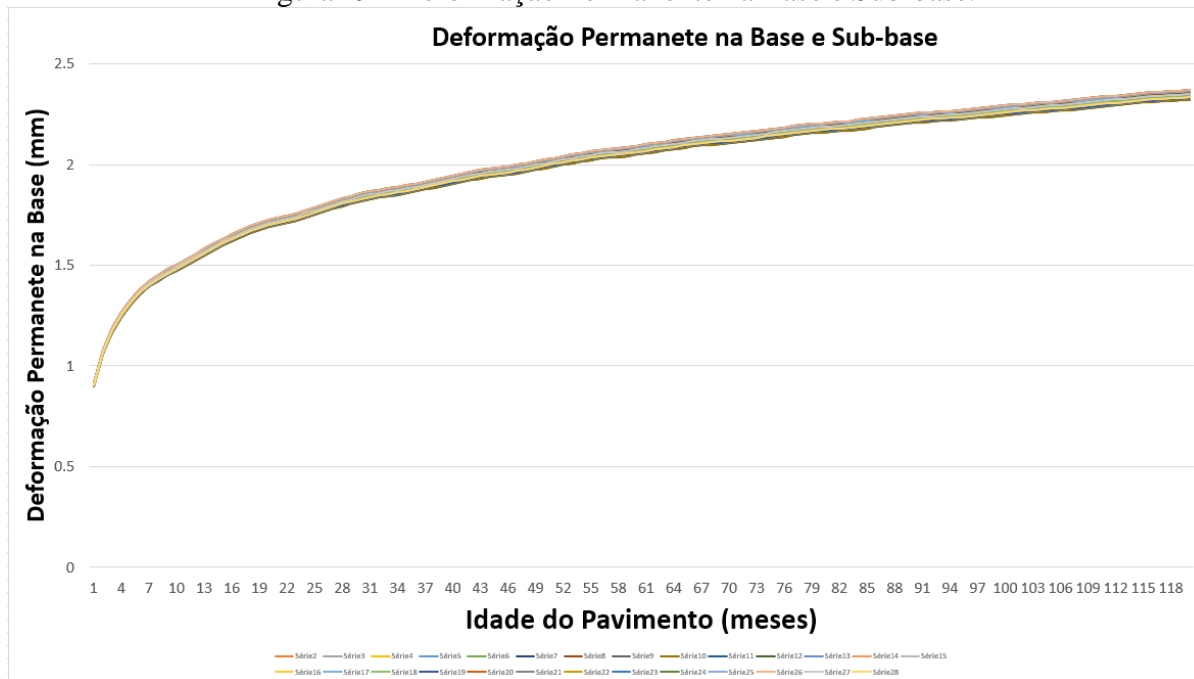
Figura 18 - Deformação Permanente no Revestimento.



Fonte: Autor (2025)

A deformação permanente observada exclusivamente no revestimento, da Figura 18, apresentou uma redução de 11,08% e um aumento de 11,74% em relação à simulação 14 (usada como referência), em que as condições climáticas são originais do local de estudo. No total, a variação entre os valores máximo e mínimo foi de 20,54% equivalente a 1,067mm de deformação. Essa variação se dá em função principalmente da alteração da temperatura e de velocidade dos ventos nas simulações.

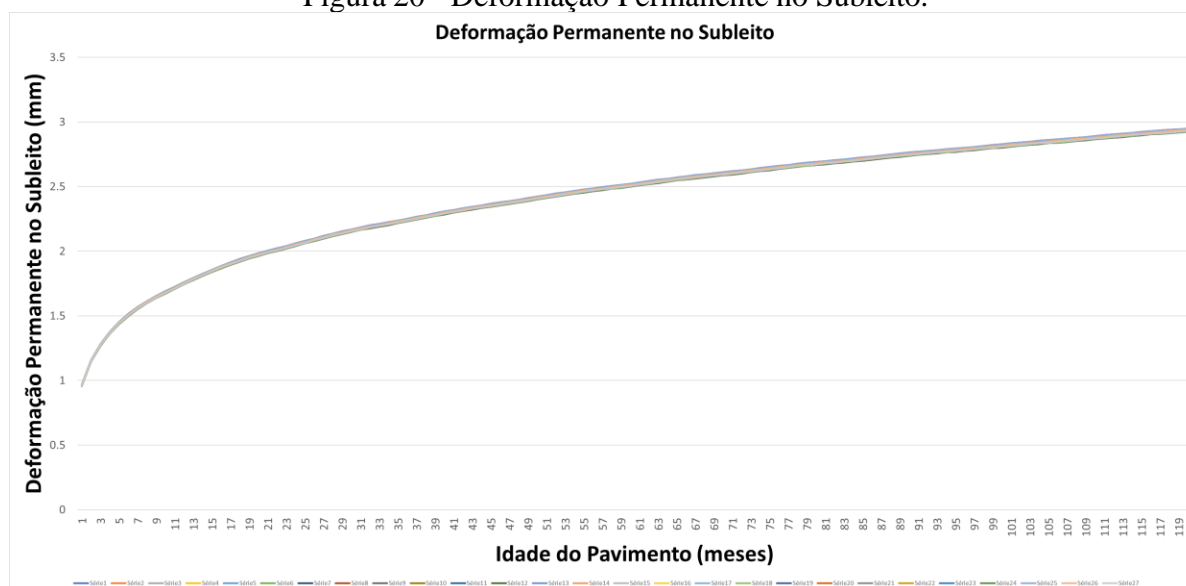
Figura 19 - Deformação Permanente na Base e Sub-base.



Fonte: Autor (2025)

Em relação a deformação permanente na base, na Figura 19, teve uma redução de 0,98% e um aumento de 1,18% em comparação à simulação 14 usada como referência. Sua máxima variação, entre os pontos extremos desse cenário é de 2,14%, equivalente a somente 0,051mm de deformação no período de projeto. Esses resultados apresentam uma modificação menor, comparada com a do revestimento, pelo fato de ser uma camada constituída por materiais diferentes e que não está diretamente exposta a influência da radiação solar e as solicitações do tráfego, conseqüentemente, pode se inferir que nas camadas de maior profundidade esse valor dever ser relativamente menor.

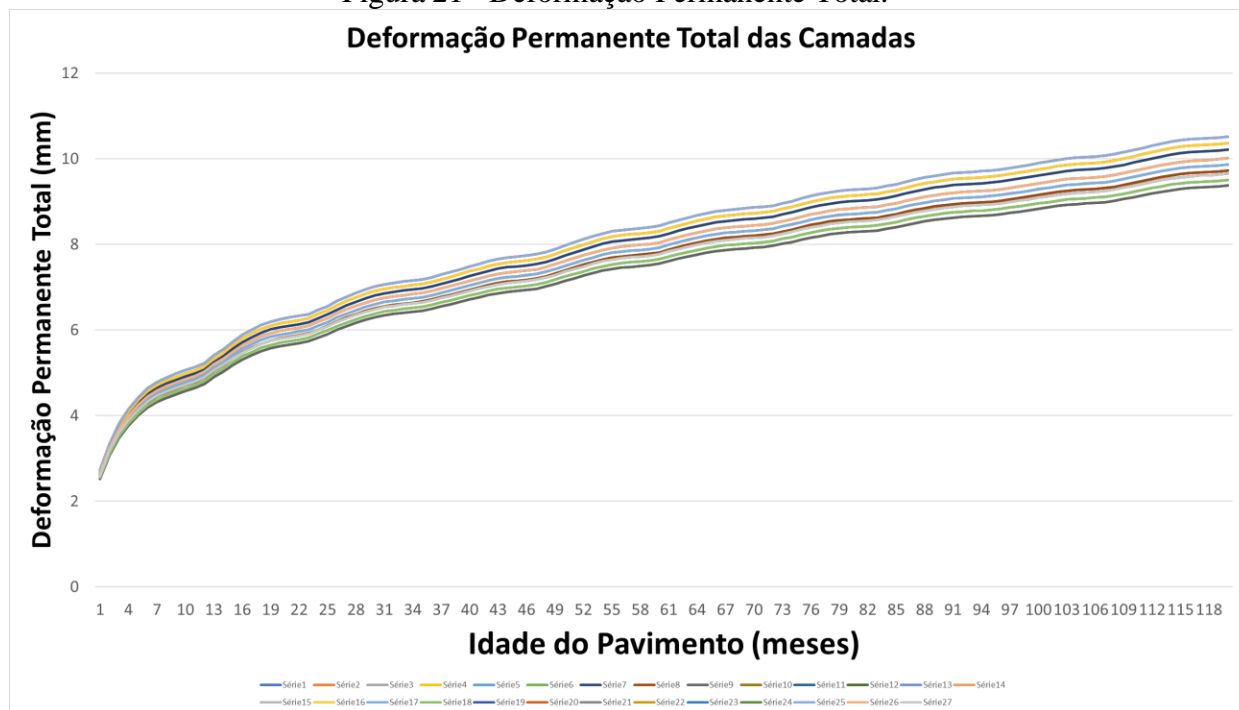
Figura 20 - Deformação Permanente no Subleito.



Fonte: Autor (2025)

A respeito da camada natural do pavimento, o subleito apresentou uma redução e um aumento, de similares 0,43%, com relação a simulação 14. Houve uma diferença de 1,18% na variação total entre os pontos extremos do gráfico na Figura 20, correspondentes a 0,025mm de deformação permanente. Apesar dessa pequena variação no pavimento, pode-se notar que os parâmetros de temperatura, velocidade dos ventos e de umidade afetam pouco essa camada.

Figura 21 - Deformação Permanente Total.



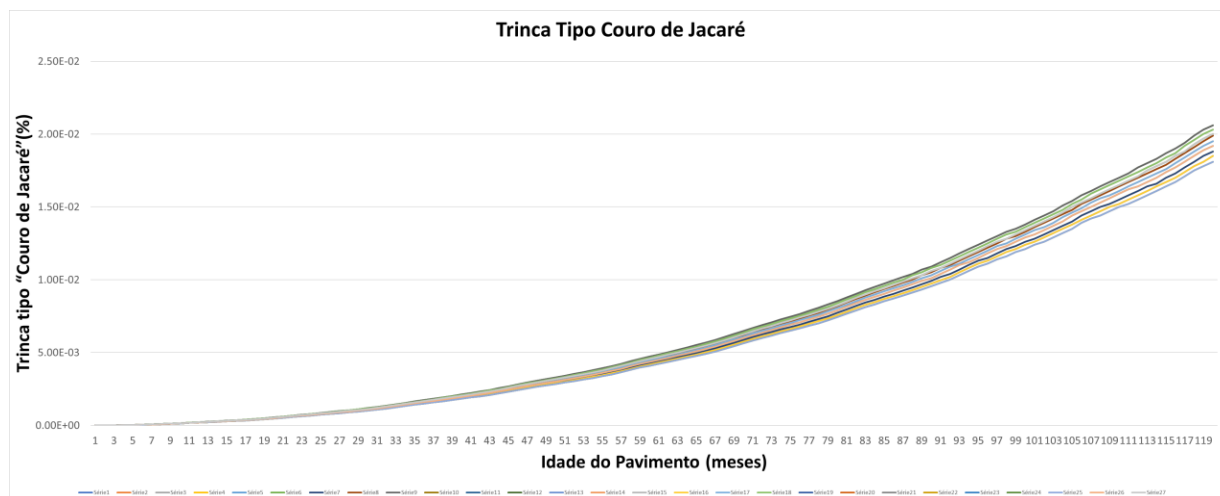
Fonte: Autor (2025)

Por último é possível analisar por completo a deformação permanente total em todas as camadas vigentes. Nesse caso da Figura 21, ocorreu uma redução de 5,20% e uma adição de 6,21%, com relação a simulação de referência. Em seu total, houve uma a variação entre o ponto máximo e o mínimo é de 10,85%, correspondentes a 1,140mm de deformação permanente. Esses resultados permitem concluir que os parâmetros climáticos, como temperatura, velocidade dos ventos e umidade, influenciam negativamente o desempenho do pavimento. Especificamente, o aumento da temperatura combinado com a redução da velocidade do vento resulta em maiores níveis de deformação por afundamento de trilha de roda, sendo este efeito mais expressivo do que a capacidade de mitigação proporcionada pela configuração oposta.

4.1.2 Trinca Tipo Couro de Jacaré

No que diz respeito ao resultado da trinca tipo couro de jacaré, foi elaborado um gráfico, representado pela Figura 22, buscando visualizar e determinar a evolução e o crescimento das áreas do pavimento afetadas por esse tipo de trincas, expressas em percentual, ao longo de um período de 10 anos. Ele mostra um crescimento exponencial nos valores percentuais de cada simulação. Destaca-se que o software *Desing Guide* não estabelece um limite de projeto para esse tipo de trinca, o que difere dos outros parâmetros analisados que possuem valores-limite predefinidos.

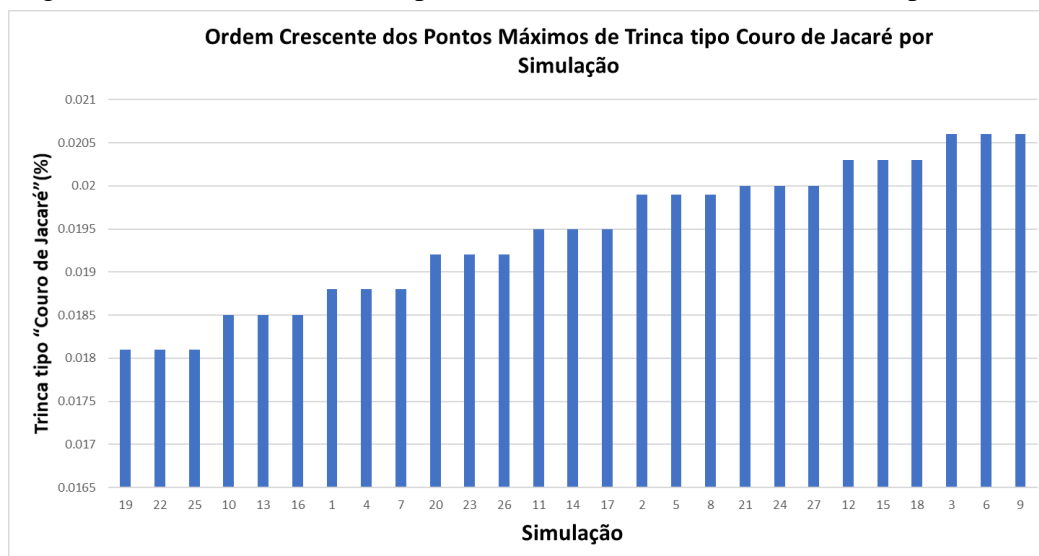
Figura 22 - Gráfico da Trinca Tipo Couro de Jacaré.



Também foi feito um gráfico com os valores do máximo de trincas no final do período de projeto, organizadas em ordem crescente. A Figura 23 mostra o resultado desse gráfico, na qual, ao observar a Figura 14, possuem uma configuração oposta ao da deformação permanente, na qual é possível notar um comportamento inverso em relação à deformação permanente, observando que simulações com menor afundamento apresentaram maiores níveis de trinca tipo couro de jacaré.

Essas informações sugere uma relação entre esses parâmetros, na qual se houver melhorias no desempenho da estrutura, como menor deformação permanente, não necessariamente iram reduzir as trincas superficiais, implicando em uma análise ampliada para a avaliação do desempenho de pavimentos.

Figura 23 - Gráfico de Trinca tipo Couro de Jacaré do Ponto Máximo por Simulação.

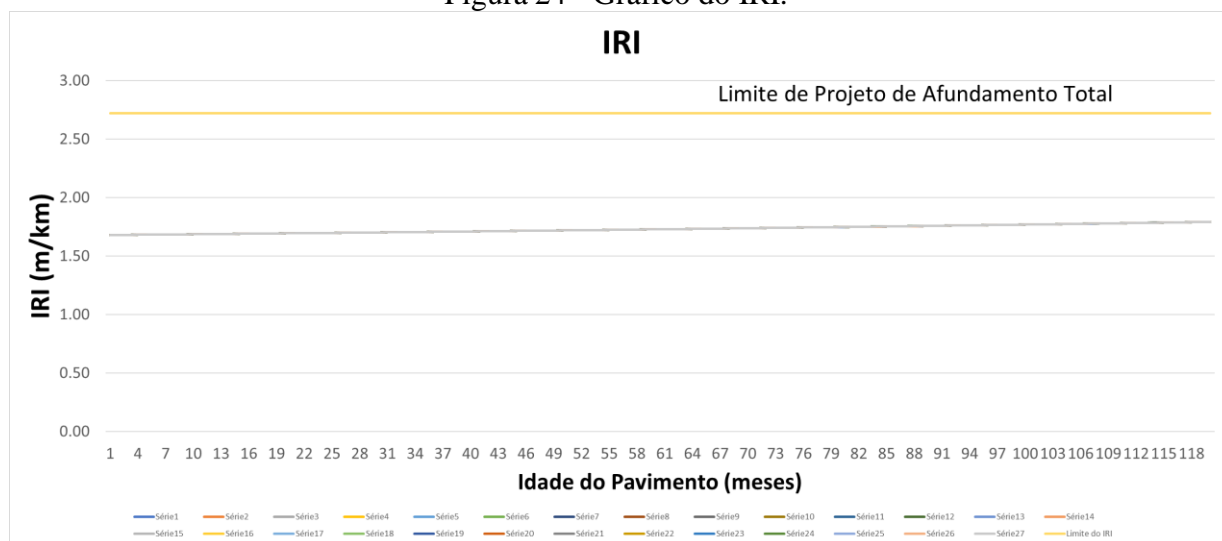


Fonte: Autor (2025)

4.1.3 IRI

Por fim, foi desenvolvido um gráfico que busca informar o comportamento do IRI ao longo do período de projeto. A Figura 24 informa a evolução desse parâmetro juntamente com o limite de projeto, que por sua vez não o ultrapassa. Nessa imagem não é possível ver com detalhes as alterações que cada simulação possui, pelo fato de serem bastante próximos os valores, porém, na Figura 25 é possível analisar com mais detalhes a evolução de cada ponto máximo.

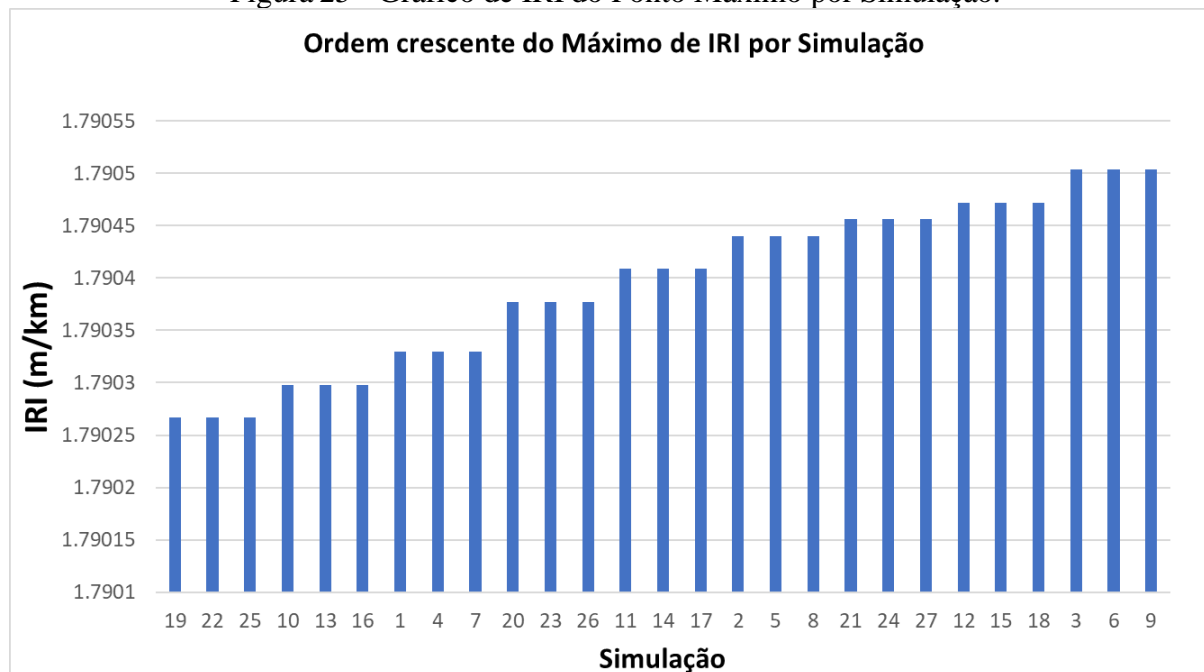
Figura 24 - Gráfico do IRI.



Fonte: Autor (2025)

Ao analisar os resultados relativos ao IRI e às trincas do tipo couro de jacaré, observa-se um comportamento distinto da deformação permanente. As Figuras 25 apresenta o gráfico contendo os valores máximos de IRI em ordem crescente. A partir dessas análises, constatou-se que as simulações que apresentaram maior deformação permanente, foram aquelas que exibiram os menores índices de trincamento e de irregularidade longitudinal na superfície do pavimento.

Figura 25 - Gráfico de IRI do Ponto Máximo por Simulação.



Fonte: Autor (2025)

Esses resultados evidenciam a existência de uma relação inversamente proporcional entre os parâmetros analisados, ou seja, enquanto o aumento da deformação permanente na trilha de roda tende a reduzir os valores de IRI e de trincamento tipo couro de jacaré, sua diminuição está associada a degradação dessas patologias. No entanto, a variação dos resultados do IRI pode ser desconsiderada em função da ordem de grandeza dos resultados.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo, foi realizado uma análise de sensibilidade, por meio do software *Desing Guide 2002*, em que demonstrou a influência das variáveis climáticas, sendo elas a temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, no desempenho do pavimento flexível ao longo de um período de 10 anos. Através de 27 simulações distintas, foi possível obter resultados satisfatórios para cada patologia, com destaque para esse trabalho a deformação permanente da trilha de roda, extensão das trincas do tipo couro de jacaré e o Índice Internacional de Irregularidade (IRI).

Observou-se que, uma variação de 5% nos parâmetros de temperatura e velocidade do vento, em relação a Simulação 14 utilizada como referência – cujas condições climáticas são originais do local de estudo), resultou em uma maior sensibilidade na deformação permanente da trilha de roda. Foi avaliado que uma elevação na temperatura, juntamente com uma redução na velocidade dos ventos, pode comprometer cerca de 11,74% da estrutura, especialmente na camada de revestimento, que registrou variações de até 20,54% entre os pontos extremos das simulações. Em compensação, as camadas inferiores, como a base e a sub-base, apresentam menores efeitos, com pequenas variações, como por exemplo o subleito, cuja variação não ultrapassou 0,86%.

Importante também destacar que nos resultados da deformação permanente, verificou-se padrões nas respostas apresentadas, formando grupos com três respostas idênticas para cada simulação realizada. O padrão observado foi a configuração das simulações onde se variou somente os valores de umidade mantiveram constantes os dados de temperatura e velocidade dos ventos. Isso implica que, nesse estudo, a variação de 5% da umidade relativa do ar não apresentou uma sensibilidade expressiva no pavimento flexível para a deformação permanente.

Em relação às trincas tipo couro de jacaré, através do gráfico, foi possível determinar uma evolução ao longo dos anos, seguindo um crescimento exponencial. Apesar da ausência de um limite definido para essa patologia no software *Desing Guide 2002*, foi identificado uma relação incomum onde simulações com menores níveis de deformação permanente apresentaram, maior facilidade de gerar trincamentos do tipo couro de jacaré. Este comportamento sugere uma relação inversamente proporcional entre as patologias analisadas.

Essa mesma relação foi observada no comportamento do IRI, que apresentou menores valores nas simulações com maior deformação permanente. Embora todas as simulações tenham apresentados valores compatíveis com as demais análises e permanecido dentro dos limites de projeto estabelecidos para o IRI, os resultados apresentados por esse parâmetro estão

na ordem de grandeza muito pequena, por esse motivo, podem ser desconsiderados para essa análise de sensibilidade.

É relevante enfatizar as dificuldades apresentadas durante esse estudo, capazes de justificar possíveis pesquisas futuras sobre esse tema. A ausência de métodos mecanístico-empíricos que priorizam a interferência climática em seus cálculos, dificuldades e limitações ao obter dados climáticos de qualidade, baixa frequência com que os dados são registrados ao longo do tempo nas estações meteorológicas juntamente com as distintas condições climáticas e geotécnicas presente nas regiões do país são exemplos de dificuldades que prejudicam a confiabilidade dos resultados e podem promover projetos de pavimentos flexíveis superdimensionados ou subdimensionados comprometendo a estrutura da via ao longo dos anos.

Em suma, a análise de sensibilidade apresentada aponta que, embora a alteração da umidade não foi muito expressiva nos resultados, modificando apenas 0,02% da estrutura, as alterações nos demais dados meteorológicos, como a velocidade dos ventos e a temperatura, podem impactar diretamente as camadas do revestimento, aumentando a deformação permanente e podendo interferir na redução de trincas tipo couro de jacaré e do IRI. Outro resultado interessante é a elevação da temperatura juntamente com a redução da velocidade do vento decorre em maiores níveis de deformação por afundamento de trilha de roda, tendo este efeito mais relevante do que a capacidade de mitigar os efeitos proporcionada pela configuração oposta. Estes resultados destacam a importância de, ao utilizar métodos mecanístico-empíricos no dimensionamento de pavimentos flexíveis, considerar critérios climáticos, principalmente em regiões que apresentam climas variados, como o tropical, presente na cidade de Goiânia.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O presente estudo foi inicialmente desenvolvido com o propósito de analisar a sensibilidade de determinados parâmetros meteorológicos sobre o desempenho de pavimentos flexíveis. No entanto, conforme o desenvolvimento da pesquisa avançou, é natural que novas questões surjam para contribuir para futuras investigações. Nesse sentido, destacam-se as seguintes recomendações:

- Aumentar o período da base de dados climática para englobar um horizonte de histórico climático maior e analisar com maior precisão.
- Escolher um local de estudo onde possua um fluxo de veículos maiores, a fim de buscar maiores variações nos resultados de deformação permanente e de IRI nas simulações.
- Analisar mais critérios meteorológicos, com a intenção de avaliar a sensibilidade de outros parâmetros e realizar mais combinações de simulações e expandir a base de estudo.
- Avaliar outros tipos de patologias no pavimento flexível, com o intuito de entender quais são os parâmetros mais sensíveis para cada tipo de patologia.
- Aumentar a porcentagem alterada de cada critério nas inúmeras combinações de simulações, a fim de buscar maiores variações de resultados e saber qual pode ser um limite razoável para essas alterações.
- Considerar o uso de fontes alternativas para obter os dados climáticos, explorando estações meteorológicas distintas da utilizada em Miami. Além disso, buscar todos os registros climáticos do local de estudo, consultando bases de dados regionais ou referências climáticas mais semelhantes as da região de estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. **Design of Pavement Structures 1986**. Associação Americana de Oficiais de Rodovias e Transportes Estaduais. 1986.
- AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures, 1993. **American Association of State Highway and Transportation Officials**, Washington, D.C.
- AASHTO. Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. **A Manual of Practice**. Edição provisória de julho de 2008.
- AGUIB, A. A. **Flexible Pavement Design AASHTO 1993 versus Mechanistic-Empirical Pavement Design** [Thesis, the American University in Cairo]. AUC Knowledge Fountain. 2021.
- ALBANO, J. G. **Efeitos dos Excessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos**. Tese de doutorado. PPGEP/UFRGS. Porto Alegre, RS, 2005.
- ALMEIDA, C. V. S.; RODRIGUES, B. DE O.; LIMA, L. R. **Estudo do dimensionamento de pavimentos através do método Medina, em trecho a ser duplicado na BR-116**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, p. 97–137, 21 maio 2021.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Materiais e estruturas de pavimentos asfálticos**. In: **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS-ABEDA, 2008.
- BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2022.
- BRITO, L; HELLER, L. **Influência da temperatura no comportamento de Pavimentos Flexíveis – uma análise direcionada às ilhas de calor**. Relatório final de pesquisa. PRIME ENGENHARIA E CONSULTORIA. Porto Alegre/RS, 2016.
- COELHO, T. G. M.; GARCIA, L. M. **Relatório Final PIBIC**. 10 de setembro de 2021.
- COLPO, G. B. **Análise de Fdiga de Misturas Asfálticas Através do ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS, 2014.
- Confederação Nacional do Transporte – CNT. **Brasil tem método antigo para dimensionar o pavimento**. Brasília, CNT, 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. **DNIT 183/2018 - ME**. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Pavimentação: solos: terminologia. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos **DNIT 005/2003 - TER**. Terminologia Rio de Janeiro: DNIT, 2003.
- DNIT (2021). **Instrução de Serviço – IS-247: Estudos para Elaboração de Projetos de Implantação usando o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa**. Nota Informativa. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR 719, Rio de Janeiro, 2006.

FACCIN, C. **Desenvolvimento de um modelo de previsão do perfil de temperatura de pavimento flexíveis**. TRANSPORTES, v. 32, n. 2, p. e2984, 4 jul. 2024.

FERNANDES, W. D. **Análise Comportamental Entre os Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do Brasil e o Método Da AASHTO**. PPGEC/UFSM. Santa Maria, RS, 2016.

FERNANDES, W. D. **Comparativo de Projeto de Pavimentos Flexíveis através Métodos de Dimensionamento do Brasil e da AASHTO**. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 5, n. 2, p. 99–113, 2018.

FHWA (2014). **Traffic Monitoring Guide**. Federal Highway Administration. Novembro de 2014.

FONTENELE, Heliana Barbosa. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos**. 2011. Universidade de São Paulo, [S. l.], 2011.

FRANCO, F. A. C. P. **MeDiNa – Manual de ajuda. Programa MeDiNa. Versão 1.1.9**. Rio de Janeiro, 2023.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de utilização. Versão 1.1.4**. Rio de Janeiro, 2020.

FRANSOZI, C. B. P. **Previsão da Vida Útil de Pavimento da BR-386/Rs Através de Método Mecânico Empírico**. Centro Universitário UNIVATES. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Curso De Engenharia Civil. Lajeado, junho de 2014.

GUABIROBA, J.J.O.C. **Estudo Sobre fadiga de misturas asfálticas produzidas em Goiás**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da UFG, Goiânia, 2020.

GUIMARÃES, A.C.R. **Um método mecânico empírico para previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

HALL, K. D.; BEAM, S.; LEE, MENG. **AASHTO 2002 Pavement Design Guide Design Input Evaluation Study**. Relatório final, TRC-0302. Transportation Research Committee - TRC. Departamento de Engenharia Civil Universidade do Arkansas, 2006.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2. ed. Estados Unidos da América: Pearson Prentice Hall, 2004.

IBGE – Educa. **Conheça o Brasil - Território - Clima**. Gov.br, IBGE, Educa Jovens, 2024. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>>. Acesso em: 20 de out. 2024.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Pecuária**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>> . Acesso em: 20 nov. 2024.

KURNIA, Devi. **Contribuições para o desenvolvimento de um método mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos**. 2017. Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2017.

LEE, Kang-Won W.; WILSON, Kathleen; HASSAN, Syed A. **Prediction of performance and evaluation of flexible pavement rehabilitation strategies**. ELSEVIER. ScienceDirect, 7p, 2017

LEHMERT, M. B. S. **Análise Comparativa de Soluções Entre os Métodos Brasileiros e o Mepdg para Reabilitação de Pavimentos Flexíveis – Estudo De Caso**. PPGEC/UFSC. Florianópolis/SC, 2020.

LI, Qiang Joshua; WANG, Kelvin C. P.; YANG, Guangwei; ZHAN, Jason You; QIU, Yanjun. **Data needs and implementation of the Pavement ME Design**. *Transportmetrica A: Transport Science*, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 135–164, 2019. DOI: 10.1080/23249935.2018.1504254. Disponível em: <https://doi.org/23249935.2018.1504254>.

MADUREIRA, L. A. B. **Misturas asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem**. Módulo 3. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), Instituto de Pesquisas em Transporte (IPR). Brasília, maio de 2022.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e Análise de Desempenho de Pavimentos Flexíveis da Ampliação da Rodovia BR – 290/RS - A Implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. Tese de doutorado. PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, RS, 2014.

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critérios de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil). COPPE. UFRJ. Rio de Janeiro, 1991

NCHRP, N. C. H. R. P. **Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. 2004.

NOVATO, G. S. **Retroanálise de Bacias de Deflexão e Dimensionamento Mecanístico Empírico de Pavimentos Asfálticos: Estudo de Caso**. IFG, Departamento de Áreas Acadêmicas III Bacharelado em Engenharia Civil. Goiânia/GO 2021.

OLIDIS, C. HEIN, D. **Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Materials Characterization Is your Agency Ready?** da Conferência Anual de 2004 do Associação de Transporte do Canadá Cidade de Quebec, Quebec.

OLIVEIRA, João Carlos de. **Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

PELISSON, Nayara Donelli; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; PRADO DA SILVA JÚNIOR, Carlos Alberto; FONTENELE, Heliana Barbosa. **Efeito da variação da espessura do revestimento no desempenho de pavimentos flexíveis avaliados pelo MEPDG**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, [S. l.], v. 7, n. 2, 2013. DOI: 10.5216/reec.v7i2.26519. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/reec/article/view/26519>.

PELISSON, Nayara Donelli; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; SILVA JÚNIOR, Carlos Alberto P.; FONTENELE, Heliana Barbosa. **Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis**. *Journal of Transport Literature*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 20–24, 2015. DOI: 10.1590/2238-1031.jtl.v9n1a4. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/jtl/v9n1/2238-1031-jtl-09-01-0020.pdf>.

RODEZNO, M. C. **Diretrizes para Implementação do Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos (MEPDG) para a Concessionária NovaDutra**. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Arizona State University – ASU. Outubro 2011.

RODRIGUES, A. **Uso do Medina em Soluções Básicas de Pavimentos Asfálticos no Distrito Federal**. Faculdade de Tecnologia, DECA/UnB. Brasília - DF, jan. 2023.

SANTOS, T. A. dos, Pinheiro, R. J. B., Specht, L. P., & Brito, L. A. T. (2020). **Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos**. *Matéria* (Rio de Janeiro), 25(3). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200003.1117>

SANTIAGO, L. S. **Contribuições para o Desenvolvimento de um Método Mecanístico-empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**. PPGT/UFC. Fortaleza, CE, 2017.

Schwartz, C. W., & Carvalho, R. L. (2007). **Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide - Final Report - Volume 2: Evaluation of Mechanistic-Empirical Design Procedure**. Maryland: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Maryland.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. DNER, 1981.

TEIXEIRA, D. I. B.; PITANGA, L. C.; ARAÚSO, D. A. M.; PONTES, L. A. A.; LOPES, M. M.; LIMA, R. M.; CARVALHO, J. C. **Análise da IS -247: sugestões de ajustes**. PPGG/UnB. Brasília - DF. Janeiro, 2022.

WEATHER Spark. **Clima e condições meteorológicas médias em Goiânia e Miami no ano todo**. Disponível em: < <https://pt.weatherspark.com/>>. Acesso em: 20 de nov. 2024.

WITCZAK, Matt. **¿Debe América Latina desarrollar su propia Guía de Diseño Mecanístico-Empírica para Pavimentos (LAMPA)?** In: XVI CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO DO ASFALTO (CILA) 2012, Anais, 2011.